

# A COMPASS tokamakra építendő atomnyaláb diagnosztika tervezésének támogatása szimulációk segítségével

Guszejnov Dávid<sup>1</sup>, Pokol Gergő<sup>1</sup>, Réfy Dániel<sup>1</sup>,  
Anda Gábor<sup>2</sup>, Petravich Gábor<sup>2</sup>, Dunai Dániel<sup>2</sup>, Pusztai István<sup>3</sup>

<sup>1</sup>BME NTI, EURATOM Association  
1521 Budapest, Pf. 91.

<sup>2</sup>MTA KFKI-RMKI, EURATOM Association  
1525 Budapest, Pf. 49.

<sup>3</sup>Chalmers University of Technology, EURATOM-VR Association  
SE-412 96 Göteborg

A COMPASS tokamakot 2008-ban az angliai Culhamből Prágába szállították, ahol a plazmaszéli fizikai folyamatokat fogják részletesen tanulmányozni, amire bevált eszköz az atomnyaláb diagnosztika. Jelen cikk a COMPASS tokamakra épülő atomnyaláb diagnosztika tervezésének néhány elemével foglalkozik, amelyekhez felhasználtuk a BME NTI által kifejlesztett RENATE szimulációs kódot. A kód alkalmasnak bizonyult a diagnosztika megfigyelési tartományának kijelölésére, és az ehhez szükséges felbontás megbecslésére, továbbá az egyes megfigyelési konfigurációk esetén optimális zaj/jel arányú detektortípusok megkeresésére is. A továbbiakban ezen tervezési részfeladatokat fogjuk részletesebben bemutatni, és rajtuk demonstrálni a programnak a hasonló feladatok megoldásához való alkalmazhatóságát.

## 1. Bevezetés

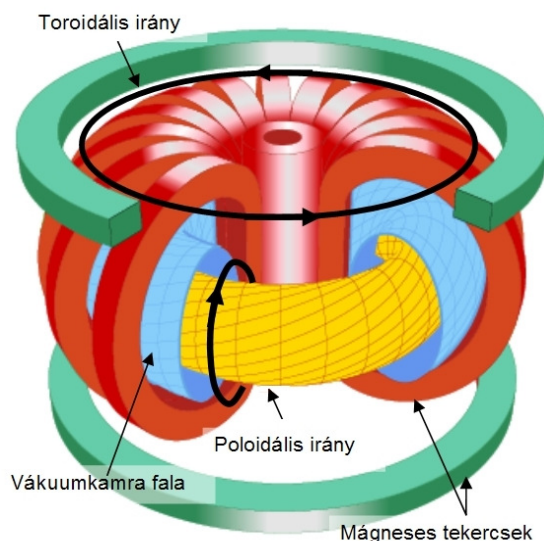
A jövőbeli fúziós energiatermeléshez pillanatnyilag legígéretesebb berendezések, a tokamakok (1. ábra). A tokamak szó az orosz *токамак* latin átírata, amely a *тороидальная камера в магнитных катушках* (toroidálnaja kamera v magnyitnih katuskah) kifejezésből származik (magyarul: tóruszkamra mágneses tekercselésben). Ezek olyan tórusz alakú szerkezetek, amelyekben külső mágneses tekercsek, és a plazmában indukált nagy plazmaáram (~100 kA) által elért csavarvonal alakú mágneses erőter segítségével tartják össze az ionizált részecskékből és elektronokból álló plazmát [1].

Az első pozitív energiamérleget megvalósító fúziós berendezés a Franciaországban épülő ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) lesz [2], a rajta végzett kísérletek és mérések alapját fogják képezni az első fúziós erőműnek, a DEMO-nak (Demonstration Power Plant), amit 2030 körül terveznek megépíteni. Az ITER-hez hasonló méretű fúziós berendezést korábban nem építettek, így annak viselkedését a kisebb tokamakokon végzett mérések alapján felállított empirikus skálátörvények alapján lehet csak megjósolni. Többek között emiatt fontos a vizsgálataink tárgyát képező COMPASS (COMPact ASSEMBly) tokamak, hisz az a legkisebb, ITER-szerű geometriával rendelkező tokamak.

