



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Fúziós berendezéseken végzett nyalábemissziós mérések tervezése
és interpretációja szimulációk segítségével**

Ph.D. téziszfüzet

Asztalos Örs

Témavezető: Dr. Pokol Gergő

Budapest

2022

Bevezető

A fúziós energiatermelés egyik alapvető célja a deutérium-trícium fúziós reakcióból felszabaduló energia békés célú alkalmazása. A fúziós begyújtási körülmények egy 10^8 K hőmérsékletű termikus közeget igényelnek, reakciót jellemző magas küszöbenergia illetve a rugalmas Coulomb ütközések nagy bekövetkezési valószínűsége miatt [1]. Ezen körülmények között az üzemanyag teljesen ionizált plazma állapotban található, amit mágneses térrel tarthatunk össze. A legfejlettebb, mágneses teret generáló és plazmát fenntartó reaktortípusok a tokamak és a sztellerátor. A fúziós teljesítményt az összetartott plazmarégió viselkedése határozza meg, amely mikroturbulenciának és egyéb transzportfolyamatoknak van alávetve. Az utolsó zárt fluxusfelületen kívül található a határréteg plazma (scrape-off layer – SOL), ami az összetartott plazmának és benne zajló transzport jelenségeknek szab határt illetve kapcsolatot teremt az összetartott régió és a plazmát határoló felületek között. Az utóbbi egy kipufogó rendszer funkcióját látja el, magas anyag- és energiafluxust eredményezve a plazmát határoló elemeken, amiben határréteg turbulencia illetve tranziens magnetohidrodinamikai jelenség tranzienseket eredményezhetnek. Turbulens időskálán fellépő jelenséget tanulmányozása gyors és térben jól lokalizált mérési eljárásokat igényelnek [2, 3].

Nyalábemissziós spektroszkópia (beam emission spectroscopy – BES) egy aktív plazmadiagnosztikai eljárás a plazma sűrűségének meghatározására. Az eljárás során egy nagyenergiájú, monoenergiás, semleges atomnyaláb hatol a plazmába, amely lehet egy diagnosztikai nyaláb lítium (LiBES) illetve nátrium (ABES) alkáli elemekből vagy fűtőnyaláb, amely hidrogén vagy annak izotópjaiból állhat (HBES, DBES). A nyalábatom és plazmával való ütközések során a végső ionizációt megelőzve gerjesztett állapotba kerülhet, amit karakterisztikus energiájú foton emissziója követhet. Az emittált fényt egy dedikált, keskeny-sávú optikai szűrővel ellátott megfigyelőrendszer detektálja, így megkülönböztetve a nyaláb és a háttérplazma emisszióját. A diagnosztika centiméteres tér- és mikroszekundumos időfelbontása alkalmassá teszi turbulens időskálán lejátszódó jelenségek tanulmányozására. Gyors BES mérések számos fúziós berendezésen jelen vannak mag-, szél- vagy határréteglazmában fellépő turbulencia, áramlások vagy tranziens sűrűségperturbációk tanulmányozására [4, 5].

BES diagnosztikák modellezése a méréskiértékelés és sűrűségvisszaállítás egy fontos aspektusa. Számos BES-t modellező kód és szintetikus diagnosztika létezik, amelyek különböző komplexitással különböző célokat szolgálnak. Minden BES kód egy ütközési-sugárzási modellből (collisional-radiative model – CRM) kiindulva határozza meg a plazmába hatoló nyaláb evolúcióját. Egy egyszerűbb megközelítés a CRM szekunder egyensúlyból származtatott nyalábgyengítési és emisszivitási együtthatókkal számol nyalábemissziót, ami enyhe gradiensű sűrűségprofilokon alkalmazható. Ennél sokkal pontosabb a CRM-et alkotó rátaegyenlet-rendszer direkt megoldása, ami meghatározza a releváns gerjesztett szintek betöltöttségét nyaláb mentén. Az utóbbi módszer alkalmas gyorsan fluktuáló sűrűségprofilok számolására is. A rátaegyenlet-rendszer figyelembe veszi a nyalábatomok gerjesztését, ionizálását eredményező ütközéseket a plazmát alkotó elektronokkal, fő ionokkal és szennyezőkkel. A BES modellek változatosan kezelik a nyaláb és megfigyelési geometriákat, amik lehetnek 1D nyaláb illetve megfigyelési irány modellek de akár 3D nyaláb illetve részletes 3D optikai modellezés is. Az egyik első kihívás a

modellezési feladat által kívánt megfelelő komplexitású és részletességű BES modell kiválasztása és alkalmazása [6-8].

