

# A RENATE atomnyaláb diagnosztika szimuláció általánosítása és alkalmazása az ITER diagnosztikai nyalábjára

Guszejnov Dávid<sup>1</sup>, Pokol Gergő<sup>1</sup>, Pusztai István<sup>2</sup>

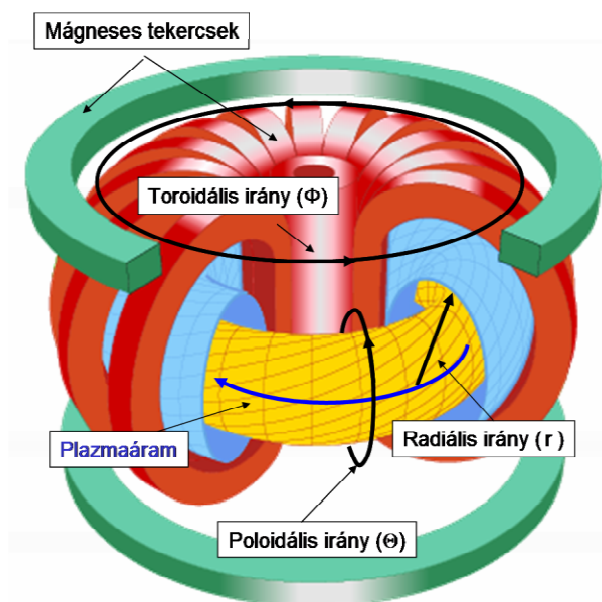
<sup>1</sup>BME NTI, EURATOM Association, 1521 Budapest, Pf. 91.

<sup>2</sup>Chalmers University of Technology, EURATOM-VR Association, SE-412 96 Göteborg

A fúziós kutatások során egyik leggyakrabban használt aktív plazmadiagnosztika az atomnyaláb emissziós spektroszkópia (BES). Jelen cikk a BME NTI által ezen diagnosztika működésének modellezésére kifejlesztett RENATE szimulációs kód új, továbbfejlesztett változatát hivatott bemutatni. A 2010-es fejlesztések által a RENATE képessé vált hidrogén, illetve deutérium nyalábanyagok, továbbá komplex szerkezetű nyalábok (pl. fűtőnyalábok) szimulációjára általános 3D geometriában. Az így keletkező kód egy univerzális BES diagnosztika szimulátor, ami alkalmasnak bizonyult az ITER-re tervezett, a sűrűségfluktuációkat megfigyelő BES diagnosztika működésének szimulációjára is.

## Bevezetés

Jelenleg a tokamak a leginkább kutatott fúziós berendezés (1. ábra). A tokamakok olyan törusz alakú berendezések, amelyekben a plazmát külső, néhány tesla erősségű mágneses tér segítségével tartják egyben. Ezt a teret külső mágneses tekercsek és a plazmában indukált nagy plazmaáram (~ MA) segítségével érik el, ami egy helikálisan megcsavart térszerkezetet hoz létre, így megnehezítve a plazmarészecskék különböző driftek miatti kiszökését a berendezésből [1].



1. ábra: Tokamak felépítése és a toroidális geometria jellemző irányjai

A fúziós kutatások szempontjából jelenleg legfontosabb tokamak az ITER [2]. Az ITER (latinul „út”) egy nemzetközi összefogásban épülő tokamak, ami a világ legnagyobb fúziós berendezése lesz. Az ITER projekt alapvető célja a jövőbeli fúziós energiatermeléshez szükséges technológiák kifejlesztése és demonstrálása [2].

Bár az ITER ötlete 1985-ben merült fel, magának a berendezésnek az építése csak 2007-ben kezdődött el, aminek első szakasza várhatóan 2019-ben fejeződik be [3]. Az ITER-en szerzett tapasztalatok alapján várhatóan a 2030-as évek elejére fog megépülni az első demonstrációs fúziós erőmű, a DEMO (DEMOstration Power Plant).

Az ITER több fűtőnyaláb mellett rendelkezni fog egy nagyenergiájú diagnosztikai nyalábbal (Diagnostic Neutral Beam - DNB), amit többek között a töltéscsere diagnosztika (Charge Exchange Recombination Spectroscopy - CXRS) fog használni a reaktorban lévő hélium koncentráció és ezáltal a fúzió reakció hatékonyságának mérésére [4]. A diagnosztikai rendszerek tervezése során felmerült a kérdés, hogy lehet-e a DNB-t a plazma sűrűségfluktuációinak megfigyelésére használni [5]. Ezen lehetőség vizsgálatát a KFKI-RMKI a BME NTI-vel együttműködve végzi.