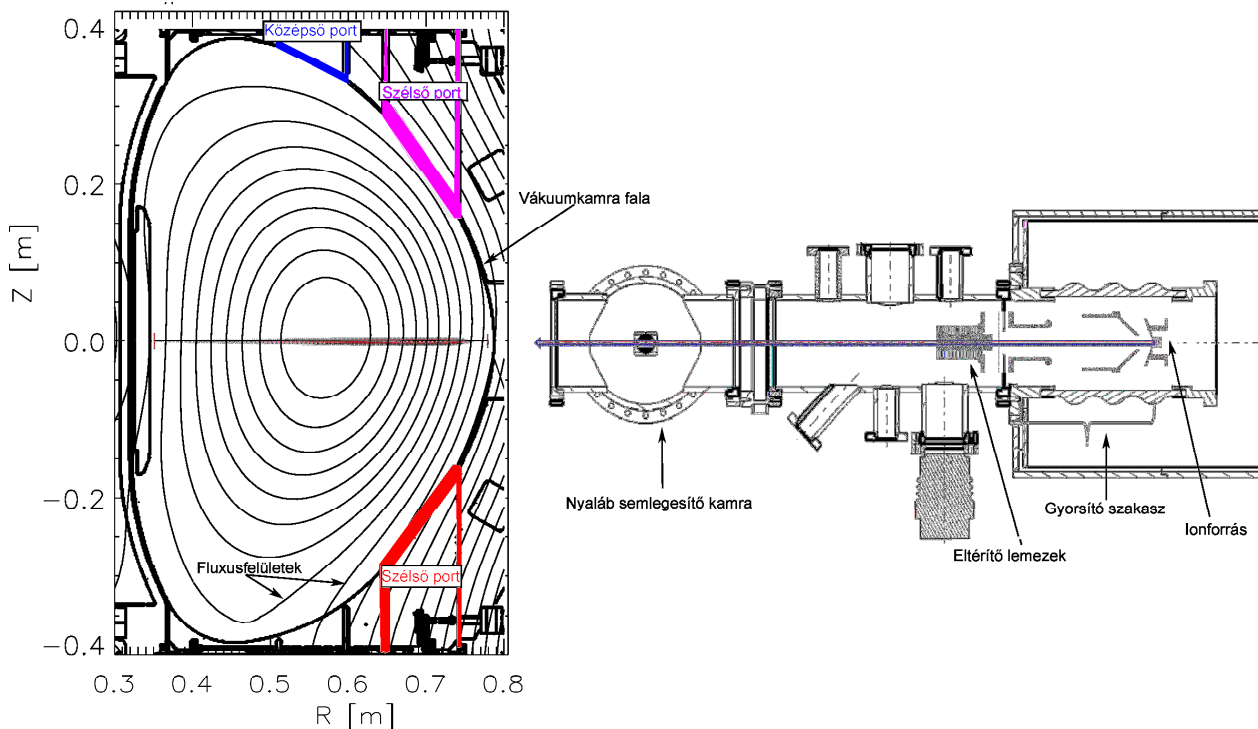
A COMPASS tokamakot 2008-ban Prágába szállították, ahol felújítása után többek között plazmaszéli folyamatok tanulmányozására fogják használni [3]. Ezen folyamatok vizsgálatára alkalmas az az atomnyaláb diagnosztika rendszer, amelynek tervezését a KFKI RMKI a BME NTI-vel együttműködve végzi.

## Atomnyaláb diagnosztika

Mivel a fúziós berendezésekben lévő plazma rendkívül magas hőmérsékletű (keV nagyságrendű energiájúak a részecskék), ezért lényegében lehetetlen a hagyományos módokon méréseket végezni benne, helyette különleges eljárásokat kell alkalmazni. Ezek egyik csoportját az atomnyaláb diagnosztikák képezik, amelyekből a COMPASS tokamakra egy kétféleképpen használható rendszert is terveznek.