Motiváció

A PhD munkám fő motivációja új eljárások fejlesztése modellezéssel támogatott kísérleti méréskiértékelés, alap plazmafizika modellek validálása és BES diagnosztikák tervezése és optimalizálása célokra.

A detektált sűrűségfluktuációk térbeli lokalizációja a fluktuációk jellemzése szempontjából meghatározó információ, amit az atomfizikai folyamatok illetve a megfigyelési geometriai adottságok térben elkennek. Előző munkák különböző részletességgel közelítették BES rendszerek térbeli lokalizációjának meghatározását [9, 10]. Céлом egy egzakt módszer kifejlesztése és demonstrálása volt a BES rendszerek térbeli lokalizációjának meghatározására.

BES szintetikus diagnosztikákat gyakran alkalmaznak a tervezett BES rendszerek képességének, teljesítményének felmérésére, ezek optimalizációjára illetve a fellépő kompromisszumok feloldására. Minden BES diagnosztikai rendszert egyedi elvárt képességek figyelembevételével terveznek, és minden esetben a tervezési kompromisszumok optimalizálását igénylik. Erre a célra egy átfogó, általános módszertan megvalósítását céloztam meg és mutattam be több BES rendszer tervezése során.

A szintetikus diagnosztikák egyre központibb szerepet játszanak az alap plazmafizika modellek validálásában. Céljuk a plazmaszimulációk eredményének átalakítása a méréssel direkt módon összevethető formába a validációs eljárás egyértelmű kivitelezése érdekében [11, 12]. Céлом egy fluktuációs időskálán alkalmazható szintetikus BES diagnosztika fejlesztése, amely figyelembe veszi az összes, mérésre jellemző, a validálni kívánt plazma modell által adott eredmények statisztikai tulajdonságait befolyásoló hatást.

A plazmaszéli semleges atomok és molekulák egy tipikusan elhanyagolt része bármilyen plazmát, illetve diagnosztikát modellező folyamatnak. Az elmúlt évek kutatási eredményei viszont kimutatták, hogy a plazmaszéli semlegesek szignifikánsan befolyásolják a SOL viselkedését és egyben a benne fellépő transzport folyamatokat [13, 14]. Céлом létező ütközéses sugárzási modellek a nyalábatom semleges részecskékkal való ütközésének kiterjesztésével. Továbbá demonstráltam a plazmaszéli semlegesek figyelembevételének hatását a nyaláb emissziós számolásokra.

Módszertani háttér

PhD munkám során számos ismert eszközt és eljárást alkalmaztam a Motiváció fejezetben említett BES szintetikus diagnosztikai eljárások fejlesztésére.

RENATE

Ez a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Nukleáris Technikai Intézetében fejlesztett 3D szintetikus BES diagnosztika. A RENATE ütközési sugárzási modelljét egy direkt

rátaegyenlet-rendszer megoldó képezi, ami hidrogén, deutérium, trícium, lítium vagy nátrium nyalábatomok ütközését veszi figyelembe elektronokkal, hidrogén ionokkal és egy kiátlagolt szennyező populációval. A CRM számol a nyalábatom ütközéses gerjesztésével, ionizációjával, töltéscserével illetve spontán emisszióval. Továbbá a RENATE rendelkezi egy kiterjedt 3D nyalábmodellező illetve 3D megfigyelési geometriát modellező képességgel, ami realiztikus mágneses geometriát használ. A kód kiszámolja az egyes detektorokra érkező várható fotonáramot [6]. RENATE képezte PhD munkám fő fókuszát, rá épült legtöbb BES modellezési fejlesztésem és a kialakított átfogó módszertan.

Simulation of Spectra

Simulation of Spectra (SoS) egy BES-t modellező kód, amit Manfred von Hellermann fejlesztett a Forschungszentrum Jülich kutatóközpontban. A kód nyalábgnyengítési és emisszivitási együtthatókkal határozza meg a nyalábemissziót. Az fényintenzitás mellett meghatározza a detektált BES emisszió spektrumát kiszámolva a nyaláb terjedési sebessége illetve a rendelkezésére álló mágneses geometriából a megfigyelt átmenethez tartozó Stark-felhasadást illetve Doppler-eltolást hidrogén nyalábanyagra. SoS rendelkezik 3D nyalábmodellező illetve 1D látóvonal menti optikai modellező készségekkel. A kód kiemelkedő készségei közé tartozik a plazma folytonos és vonalas háttéremissziójának meghatározása a megfigyelőrendszer látóvonalai mentén [7]. Munkám során SoS-t optikai szűrő tervezésre illetve a detektált nyalábemisszió illetve háttér spektrumok meghatározására alkalmaztam.