## Atomnyaláb diagnosztika

A fúziós plazmák rendkívül magas hőmérséklete lényegében lehetetlenné teszi a tradicionális, közvetlen kontaktuson alapuló mérési módszerek alkalmazását. Helyettük több különleges diagnosztikai eljárást szokás használni, ezek közül az egyik legfontosabb az atomnyaláb emissziós spektroszkópia (Beam Emission Spectroscopy - BES) [6].

A BES működése abból áll, hogy egy nagyenergiájú atomnyalábot lőnek a plazmába, amelynek atomjai a plazmarészecskékkel való ütközések során gerjesztett állapotba kerülnek, ahonnan spontán emisszió útján, karakterisztikus hullámhosszú fotonokat kibocsátva térnek vissza alap-

állapotba. Az ily módon kibocsátott, Doppler-eltolódást szenvedett sugárzást a diagnosztika megfigyelőrendszere érzékeli. Az így detektált nyalábmenti intenzitás-eloszlásból (fényprofilból) következtetni lehet az adott hullámhosszhoz tartozó elektronívó populációjára a nyaláb mentén, amiből visszaszámolható a plazma pillanatnyi sűrűsége az adott helyen.

A belőtt nyalábot úgy állítják elő, hogy egy termikus ionforrásból származó, elektrosztatikus térrel felgyorsított ionnyalábot keresztüllőnek egy semlegesítőn, ahol az töltéscsere reakciókkal elektronokat szed fel, így semlegesítődik (2. ábra). A belőtt atomok a plazma-részecskékkel való ütközések során előbb-utóbb ionizálódnak és a mágneses térrel kölcsönhatva távoznak az atomnyalábból, így a nyaláb a plazma belseje felé haladva gyengül.

A plazma lehető legkisebb perturbációjának érdekében a BES rendszerek vagy a plazma fűtésére használt, nagy áramerősségű fűtőnyalábokat (Neutral Beam Injection - NBI), vagy kisebb áramerősségű, a plazmát kevésbé perturbáló diagnosztikai nyalábokat figyelnek meg.

### RENATE szimulációs kód

Jelen cikk tárgyát a BME NTI-ben kifejlesztett RENATE (Rate Equations for Neutral Alkali-beam TEchnique) szimulációs kód képezi. Ez egy moduláris felépítésű, IDL (Interactive Data Language) nyelven írt program, ami lehetővé teszi különböző fúziós berendezések atomnyaláb diagnosztikai méréseinek direkt szimulációját és az eredmények korrekcióját [6, 7].

A cikkben a RENATE kód két verziója szerepel:

- **0.1** - A RENATE korábbi verziója, egy kétdimenziós alkálifém-BES diagnosztika szimulátor
- **2.0** - A RENATE továbbfejlesztett verziója, ami képes általános BES diagnosztika szimulátorként működni.

A program a nyaláb atomjainak a plazmával való kölcsönhatását az ún. "ütközési-sugárzási" modell alapján veszi figyelembe [9]. Ennek lényege, hogy az atomi nívók betöltöttségét az atomi folyamatokat figyelembe véve követi. A szimuláció a nyalábot alkotó atomokat hidrogén-szerűnek tekint, azaz csak a vegyértékelektron reakcióit kíséri figyelemmel, és annak a különböző nívókhoz tartozó populációit számítja ki térben és időben. A számítások során

a vegyértékelektronnak csak véges számú állapotát lehet figyelembe venni, de mivel a magas főkvantumszámú nívók betöltöttsége általában nagyságrendekkel kisebb, mint az alacsonyabbaké, ezért elhanyagolásuk nem okoz lényeges hibát. A plazmarészecskékkel való ütközések során nívók közötti elektronátmenetet okoz az ütközéses felgerjesztődés, legerjesztődés és a spontán legerjesztődés. Az ütközéses ionizáció és a töltéscsere folyamatok viszont általános elektronvesztést okoznak.