1. ábra: Tokamak vázlatos felépítése és a toroidális geometria irányai



2. ábra: BES diagnosztikai nyaláb belövése a COMPASS tokamakra

Az egyik az atomnyaláb emissziós spektroszkópia (BES, Beam Emission Spectroscopy). Ennek lényege, hogy egy nagyenergiájú semleges részecskékből álló nyalábot lőnek a plazmába, amelyek ott a plazmarészecskékkal való kölcsönhatások során gerjesztődnek, és karakterisztikus hullámhosszon fotonokat bocsátanak ki. A megfigyelőrendszer – az optikai szűrő által meghatározott hullámhosszon – az emittált intenzitás nyalábmenti eloszlását méri. A megfigyelés általában párhuzamosan történik egy lassú (~50 Hz) és egy gyors mintavételezésű (~1 MHz) detektorsorral. Az előbbi a nyalábmenti ~20ms-re átlagolt intenzitáseloszlást, azaz a *fényprofil*t méri. A fényprofilból lehet következtetni egy elektronívó lokális populációjára, amiből visszaszámolható többek között adott helyen a plazma pillanatnyi sűrűsége [4]. Az utóbbi, gyors mintavételezésű detektorsor segítségével a plazmában zajló sűrűségfluktuációk figyelhetőek meg.

A semleges diagnosztikai nyalábot úgy állítják elő, hogy egy termikus ionforrásból származó, elektrosztatikus térrel felgyorsított ionnyalábot keresztülőnek egy semlegesítőn, ahol nátriumot párologtatnak el. Az ionok töltéscserés reakciókkal elektronokat szednek fel a nátrium atomokról, így semlegesítődnek (2. ábra). A nyaláb anyagaként általában alkálifémeket (Li és Na) szokás használni, mivel csupán egy vegyértékelektronjuk van, így lehet élni azzal a közelítéssel, hogy a gerjesztés és ionizációs folyamatokban csupán ez vesz részt, így csak ennek az elektronnak a nívóit szükséges figyelembe venni.

A másik nyalábdiaosztika az atomnyaláb szonda, avagy ABP (Atomic Beam Probe) [5]. Működésének alapja, hogy a plazmába belőtt semleges atomok előbb-utóbb ionizálódnak, így már rájuk is hatni fog a plazmát összetartó mágneses tér. A keletkezett ionok – a nyaláb energiájától, az ionizáció helyétől és a plazmaparaméterektől függő – karakterisztikus pályára fognak állni. Ezen pályák kiindulópontjainak

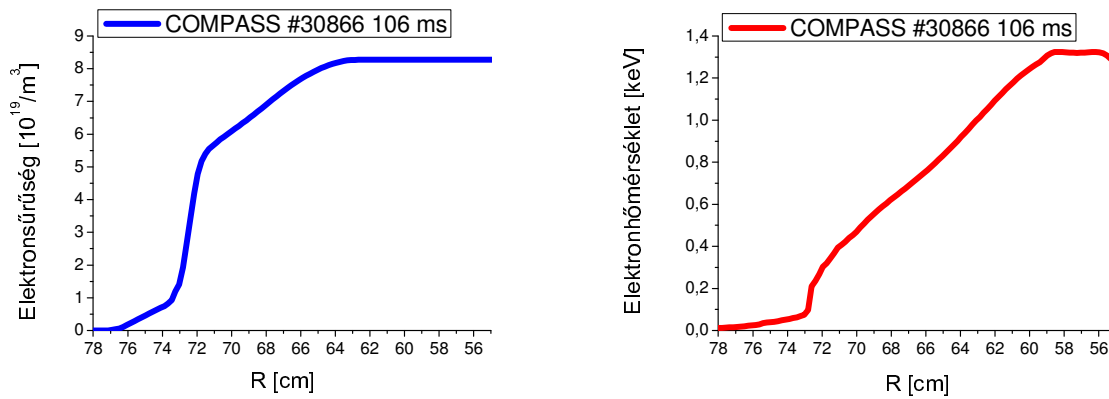
eloszlása függ a plazma sűrűségprofiljától, viszont a pálya maga csak a pályamenti mágneses tértől függ, így a vákuumkamra falán lévő – poloidális-toroidális rácsban elrendezett – detektorokra jutó nyalábionok áramaiból elméletileg lehet következtetni a plazmában végbemenő sűrűség és áramfluktuációkra (1. ábra). A poloidális mágneses tér okozta toroidális eltérések mm nagyságrendűek, ezért csak kis átmérőjű nyalábokkal (<5 mm) lehet a mérést végezni.