BES teljesítményparaméterek

A megvalósított BES tervezési metodológia során több teljesítményparamétert értékeltem ki illetve optimalizáltam a tervezési paraméterek módosításával. Az optimalizált paraméterek a következők:

- **Behatolási mélység** alatt értendő az a nyaláb menti távolság, ami az utolsó zárt fluxusfelület illetve az emissziós csúcs között van. Ez különösen releváns a diagnosztikai nyalábok esetén, mivel az emissziós csúcson túl a térbeli lokalizációs készség gyakorlatilag megszűnik. A behatolási mélységet RENATE-val határoztam meg.
- **Jel-háttér arány** (signal-to-background ratio – SBR) alatt értendő a detektált nyalábemisszió illetve a detektált háttér emisszió aránya. Az SBR meghatározza, mennyire elkülöníthető a jel a háttértől. Ezt a mértéket a SoS által számolt szűrt és spektrálisan integrált emisszivitásokból határoztam meg.
- **Jel-zaj arány** (signal-to-noise ratio – SNR) főként az egyes detektorok felületére érkező detektált fotonáram értékekből lett származtatva. A BES detektorokat terhelő zajforrások a fotonstatisztikus zaj illetve az elektronikus és erősítési zajok. A fotonáram értékeket RENATE-val számoltam.
- **Térbeli lokalizációt** a detektált fényfluktuációt okozó lehetséges sűrűségfluktuációk térbeli eloszlása határozza meg. Ez egyúttal alsó korlátot szab a rendszer által felbontható sűrűségfluktuáció méretre is. A térbeli lokalizációt RENATE-val határoztam meg.

Turbulencia modellek

Az alap plazmafizika modellek validációjára kiépített szintetikus diagnosztikát, a Dán Technikai Egyetemen kifejlesztett HESEL, 2D, több-folyadék modelljén alkalmaztam. A HESEL egy SOL turbulenciát modellező kód, ami főként a határrétegben megjelenő sűrűségfilamentumok tér- és időevolúcióját követi. A modell a kvázi-semleges plazmát leíró Braginskii egyenletekből van származtatva. A határréteg filamentumokat kicserélődési dinamika hajtja és fejlődésük egy utolsó zárt fluxusfelületre központosított 2D tartományon van modellezve. A HESEL kiszámolja a plazma-sűrűség, az ionhőmérséklet, az elektrónhőmérséklet és az általános vorticitást. A HESEL számítási tartománya két részre van osztva: a zárt erővonalakkal jellemzett összetartott régió, és a nyílt erővonalakkal jellemzett SOL. A nyílt erővonalak a plazmát határoló felületekkel csatoltak [16].

A semleges atomok és molekulák nyalábevolúcióra gyakorolt hatásának demonstrálására az nHESEL turbulencia modell eredményeit alkalmaztam, ami a HESEL-nek egy semleges atomokat kezelő tovább fejlesztése [17].

A HESEL és nHESEL plazma határréteg turbulencia kódokat RENATE-hez csatoltam, ahol ezek a BES szintetikus diagnosztika számára időben változó 2D sűrűség- és hőmérsékletmezőket szolgáltak bemenetként a nyalábevolúciós számoláshoz.

Validációs célra alkalmazott statisztikus eszközök

A munkám szignifikáns részét a HESEL-ből származtatott szintetikus BES jelek és mérési eredmények összehasonlítása és ezzel a turbulencia modell validálása tette ki. A következő szintetikus és kísérleti jeleket jellemző statisztikai eszközöket alkalmaztam a validációs eljárás során:

- **Autospektrum** a jel Fourier-transzformáltjának abszolútérték-négyzete, ami meghatározza az egyes frekvenciakomponensek teljesítményét.
- **Ferdeség és Lapultság** az időjel magasabb momentumai, amik meghatározzák a jel amplitúdóeloszlásának szimmetrikus jellegét illetve csúcsosságát [3].
- **Eseményazonosítás** a jelben egy lokális csúcspot azonosító és kivágó eljárás [3]. Az így talált eseményeken további statisztikai elemzéseket hajtottam végre, mint eseményfrekvencia és eseményamplitúdó-eloszlás meghatározása.