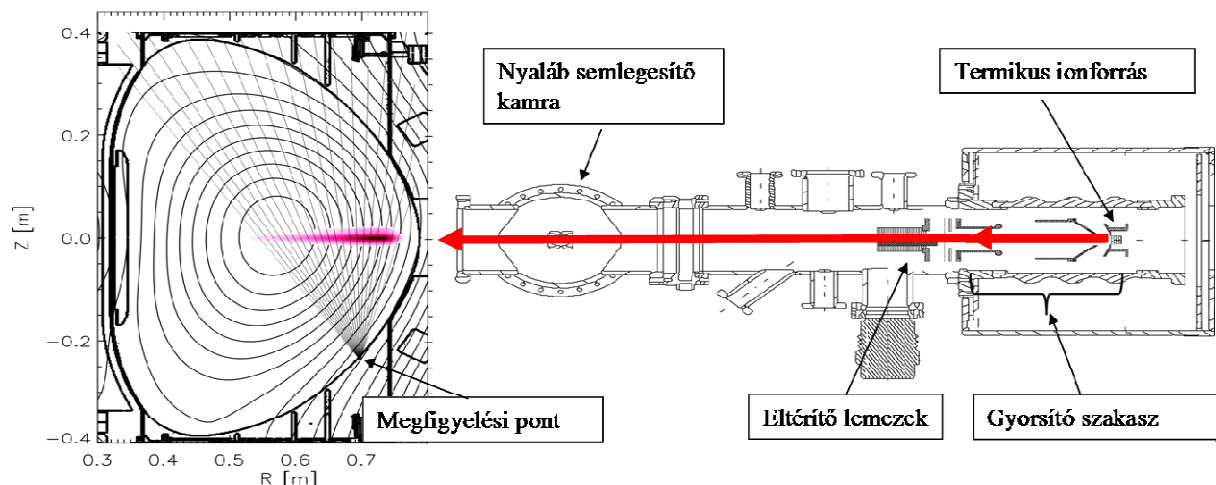
A RENATE saját atomfizikai kernelje segítségével kiszámítja ezen reakciók mindegyikére a rátaegyütthatókat, majd numerikusan megoldja az egyes nívók populációjának nyalábmenti eloszlását leíró differenciálegyenlet-rendszert. Ezután a megfigyelt átmenet Einstein-együtthatóját figyelembe véve a RENATE kiintegrálja az egyes detektorok által megfigyelt tartományokban a foton-emisszió gyakoriságot. Végül ezen eredményeket geometriai faktorokkal korrigálva a kód megadja az egyes detektorokat érő fotonáramokat.

### Egydimenziós fluktuáció-válasz számítás

A plazmában zajló turbulens és tranziens transzport-jelenségek vizsgálatához elengedhetetlen a plazma sűrűségfluktuációinak vizsgálata. A BES diagnosztikákat többek között a fúziós plazmák sűrűségfluktuációinak megfigyelésére használják fel. Ezen fluktuációk matematikailag úgy modellezhetők, hogy a plazma  $n$  sűrűsége felbontható egy  $n_0$  statikus eloszlásra (időskála  $> 100 \mu s$ ) és egy erre szuperponálódó, gyorsan változó,  $\bar{n}$  fluktuáló részre. Feltételezhető továbbá, hogy a perturbációk a fluxusfelületek mentén elnyúltak. Kis amplitúdójú perturbációk esetében élhetünk a szuperpozíció elvével, így feltételezhető, hogy az  $i$  sorszámú detektor által detektált fotonáramok ( $\Phi$ ) eltérése a statikus eloszlás esetén mért jeltől ( $\Phi_0$ ) a következő módon függ a turbulens plazmasűrűségtől:

$$\Phi(i, t) - \Phi_0(i, t) = \int \bar{n}(r, t) R(i, r) dr, \quad (1)$$

ahol  $R(i, r)$  az ún. sűrűségfluktuáció átviteli függvény, ahol  $r$  a fluxusfelület koordinátája. Ezen függvény segítségével direkt módon meg lehet adni egy adott perturbációnak a mért jelre gyakorolt hatását. Gyakorlati alkalmazásokban fontosabb, hogy az  $R(i, r)$  függvény ismeretében lehetséges a mért jelekből kinyerni a sűrűségfluktuáció keresztkorrelációs függvényét.



2. ábra: BES diagnosztika vázlatos felépítése

## Fejlesztések

RENATE 0.1 2009-ben alkálifém nyalábokat (Li, Na) használó BES diagnosztikák működésének szimulációjára készült. A kód lényegében megfelelt a kitűzött céloknak [8], azonban nem volt alkalmazható az ITER és JET tokamakok diagnosztikáinak szimulálására, ami akadályozta a jövőbeli felhasználhatóságát. Ezért 2010 januárjában a RENATE fejlesztőcsapata a kód továbbfejlesztése mellett döntött, melynek célja ezen megkötések megszüntetése és a RENATE lehető legteljesebbé általánosítása volt.