Mivel a két diagnosztika a plazma és a diagnosztikai nyaláb kölcsönhatásainak két, független megfigyelése, melyek nem zavarják egymást, így kellően vékony diagnosztikai nyalábok használata esetén lehetséges párhuzamos üzemeltetni őket, ezt *ABP kompatibilis üzemmódnak* nevezzük.

### COMPASS atomnyaláb diagnosztikák elrendezése

A plazmát a vákuumkamrában hozzák létre, melyen az egyes diagnosztikai berendezések számára nyílások, ún. *portok* lettek kialakítva (2. ábra). Az ábra bal szélén látható a COMPASS poloidális metszete, amin fel vannak tüntetve a mágneses erővonalak által alkotott ún. fluxusfelületek metszetei is, melyek a plazma izobár felületei.

A tervezés során a COMPASS BES és ABP megfigyelőrendszereinek elhelyezésére két lehetséges elrendezés merült fel. Az eredeti tervek szerint a nyaláb belövése a középső porton történne, az ABP a felső szélső portba, továbbá mindkét BES megfigyelés pedig a középső kisportba kerülne. A tervezés során felmerült annak a lehetősége, hogy a BES diagnosztikát egy másik poloidális síkba szereljék fel, ahol az alsó szélső port is szabad. Ekkor a gyors mintavételezésű megfigyelés az alsó szélső portból történne, míg a belövés és az ABP helyzete az előző elrendezésben leírt maradna.

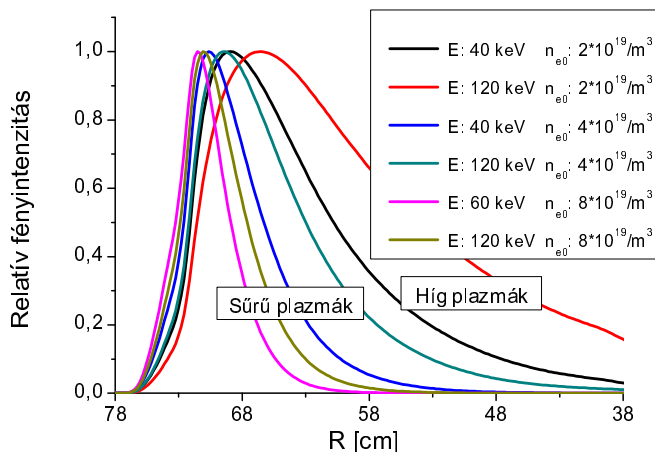


3. ábra: Szimulációhoz használt sűrűség és hőmérséklet profilok [8] (a profilban az effektív rendszám 1,7, az átlagos szennyező töltése 5)

### RENATE szimulációs kód

Vizsgálatainkhoz aktívan használtuk a BME NTI-ben készített RENATE (Rate Equations for Neutral Alkali-beam TEchnique) szimulációs kódot, ami egy moduláris felépítésű IDL (Interactive Data Language) nyelven írt program, ami lehetővé teszi különböző fúziós berendezések BES diagnosztikai méréseinek szimulációját és korrekcióját [6] [7].