Klasszikus trajektória Monte Carlo eljárás

A klasszikus trajektória Monte Carlo (CTMC) egy nem-perturbatív eljárás ami klasszikusan közelíti meg a részecskék ütközését. Az eljárás kiszámolja a lehetséges ütközési végeredmények valószínűségét, amelyből ütközési hatáskeresztmetszetet származtat. A CTMC eljárást, amit alkalmaztam, Tótkési Károly fejlesztette ATOMKI Debrecenben. A jelen munkában egy négytest közelítésben lett a semleges atom semleges részecskével való ütközése modellezve. Az ütköző testekre egy Coulomb-potenciál hat, mozgásukat nem-relativisztikus newtoni mozgásegyenletek írják le [18].

Irodalom

- [1]. J.D. Lawson, „Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor” Proceedings of the Physical Society. Section B **70** (1), p. 6-10 (1957), DOI: <https://doi.org/10.1088%2F0370-1301%2F70%2F1%2F303>
- [2]. J. Wesson „Tokamaks, fourth edition”, Oxford University Press (2011)
- [3]. D. A. D’Ippolito, J. R. Myra, and S. J. Zweben, „Convective transport by intermittent blob-filaments: Comparison of theory and experiment” Physics of Plasmas **18** (6) p.060501 (2011), DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3594609>
- [4]. D. M. Thomas, G. R. McKee, K. H. Burrell, F. Levinton, E. L. Foley, R. K. Fisher, „Chapter 6: Active Spectroscopy”, Fusion Science and Technology **53** (2), p.487-527 (2008), DOI: <https://doi.org/10.13182/FST08-A1678>
- [5]. M. Willensdorfer, G. Birkenmeier, R. Fischer, F M Laggner, E Wolfrum, G Veres, F Aumayr, D Carralero, L Guimaraes, B Kurzan, ASDEX Upgrade Team, „Characterization of the Li-BES at ASDEX Upgrade”, Plasma Physics and Controlled Fusion **56** (2), p. 025008 (2014) DOI: <https://doi.org/10.1088%2F0741-3335%2F56%2F2%2F025008>
- [6]. D. Guszejnov, G.I. Pokol, I. Pusztai, D.I. Refy, S. Zoletnik, M. Lampert, Y.U. Nam, „Three-dimensional modeling of beam emission spectroscopy measurements in fusion plasmas” Review of Scientific Instruments **83** (11), p. 113501 (2012) DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4764564>
- [7]. M. Von Hellermann, M. De Bock, O. Marchuk, D. Reiter S. Serov and M. Walsh, „Simulation of Spectra Code (SOS) for ITER Active Beam Spectroscopy,” Atoms **7** (1), p. 30 (2019), DOI: <https://www.mdpi.com/2218-2004/7/1/30>
- [8]. M. Carr, A. Meakins, M. Bernert, P. David, C. Giroud, J. Harrison, S. Henderson, B. Lipschultz, F. Reimold, EUROfusion MST1 Team, and ASDEX Upgrade Team, „Description of complex viewing geometries of fusion tomography diagnostics by ray-tracing” Review of Scientific Instruments, vol. **89** (8), p. 083506 (2018), DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5031087>
- [9]. M.F.J. Fox, A.R. Field, F. Van Wyk, Y.c. Ghim, A.A. Schekochihin, MAST Team, „Experimental determination of the correlation properties of plasma turbulence using 2D BES systems”, Plasma Physics and Controlled Fusion **59** (4), p. 044008 (2017), DOI: <https://doi.org/10.1088%2F1361-6587%2Faa51fd>
- [10]. M.W. Shafer, R.J. Fonck, G.R. McKee, D.J. Schlossberg, „Spatial transfer function for the beam emission spectroscopy diagnostic on DIII-D”, Review of Scientific Instruments **77** (10) p. 10F110 (2006). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2221908>
- [11]. J. Vicente, T. Ribeiro, F. Da Silva, S. Heurax, G.D. Conway, B. Scott, C. Silva, „2D full-wave simulations of conventional reflectometry using 3D gyro-fluid plasma turbulence”, Plasma Physics and Controlled Fusion **62** (2) 025031 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab5fa8>
- [12]. D.P. Stotler, S. Ku, S.J. Zweben, C.S. Chang, R.M. Churchill, J.L. Terry, „Examination of synthetic gas puff imaging diagnostic data from a gyrokinetic turbulence code”, Physics of Plasmas **27** (6) p. 062512 (2020), DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0002876>