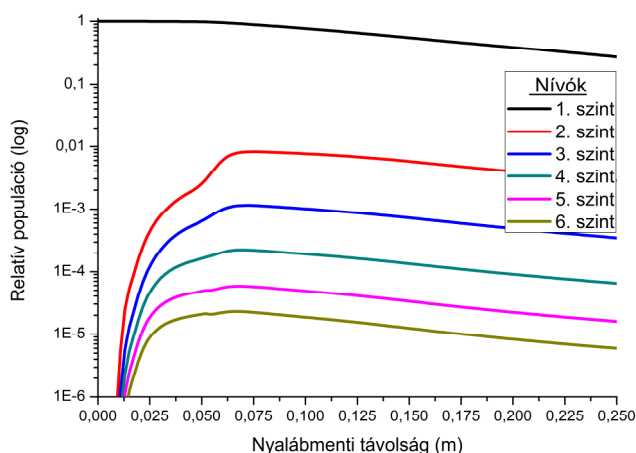
### Szimulációs megkötések

A RENATE 0.1 egyik fő hiányossága volt, hogy csak két dimenzióban volt képes szimulációkat végezni, azaz csak olyan nyalábokat tudott szimulálni, amelyek végig egy poloidális síkban tartózkodtak, továbbá amelyeknél a megfigyelési pont is ugyanebben a poloidális síkban volt. Ugyancsak problémát jelentett, hogy a RENATE 0.1 csak Li és Na nyalábokat tudott szimulálni, így alkalmatlan volt a hidrogén és deutérium alapú nyalábok modellezésére. Fontos továbbá megemlíteni, hogy bár az eddigi szimulációk során a nyalábok már kiterjedtek voltak tekintve, szemben a RENATE előtt használatos infinitezimális vastagságú nyaláb modellel, azonban még mindig komoly megkötések vonatkoztak a nyalábra (pl. hengerszimmetria). Széles diagnosztikai, illetve fűtőnyalábok esetében ezen közelítések már szignifikáns eltéréseket okozhatnak.

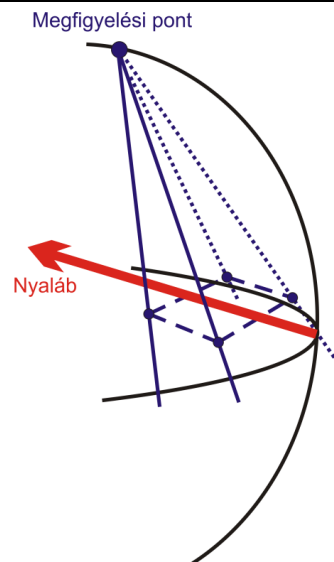
### H és D nyalábok támogatása, általános nyalábmodell

A RENATE továbbfejlesztésének első lépéseként kiegészítettük a RENATE atomfizikai kerneljét hidrogén és deutérium nyalábok plazmával való reakcióinak hatáskeresztmetszeteivel, amiket az IAEA ALADDIN (A Labelled Atomic Data INterface) adatbázisából nyertünk ki [11]. Ezen atomi hatáskeresztmetszetek a BES diagnosztikák által használt tartományban 20-30% körüli hibával rendelkeznek [12].

Mivel numerikusan csak véges számú nívó populációját lehet követni, továbbá a H és D atomi pályái degeneráltak, ezért a kód csak az első 6 főkvantumszámhoz tartozó energiaszint populációját tartja számon (3. ábra).



3. ábra: RENATE szimuláció eredménye az egyes elektron-nívó nyalábmenti betöltöttségéről H esetében



4. ábra: Camera obscura modell

A továbbfejlesztett RENATE a belőtt atomnyalábokat már háromdimenziós térbeli nyalábokként kezeli, melyeket egydimenziós résznyalábok összességeként reprezentálja. Ezen beamlet-ek kezdőpontja, iránya és áramerőssége egymástól függetlenül megadható, így segítségükkel tetszőleges térbeli nyaláb leírható. A nyalábevolúció-számítás az egyes résznyalábokra külön történik. Ezen számítások során feltételezzük a fluxusfelületek toroidális szimmetriáját, ami tokamakok esetében jó közelítéssel fennáll, majd a RENATE a plazmaparamétereket a fluxusfelületek mentén kiterjesztve kiintegrálja a rátaegyenleteket.