A program az ún. ütközési-sugárzási modellt alkalmazza, aminek lényege, hogy az atomi nívók betöltöttségét az elemi atomfizikai folyamatokat figyelve követi. A szimuláció a nyalábot alkotó atomokat hidrogénszerűnek tekinti, azaz csak a vegyértékelektront kíséri figyelemmel, és annak a különböző nívóihoz tartozó populációkat számítja ki térben és időben.



4. ábra: Néhány, a COMPASS tokamakra szimulált fényprofil középsík porton vízszintesen belőtt Li nyaláb esetén (E: nyalábergia,  $n_{e0}$ : központi elektronsűrűség)

A plazmarészecskékkal való ütközés során több olyan esemény is történhet, ami a nívók betöltöttségét módosíthatja. Nívók közötti elektronátmenet okoz az ütközéses felgerjesztődés, legerjesztődés és a spontán legerjesztődés, illetve ionizációhoz (ezzel a nyalábból való kiszóródáshoz) vezetnek az ütközéses ionizáció és a töltéscserés folyamatok is. A RENATE saját atomfizikai kernelje segítségével kiszámítja ezen reakciók mindegyikére a rátaegyütthatókat, amelyek segítségével az egyes nívók populációjának nyalábmenti változása egy differenciálegyenlet-rendszer megoldásával nyomon követhető. A program a számítások

során a vegyértékelektronnak csak véges számú állapotát veszi figyelembe (Li esetén 9-et, Na esetén 8-at, H és D esetén pedig 6-ot), mivel a magas főkvantumszámú nívók betöltöttsége általában nagyságrendekkel kisebb, mint az alacsonyabbaké, ezért elhanyagolásuk nem okoz lényeges hibát.

Ezen egyenletrendszert a RENATE adott számú pontra numerikusan megoldja, majd a nyalábparamétereket és a megfigyelt spontán átmenet Einstein-együtthatóját figyelembe véve kiintegrálja az egyes detektorok által megfigyelt nyalábszakaszokra a foton-emisszió gyakoriságát, így kiszámítva az emisszió térbeli eloszlását. Ezen eredményeket a megfigyelésből eredő geometriai faktorokkal korrigálva megállapítja az adott látóvonalak mentén a megfigyelő-rendszer belépő apertúráját elérő fotonáramot. Ezt az egyes detektorokhoz tartozó megfigyelési hatásokkal való szorzás után kapjuk a detektált fotonáramot az azok által látott nyalábszakaszokra.

### Fényprofilok vizsgálata

A COMPASS BES diagnosztikájának tervezése során a RENATE-t először a diagnosztika által megfigyelendő tartomány kijelöléséhez használtuk fel. Ehhez a COMPASS-D tokamak #30866 kisülésének plazmaparaméter profiljait (3. ábra) [8] [9], és a sűrűségprofil konstans faktoralatt skálázott változatait felhasználva, a jövőbeli lehetséges plazma és nyalábparaméterek esetére szimuláltuk a fényprofilokat.

Az így kapott fényprofilok (4. ábra) alapján megállapítható, hogy a leghígabb plazmák esetét leszámítva a belövéstől számított 20 cm után a nyalábmenti emisszió már elhanyagolhatóvá válik. Mivel a COMPASS nagyrészt H-módban fog üzemelni, tehát sűrűbb plazmákkal, ezért a diagnosztikának elégséges a nyaláb ezen szakaszát megfigyelnie. Ez a szakasz gyakorlatilag a COMPASS kissugarának felel meg.

Az

$$L = \frac{v_{nyaláb}}{R}$$

képlet alapján a nyalábsebességből és a megfigyelt spontán átmenet Einstein-együtthatójából kiszámítható egy, a nyalábra jellemző karakterisztikus úthossz, ami megadja, hogy mekkora az a legkisebb szakasz, amin az emisszió lényegesen változni tud.

Mind Li, mind Na nyalábok esetén a vizsgált paramétertartományokban  $L$  az 1-5 cm-es tartományba esik, ami alapján egy becslés adható a sűrűségfluktuációs mérések során a diagnosztika által használandó felbontásra, miszerint ekkor elégséges a nyalábot centiméterenkénti felbontásban megfigyelni.