- [13]. D.P. Stotler, J. Lang, C. Chang, R.M. Churchill, S. Ku, „Neutral recycling effects on ITG turbulence”, *Nuclear Fusion* **57** (8), p. 086028 (2017), DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa7807>
- [14]. X. Wu, G.S. Xu, N. Yan, R. Chen, L. Wang, B. Wan, „Effects of recycling neutral on density shoulder formation in tokamak plasmas”, *Nuclear Fusion* **62** (3), p. 036013 (2022), DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac3a1c>
- [15]. D. Dunai, S. Zoletnik, J. Sárközi, A.R. Field, „Avalanche photodiode based detector for beam emission spectroscopy”, *Review of Scientific Instruments* **81** (10), p. 103503 (2010), DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3488458>
- [16]. A.S. Thrysoe, L.E.H Tophoj, V. Naulin, J.J. Rasmussen, J. Madsen, A.H. Nielsen, „The influence of blobs on neutral particles in the scrape-off layer”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **58** (4), p. 044010 (2016) DOI: <https://doi.org/10.1088%2F0741-3335%2F58%2F4%2F044010>
- [17]. A.H. Nielsen, J.J. Rasmussen, J. Madsen, G.S. Xu, V. Naulin, J.M.B. Olsen, M. Loiten, S.K. Hansen, N. Yan, L. Tophoj, B.N. Wan, „Numerical simulations of blobs with ion dynamics”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **59** (2), p. 025012 (2017), DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6587/59/2/025012>
- [18]. K. Tokesi, R. DuBois, T. Mukoyama, „Interaction of positronium with helium atoms — the classical treatment of the 5-body collision system”, *European Physics Journal D* **68**, p. 255, (2014), DOI: <https://link.springer.com/article/10.1140/epjd/e2014-40800-9>

Új tudományos eredmények

A BES szintetikus diagnosztikák fejlesztése és alkalmazása során elért új tudományos eredményeket a következő tézispontokban ismertetem:

- T 1.** Nyalábemissziós spektroszkópia (BES) diagnosztikára fluktuációs válasz számolást fejlesztettem figyelembe véve az összes lokalizációval kapcsolatos effektust. A módszer mértéket ad a detektált fotonáram-fluktuációkat eredményező plazmasűrűség fluktuációk térbeli lokalizációjára. Az eljárás egy fluktuáció-válaszfüggvényt generál, kiszámolva a diagnosztika fényválaszát különböző kis méretű, lokalizált, erővonal mentén elnyújtott sűrűség- és hőmérséklet-perturbációkra [P9]. Az eljárást sikeresen demonstráltam és alkalmaztam az EAST DBES és LiBES [P3] diagnosztikák tervezésében illetve kísérleti mérések interpretálására a JET LiBES megfigyelési geometriáján [P7].
- T 2.** Egy átfogó módszertant fejlesztettem nyalábemissziós spektroszkópai diagnosztikák képességeinek felmérésére, optimalizációjára, kiemelten fókuszálva a térbeli felbontás, behatolási mélység, jel-háttér arány, jel-zaj arány és megfigyelési geometria pozíciója közötti kompromisszumok feloldására. A W7-X ABES nyalábanyagát és ideális megfigyelési geometriáját határoztam meg emisszióelkenés és fluktuációválasz alkalmazásával, amely lehetővé tette a térbeli felbontás és nyaláb penetráció közötti kompromisszum feloldását [P4]. Az ITER pedesztál és plazmaközépi BES rendszereire alkalmaztam a RENATE és Simulation of Spectra szintetikus diagnosztikákat, és az optikai szűrőket optimalizálva kapcsolatot teremttem az egyes rendszerek jel-zaj és jel-háttér hányadai között, így lehetővé tettem ezen mennyiségek közötti kompromisszum navigálását [P8]. Eljárást fejlesztettem a JT-60SA tokamakra ajánlott BES rendszerek ideális megfigyelési geometriájának meghatározására. Az eljárás a fluktuációérzékeny felületek minimalizálására törekszik figyelembe véve a nyaláb és mágneses geometriát, egyben lehetővé téve a radiális és vertikális felbontások közötti kompromisszum navigálását [P1, P2].
- T 3.** Új nyalábemissziós spektroszkópia szintetikus diagnosztikát fejlesztettem alapvető plazmafizikai modellekre alapuló szimulációs kódok tanulmányozására és validálására. A szintetikus diagnosztika részletesen modellezni az összes releváns, mérést befolyásoló BES mérési effektust. Ezek közé tartoznak az emisszió térbeli elkenését befolyásoló jelenségek illetve a jelet terhelő zajforrások. A 2D HESEL multi-folyadék turbulencia kódot csatoltam a szintetikus diagnosztikához és megállapítottam az egyes mérési artefaktumok turbulencia jellemzésére gyakorolt hatását. Sikeres validációt hajtottam végre a HESEL-en alapuló BES szintetikus mérések és az ezeknek megfelelő ASDEX-Upgrade tokamakokon végzett kísérleti mérések között [P5, P10]. Végül alkalmaztam a szintetikus diagnosztikát az ITER pedesztál rendszerre demonstrálva SOL filamentumokat detektáló képességét [P8].