### Megfigyelés modellezése

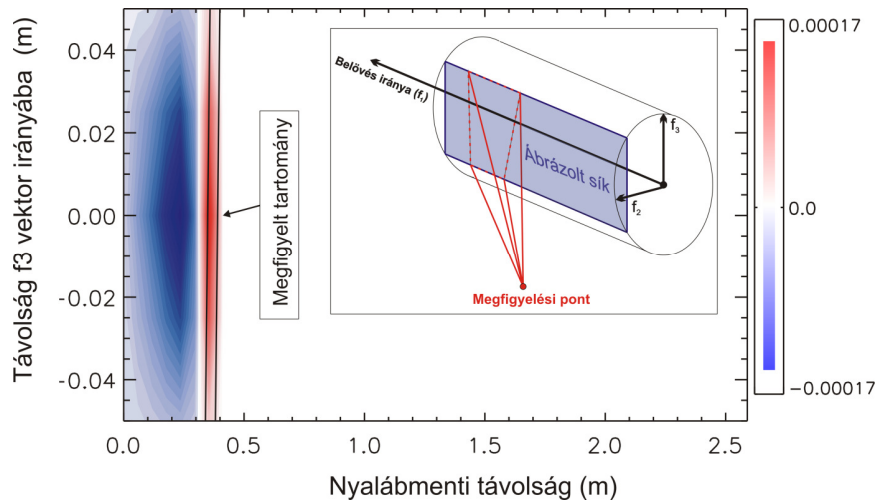
Természetesnek tűnt a megfigyelés modellezésére a RENATE 0.1-ben használt kétdimenziós camera obscura modell háromdimenziós változatát felhasználni. A program a detektor által megfigyelt geometria számításakor a megfigyelőrendszer apertúráját pontszerűnek tekinti (pinhole optika), és az apertúra mögött lévő detektorokra képződik a megfordított kép. Előnye, hogy nagyon egyszerű vele számolni, viszont csak egy egyszerű, ideális viselkedést tud leírni, hisz figyelmen kívül hagyja a különböző torzítások hatásait. A nyaláb adott pontjából detektált fény mennyiségét adott nagyságú fénygyűjtő optikai elemet figyelembe véve számolja.

Mivel a detektorok négyszög alakúak, így négyszög alapú látógúlból (4. ábra) detektálnak fényt. Ha a nyaláb poloidális síkjából történik a megfigyelés, akkor ez megegyezik a RENATE 0.1-ben használt 2D camera obscura modellel. Az alkalmazott modell előnye, hogy a gúlból segítségével jó közelítéssel visszaadható a valódi megfigyelőrendszerek által látott tartományok alakja is.

### Fluktuációválasz-számítás három dimenzióban

A RENATE kód korábbi fluktuációválasz modulja egy fluxusfelület mentén perturbálva a plazmát állította elő a sűrűségfluktuáció átviteli függvényét, ami tetszőleges nyalábmenti perturbáció esetében megadta a fényprofil [lásd az (1) egyenlet]. A RENATE továbbfejlesztése során ezt az egydimenziós számítást is három dimenzióra általánosítottuk, ami gyakorlatilag a modul működésének újraértelmezését és újírását jelentette.