Ennek figyelembe vételével, a RENATE kód segítségével, arra jutottunk, hogy a nyaláb belövéstől számított első 20 cm-ét 20 detektorra érdemes leképezni a gyors mintavételezésű BES megfigyelő-rendszernek.

## A RENATE direkt szimulációinak mért adatokkal való összehasonlítása

A RENATE fényprofilokat számoló modulja már korábban közvetve validálva lett a SIMULA kód [8] segítségével, azonban vizsgálataink során felmerült az igény a megfigyelőrendszer által detektált fotonáram szimulációjára is, amihez a RENATE által adott eredmények mérési adatokkal való összevetése volt szükséges. Ehhez a TEXTOR (Tokamak EXperiment for Technological Oriented Research) [11] tokamakon végzett #108953 számú lövés mérési eredményeit használtuk fel, úgy hogy a TEXTOR megfigyelőrendszerét egy egyszerű camera obscura modellt alkalmazva vizsgáltuk.

A vizsgált #108953 lövés során a Thomson-szórás diagnosztika által mért plazmaparamétereket (elektron-sűrűség és hőmérséklet eloszlás) felhasználva szimulációkat végeztünk, amelyek eredményeit a TEXTOR megfigyelőrendszerében lévő interferencia-szűrő egyes detektorokra vonatkozó átvitelével korrigáltunk. Ezután a mért és korrigált eredmények hányadosából a szimuláció segítségével kiszámítottuk a megfigyelőrendszer optikai átvitelét (*szimulált optikai átvitel*). Mivel az 5. ábra alapján a mért eredményekhez normált szimulációs eredmények jól láthatóan hasonló görbén helyezkednek el, így az optikai átvitel egy széles tartományon azonos volt. Ezt hasonlítottuk

össze a megfigyelőrendszer részletes optikai tervei alapján a rendszer transzmittivitására kapott becsléssel (*becsült optikai átvitel*).

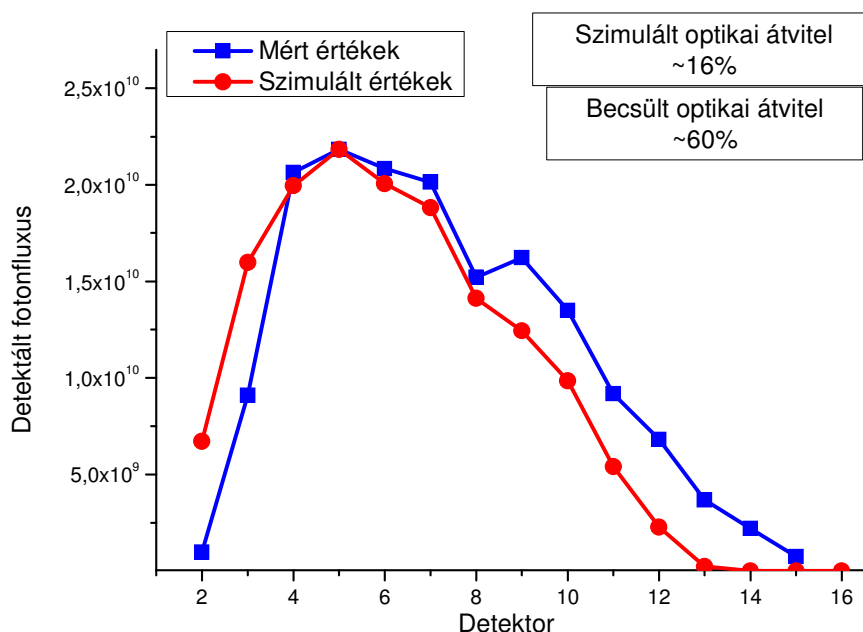
Vizsgálatunk során úgy találtuk, hogy a két optikai átvitel nagyságrendileg megegyezik, így a RENATE alkalmas a detektált fotonáram nagyságrendi becslésére. Jövőbeli terveink között szerepel majd a RENATE további validációja, és jobb optikai modellek használatával az eltérés csökkentése.