T 4. Kiterjesztettem a RENATE szintetikus diagnosztika által alkalmazott ütközési-sugárzási modellt plazmaszéli semleges atomok és molekulák semleges nyalábatomokkal való ütközésének figyelembevételével. Az ütközési-sugárzási modellben semleges-semleges ütközéses fel- és legerjesztést illetve ionizációt vettem figyelembe. Validáltam a klasszikus trajektória Monte Carlo módszert a nyalábemissziós spektroszkópiában releváns hatáskeresztmetszetek generálására összehasonlítva a generált ionizációs hatáskeresztmetszeteket irodalomban meglévővel [P6]. Becslést adtam a határretegplazma és nyalábvezető semleges populációin elszenvedett nyalábvesztésekre [P6]. Az nHESEL 2D plazmaszéli semlegeseket figyelembe vevő turbulencia kódot csatolva, demonstráltam, hogy a határreteg plazmában a nyalábemisszió szignifikáns hányada a semlegesekkel való ütközésből származik illetve a BES által megfigyelt turbulencia dinamikáját a távoli SOL-ban a semleges gáz dinamikája dominálja hasonló plazma és semleges gáz sűrűség mellett [P11].

Tézispontokat alátámasztó folyóirat publikációk:

- [P1]. **O. Asztalos**, G.I. Pokol, D. Dunai, G. Boguszlavszkij, A. Kovacsik, M.G.v. Hellermann, K. Kamiya, T. Suzuki, A. Kojima „Feasibility study on the JT-60SA tokamak beam emission spectroscopy diagnostics” *Fusion Engineering and Design*, Vol. **123**, p 861-864 (2017). [K2] DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.03.125>
- [P2]. G. Giruzzi, M. Yoshida, J.F. Artaud, **O. Asztalos**, E. Barbato, P. Bettini, A. Bierwage, A. Boboc, T. Bolzonella, S. Clement-Lorenzo, S. Coda, N. Cruz, Chr. Day, G. De Tommasi, M. Dibon, D. Douai, D. Dunai, M. Enoeda, D. Farina, L. Figini, M. Fukumoto, K. Galazka, J. Galdon, J. Garcia, M. Garcia-Muñoz, L. Garzotti, C. Gil, C. Gleason-Gonzalez, T. Goodman, G. Granucci, N. Hayashi, K. Hoshino, S. Ide, R. Imazawa, P. Innocente, A. Isayama, K. Itami, E. Joffrin, Y. Kamada, K. Kamiya, Y. Kawano, H. Kawashima, T. Kobayashi, A. Kojima, H. Kubo, P. Lang, Ph. Lauber, E. de la Luna, P. Maget, G. Marchiori, S. Mastrostefano, G. Matsunaga, M. Mattei, D.C. McDonald, A. Mele, Y. Miyata, S. Moriyama, A. Moro, T. Nakano, R. Neu, S. Nowak, F.P. Orsitto, G. Pautasso, B. Pégourié, L. Pigatto, A. Pironti, P. Platania, G.I. Pokol, D. Ricci, M. Romanelli, S. Saarelma, S. Sakurai, F. Sartori, H. Sasao, M. Scannapiego, K. Shimizu, K. Shinohara, J. Shiraishi, S. Soare, C. Sozzi, W. Stepniewski, T. Suzuki, Y. Suzuki, T. Szepesi, M. Takechi, K. Tanaka, D. Terranova, M. Toma, H. Urano, J. Vega, F. Villone, V. Vitale, T. Wakatsuki, M. Wischmeier and R. Zagórski, „Physics and operation oriented activities in preparation of the JT-60SA tokamak exploitation”, *Nuclear Fusion*, Vol. **57**, p 085001 (2017). [K2] DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa7962>
- [P3]. S. Zoletnik, G. H. Hu, B. Tál, D. Dunai, G. Anda, **O. Asztalos**, G. I. Pokol, S. Kálvin, J. Németh, and T. Krizsanóczy, „Ultrafast two-dimensional lithium beam emission spectroscopy diagnostic on the EAST tokamak” *Review of Scientific Instruments*, Vol. **89**, p 063503 (2018). [K1] DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5017224>
- [P4]. S. Zoletnik, G. Anda, M. Aradi, **O. Asztalos**, S. Bató, A. Bencze, M. Berta, G. Demeter, D. Dunai, P. Hacek, S. Hegedűs, G. H. Hu, T. Krizsanóczy, M. Lampert, D. Nagy, J. Németh, M. Otte, G. Petravich, G. I. Pokol, D. Réfy, B. Tál, M. Vécsei, and W7-X Team „Advanced neutral alkali beam diagnostics for applications in fusion research (invited)”, *Review of Scientific Instruments*, Vol. **89**, 10D107 (2018). [K1] DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5039309>
- [P5]. A.H. Nielsen, **O. Asztalos**, J. Olsen, V. Naulin, J. Juul Rasmussen, A.S. Thrysøe, T. Eich, G.I. Pokol, N. Vianello, R. Coelho, D.I. Refy, B. Tal, A. Buzas, G.H. Hu, N. Yan, EUROfusion MST1 Team, EUROfusion-IM Team and ASDEX Upgrade Team „Synthetic edge and scrape-off layer diagnostics - a bridge between experiments and theory” *Nuclear Fusion*, Vol. **59**, p 086059 (2019). [K2] DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1954>
- [P6]. **O. Asztalos**, B. Szondy, K. Tőkési and G. I. Pokol, „The modeling of atom – neutral collisions for beam emission spectroscopy applications” *The European Physical Journal D*, Vol. **73**, p 116 (2019). [K1] DOI: <https://doi.org/10.1140/epjd/e2019-90690-2>
- [P7]. D.I. Réfy, E.R. Solano, N. Vianello, S. Zoletnik, D. Dunai, B. Tál, M. Brix, R. Gomes, G. Birkenmeier, E. Wolfrum, F. Laggnier, M. Griener, **O. Asztalos**, E. Delabie, ASDEX Upgrade team, JET Contributors and EUROfusion MST1 „Identity of the JET M-mode and the ASDEX