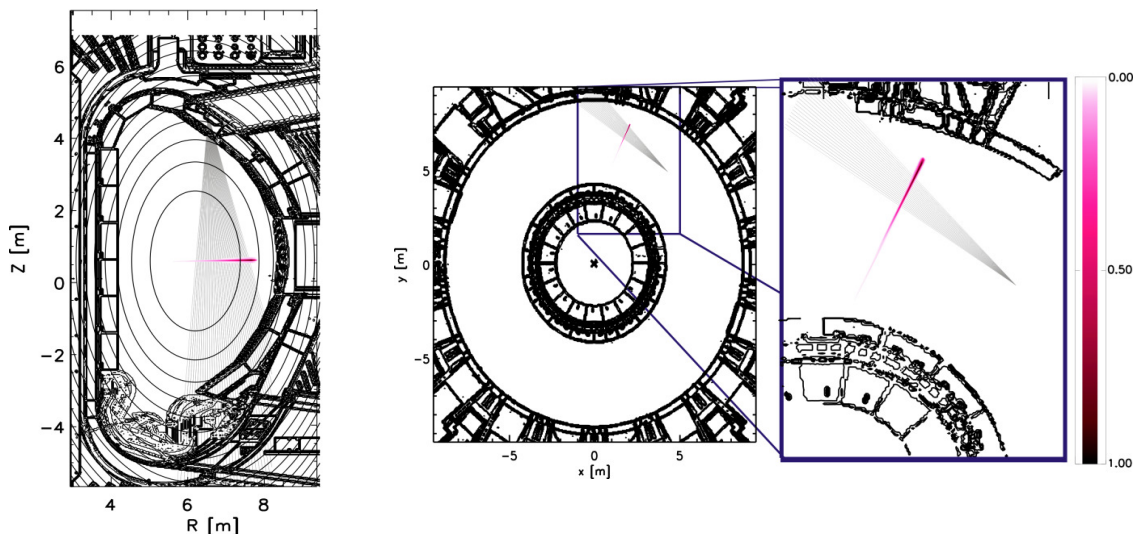
5. ábra: Az ITER DNB fluktuációválasz mátrixának egy kétdimenziós szelete

A RENATE háromdimenziós általánosítása miatt lehetővé vált nemcsak a fluxusfelületek mentén elnyúlt, hanem a pontszerű perturbációk hatásainak modellezése is. Ehhez a RENATE a térben közelítőleg Dirac-delta sűrűségperturbációkat helyez el, majd ezen perturbált sűrűségeloszlásra kiszámítja a detektorjeleket, amikből levonva a statikus eloszlás esetén kapott értékeket kiszámítja az  $R(i,r)$  átviteli függvényt. A Dirac-deltát egy az adott rácspontban centrált, Gauss-függvény szerint lecsengő sűrűségperturbációval közelíti, aminek a szórása (a Dirac-delta „elkenése”) és a teljes térfogatra vett integrálja (a perturbáció erőssége) a program hívásakor beállítható ugyanúgy, mint a rác felbontása is. Ezen paraméterek megfelelő beállításával lényegében tetszőleges felbontással és pontossággal elő lehet állítani az átviteli függvényt.

A RENATE kód új fluktuációválasz-számító modulja is rendelkezik grafikus kimenettel, ami megmutatja, hogy egy adott detektor esetében egy adott síkban, adott helyen elhelyezett, a bemenetekből definiált közel Dirac-delta perturbáció mekkora abszolút eltérést okoz a detektor által

detektált jelben (5. ábra). Ez az eltérés a statikus eloszlás esetén detektált maximális jellel van normálva. Az ábrán fel van még tüntetve az adott detektor által a síkból megfigyelt tartomány is.

Az 5. ábrán jól látszik, hogy a megfigyelt tartomány után lévő perturbációk a kauzalitás miatt nem adnak járulékot. Az is észrevehető, hogy a megfigyelt tartományban lévő sűrűségperturbációk pozitív fényválaszt váltanak ki. Ennek oka egyszerűen az ütközéses gerjesztés megnövekedett reakciógyakorisága, ami nyilván rövidtávon a megfigyelt nívó populációjának növekedését fogja jelenteni. Mivel a nyalábatomok sebessége rendkívül nagy, ezért a spontán legerjesztődés karakterisztikus ideje alatt is számottevő utat tehetnek meg, ez okozza a megfigyelt tartomány előtti pozitív választ. Az is látható, hogy a jelentősen a megfigyelt tartomány előtt elhelyezkedő perturbációk negatív választ adnak, ami a sűrűsénövekedés okozta nyalábgyengülésnek tudható be. Az ábrán látható elrendezés esetében a nyaláb áramprofilja egy Gauss-függvény, ami indokolja a lecsengő választ a széleken.



6. ábra: A szimulációkban használt mérési elrendezés poloidális, illetve toroidális vetülete

## Alkalmazás az ITER-re

Mint az a bevezetőből kiderült, az ITER rendelkezni fog egy nagyenergiájú diagnosztikai nyalábbal (DNB), amit alapvetően a töltéscsere diagnosztika (CXRS) számára építenek, de BES méréstechnikát felhasználva a plazma sűrűségfluktuációinak megfigyelésére is tervezik használni [3,4]. Az eddigiekben felsorolt fejlesztések által létrejött RENATE 2.0 képességeinek demonstrálása céljából szimuláltuk az ITER BES diagnosztikájának működését a tervezett paramétereken. A vizsgált konfiguráció a 6. ábrán látható.