## Optimális zaj-jel arányú detektor keresése a RENATE segítségével

A gyors mintavételezésű BES megfigyelés esetén a megfigyelt hullámhossztartományon detektált fényintenzitás meglehetősen alacsony, így fontos, hogy a detektor képes legyen azt felerősíteni. További lényeges szempont az, hogy a berendezésben általában végzett mérések során a detektorra jellemző zaj/jel arány a lehető legkisebb legyen. Ezen feltételek alapján leginkább a fotoelektron-sokszorozó (PMT, Photomultiplier Tube), és a lavina fotodióda (APD, Avalanche Photodiode) jöhet szóba [12].

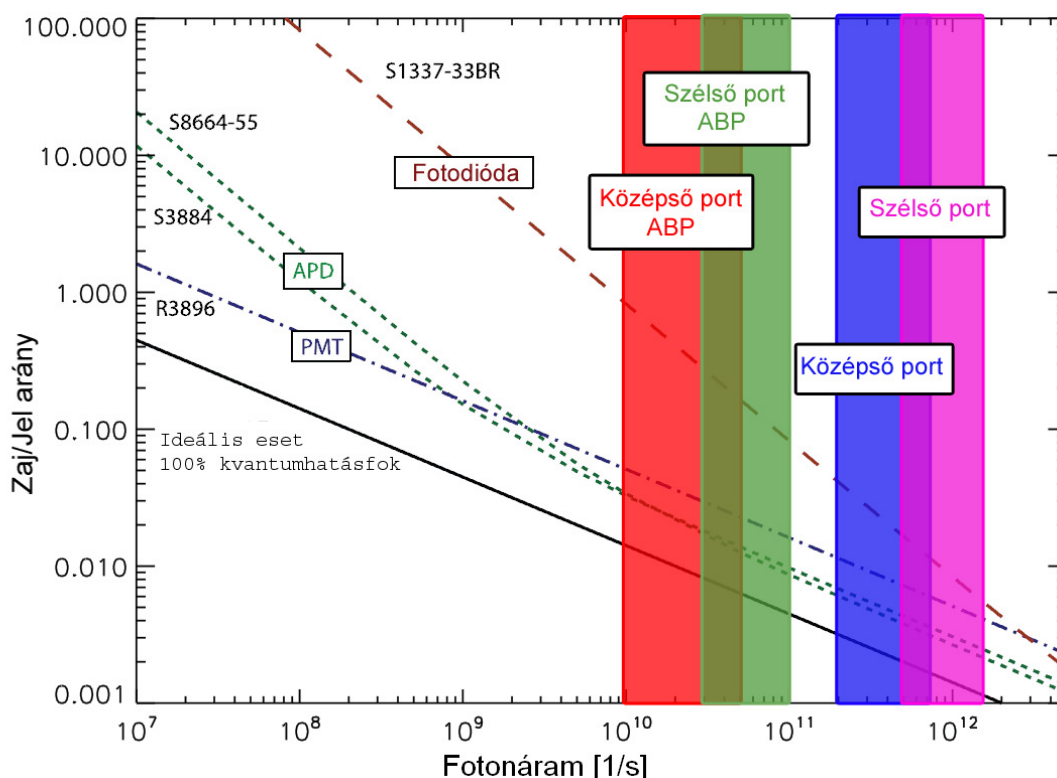
Az előbbi RENATE modulokat felhasználva szimulációkat végeztünk a COMPASS BES diagnosztika jövőbeli üzemenlési paramétereire. Az így kapott eredményeket csoportosítottuk aszerint, hogy melyik megfigyelési konfigurációkra (2. ábra), és melyik diagnosztikai üzemmódban (normál vagy ABP kompatibilis) végeztük el a szimulációkat. Ezen négy kategória esetén a gyors mintavételezésű megfigyelőrendszer által átlagosan detektált fotonáram alapján pedig megkerestük az ezen fotonáram esetén minimális zajjal üzemelő detektortípust (6. ábra), amihez a [12] cikk adatait használtuk fel.