Upgrade I-phase phenomena” *Nuclear Fusion*, Vol. **60**, p 056004 (2020). [K2] DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab7594>

[P8]. S. Zoletnik, **O. Asztalos**, M. Bandyopadhyay, P. Bharathi, M. de Bock, O. Ford, M. G. von Hellermann, D. W. Johnson, J. Ko, S. Menmuir, Ph. Mertens, A. H. Nielsen, G. I. Pokol, S. V. Serov, M. J. Singh, S. N. Tugarinov, G. L. Vyas „Progress in ITER diagnostics, Active spectroscopy” *Nuclear Fusion*, **to be submitted** (2022). [K2]

Tézispontokat alátámasztó konferencia kiadványok:

[P9]. **O. Asztalos**, G.I Pokol, S. Zoletnik, D. Guszejnov, G. Hu, R. Chen and G. Xu, “Fluctuation response analysis of plasma turbulence with BES diagnostics” in 44th EPS Conference on Plasma Physics, European Physical Society (EPS), *ECA* Vol. **41F**, P4.109, 1 2017. Link: <http://ocs.ciemat.es/EPS2017PAP/pdf/P4.109.pdf>

[P10]. **O. Asztalos**, A.H. Nielsen, I. Andorfi, D. Dunai, S. Zoletnik, D.I. Refy, B. Tál, G. Birkenmeier, R. Coelho, G.I. Pokol, EU-IM Team*, EUROfusion-MST1 Team**, ASDEX Upgrade Team*** “Study of filament dynamics using synthetic and experimental BES diagnostics” in 47th EPS Conference on Plasma Physics, European Physical Society (EPS), *ECA* Vol. **45A**, P3.1072, 1 2021. Link: <http://ocs.ciemat.es/EPS2021PAP/pdf/P3.1072.pdf>

[P11]. **O. Asztalos**, P. Balazs, A. Nielsen, K. Tókési, A. Thrysoe, M. Vecsei, and G. Pokol, “Possibility for neutral density measurements with beam emission spectroscopy” in 48th EPS Conference on Plasma Physics, EPS 2022, European Physical Society (EPS), **accepted**, 6 2022.