A 6. ábrán látható a belőtt nyaláb emissziójának eloszlása is, amit a kép jobb oldalán lévő színskála segít értelmezni. A nyaláb lényegében a középsíkban vízszintesen lesz belőve a poloidális síkkal kis szöget bezárva. Az emisszió a plazmában befelé haladva gyengül. Az ábrán fel van tüntetve a megfigyelési pont és a hozzá tartozó látóvonalak is, melyeken jól látszik, hogy a RENATE 0.1 nem lett volna képes ennek az elrendezésnek a szimulációjára, hisz a megfigyelés egy másik poloidális síkban lévő felső portból történik.

## Összefoglalás

A cikk a fúziós plazmák atomnyaláb diagnosztikájának szimulálására alkalmas RENATE kódot és annak továbbfejlesztését mutatja be. A részletezett fejlesztések hatására a RENATE képessé vált hidrogén és deutérium nyalábok szimulációjára, komplex geometriájú nyalábok nyalábevolúciójának modellezésére, továbbá tetszőleges kis amplitúdójú perturbáció hatásának szimulálására.

Az így elkészült RENATE 2.0 már egy teljesen univerzális BES diagnosztika szimulátor, amivel sikeresen modelleztük az ITER diagnosztikai nyalábját megfigyelő BES diagnosztika működését.

A RENATE fejlesztése még nem ért véget, következő lépésként tervezzük a RENATE kód más kódokkal való összevetését (benchmarking), azonban mivel a többi szimulációs kód atomfizikai magja is a [12] cikkben említett 20-30%-os hibával rendelkezik, ezért tervezzük a RENATE kód validációját a TEXTOR tokamakokon mért adatokkal. Az így validált RENATE segítségével különböző perturbációk ITER BES diagnosztikával érzékelhető hatásait fogjuk modellezni, továbbá a KSTAR tokamakra épülő BES diagnosztika tervezését támogatni.

---

## Irodalomjegyzék

- [1] J. Wesson, Tokamaks, Clarendon Press Oxford, 2004, ISBN 978-0-19-850-922-6
- [2] ITER Physics Basis Editors, ITER Physics Expert Groups, ITER Joint Central Team, and Physics Integration Unit. ITER Physics Basis. Nuclear Fusion, 39, 12, 2137 – 2638, 1999
- [3] ITER Council, Overall Project Schedule, 8th Management Advisory Committee Meeting, 2010
- [4] ITER 2009 Baseline, ITER Plant Description, 2009
- [5] G. Pokol, T. Baross, S. Zoletnik, V. Szabó, Az ITER töltéscsere diagnosztikájának fejlesztése, Nukleon, 3, 59, 2010
- [6] B. Schweer, Application of atomic beams for plasma diagnostics, Fusion Science and Technology, 49, 404 – 411, 2006
- [7] I. Pusztai, G. Pokol, D. Dunai, D. Réfy, 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] D. Guszejnov, G. Pokol, D. Réfy, G. Anda, G. Petravich, D. Dunai, and I. Pusztai, A COMPASS tokamakra építendő atomnyaláb diagnosztika tervezésének támogatása szimulációk segítségével. Nukleon, 3, 61, 2010
- [9] R. P. Schorn, E. Hintz, D. Rusbüldt, F. Aumayr, M. Schneider, E. Unterreiter, H. Winter, Absolute concentrations of light impurity ions in tokamak discharges measured with lithium-beam-activated charge-exchange spectroscopy. Applied Physics B: Lasers and Optics, 52, 2, 71–78, 1991
- [10] S. Zoletnik, S. Fiedler, G. Kocsis, G. K. McCormick, J. Schweinzer, H. P. Winter, Determination of electron density fluctuation correlation functions via beam emission spectroscopy, Plasma Physics and Controlled Fusion, 40, 7, 1399, 1998.
- [11] IAEA. ALADDIN (A Labelled Atomic Data INterface). <http://www-amdis.iaea.org/ALADDIN/>, (letöltés: 2010. május)
- [12] E. Delabie, M. Brix, C. Giroud, R. J. E. Jaspers, O. Marchuk, et al., Consistency of atomic data for the interpretation of beam emission spectra, Plasma Physics and Controlled Fusion, 52, 12, 2010