Az 6. ábra alapján a COMPASS tokamak BES diagnosztikájának szempontjából releváns tartományban az APD detektorok egyértelműen a legmegfelelőbbek, 0,2-4% zaj/jel viszonyal.



5. ábra: A #108953 lövés során mért és ehhez normált szimulált értékei az egyes detektorok által detektált fotonáramnak





6. ábra: Az egyes detektortípusok zaj-jel aránya a fotonáram függvényében [12], és a szimulációk során kapott átlagos detektált fotonáram tartományok az egyes megfigyelési konfigurációk esetén

## Összefoglalás

A RENATE kód a TEXTOR tokamakokon mért adatokkal való összehasonlítást követően részletesen tudta szimulálni a COMPASS BES diagnosztika jövőbeli működését, ami nagyban hozzájárult annak tervezéséhez.

RENAME szimulációk segítségével kijelölhető volt a megfigyelendő nyalábszakasz, a detektált fotonáram tartományok felhasználásával felmérhető volt a detektorok optimális geometriájú elrendezése, és a legjobb zaj/jel arányú detektortípust kiválasztásában is segített.

## Irodalomjegyzék

- [1] J. Wesson - Tokamaks, Clarendon Press Oxford (2004) ISBN 978-0-19-850-922-6
- [2] ITER Physics Basis Editors, et al, ITER Physics Basis. Nuclear Fusion, vol. 39 2137-2638 (1999)
- [3] R. Pánek, O. Bilyková, V. Fuchs, M. Hron, P. Chráska, P. Pavlo, J. Stöckel, J. Urban, V. Weinzettl, J. Zajac, F. Žáček, Reinstallation of the COMPASS Tokamak in IPP ASCR, Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 56 B125-127 (2008)
- [4] I. Pusztai, D. Dunai, G. Pokol, G. Pór, J. Schweinzer, S. Zoletnik, Capabilities of alkali Beam Emission Spectroscopy for density profile and fluctuation measurements, Europhysics Conference Abstracts, vol. 31F P2.137 (2007)
- [5] M. Berta, A. Bencze, G. Anda, M. Aradi, D. Dunai, G. Veres, S. Zoletnik, Concept of Atomic Beam Probe diagnostic on COMPASS tokamak, Europhysics Conference Abstracts, vol. 33E, P-5.139 (2009)
- [6] I. Pusztai, RENATE (Rate Equations for Neutral Alkali-beam TEchnique), atomnyaláb diagnosztika szimulációs program leírása, belső jelentés, BME-NTI-394-2007
- [7] I. Pusztai, G. Pokol, D. Dunai, D. Refy, G. Por, G. Anda, S. Zoletnik, J. Schweinzer: De-convolution based correction of alkali beam emission spectroscopy density profile measurements, Review of Scientific Instruments, 80, 083502 (2009)
- [8] H. Meyer: ITPA H-mode Pedestal Database, 2004
- [9] H. Meyer, personal communication, 2006
- [10] J. Schweinzer, Documentation on the Installation of a Code Package at NIFS for Reconstructing Density Profiles from Lithium Beam Emission Data; IPP-Garching belső dokumentum (2005)
- [11] G. Anda, D. Dunai, G. Petravich, J. Sárközi, S. Zoletnik, B. Schweer, T. Baross, I. G. Kiss, B. Mészáros, First Measurements with the re-installed accelerated Lithium beam diagnostics on TEXTOR, Europhysics Conference Abstracts, Vol. 32D P.5076 (2008)
- [12] D. Dunai, S. Zoletnik, J. Sárközi, Avalanche Photodiode based Detector for Beam Emission Spectroscopy, Review of Scientific Instruments, to be published