További, tézispontokhoz nem kapcsolódó publikációk:

[P12]. E. Joffrin, ... **O. Asztalos**, ...” Overview of the JET preparation for deuterium-tritium operation with the ITER like-wall” *Nuclear Fusion*, Vol. **59**, p 112021 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab2276>

[P13]. S.J. Al Atawneh, **O. Asztalos**, B. Szondy, G.I. Pokol and K. Tókési, “Ionization Cross Sections in the Collision between Two Ground State Hydrogen Atoms at Low Energies” *Atoms*, Vol. **8**, p. 31 (2020). DOI: <https://doi.org/10.3390/atoms8020031>

[P14]. M. Vécsei, G. Anda, **O. Asztalos**, D. Dunai, S. Hegedűs, D. Nagy, M. Otte, G. I. Pokol, S. Zoletnik, and W7-X Team “Swift evaluation of electron density profiles obtained by the alkali beam emission spectroscopy technique using linearized reconstruction” *Review of Scientific Instruments*, Vol. **92**, 113501 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0057158>

[P15]. D. I. Réfy, G.I. Pokol, D. Dunai, M. Lampert, S. Zoletnik, **Ö. Asztalos**, D. Guszejnov, “Spatial resolution modelling of various beam emission spectroscopy experiments” in 41th EPS Conference on Plasma Physics, European Physical Society (EPS), *ECA* Vol. **38F**, P5.055, 1 (2014). Link: <http://ocs.ciemat.es/EPS2014PAP/pdf/P5.055.pdf>

[P16]. Vécsei M., Anda G., **Asztalos O.**, Bozhenkov S., Cseh G., Dunai D., Hegedus S., König R., Nagy D., Otte M., Pokol G.I., Tál B., Zoletnik S., “Edge density profile and turbulence measurements with an alkali beam diagnostic on Wendelstein 7-X” in 45th EPS Conference

- on Plasma Physics, European Physical Society (EPS), *ECA* Vol. **42A**, P5.1002, 1 (2018). Link: <http://ocs.ciemat.es/EPS2018ABS/pdf/P5.1002.pdf>
- [P17]. A.H. Nielsen, **O. Asztalos**, J. Olsen, V. Naulin, J. Juul Rasmussen, A.S. Thrysøe, T. Eich, G.I. Pokol, N. Vianello, R. Coelho, D.I. Refy, B. Tal, G.H. Hu, N. Yan, EUROfusion MST1 Team, EUROfusion-IM Team „Synthetic edge and SOL diagnostics - a bridge between experiments and theory”, IAEA-TH/P7-4 (2018) Link: <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Shared%20Documents/FEC%202018/fec2018-preprints/preprint0194.pdf>
- [P18]. M. Vécsei, G. Anda, **O. Asztalos**, K.J. Brunner, D. Dunai, M. Hirsch, U. Höfe, J. Knauer, M. Otte, G. I. Pokol, S. Zoletnik and the W7-X team, “Analysis of density profiles inside magnetic islands with Alkali Beam Emission Spectroscopy at Wendelstein 7-X”, n 46th EPS Conference on Plasma Physics, European Physical Society (EPS), *ECA* Vol. **43C**, P4.1021, 1 (2019). Link: <http://ocs.ciemat.es/EPS2019PAP/pdf/P4.1021.pdf>
- [P19]. M. Vécsei, G. Anda, **O. Asztalos**, D. Dunai, S. Hegedus, M. Otte, G. I. Pokol, S. Zoletnik and the W7-X team “Analysis of divertor island properties at Wendelstein 7-X using Alkali Beam Emission Spectroscopy” in 47th EPS Conference on Plasma Physics, European Physical Society (EPS), *ECA* Vol. **45A**, P4.1081, 1 (2021). Link: <http://ocs.ciemat.es/EPS2018ABS/pdf/P5.1002.pdf>
- [P20]. G.I. Pokol, O. Asztalos, P. Balazs, B. Szondy, M. von Hellerman, C. Hill, O. Marchuk, M. O’Mullane, P.Zs. Poloskei, J. Varje, M. Tomes, K. Tokesi “Neutral Beam Penetration and Photoemission Benchmark” in 47th EPS Conference on Plasma Physics, European Physical Society (EPS), *ECA* Vol. **45A**, P1.1007 1 (2021). Link: <http://ocs.ciemat.es/EPS2021ABS/pdf/P1.1007.pdf>