

A fúziós plazmában megjelenő ELM instabilitásokat megelőző prekursor rezgések statisztikája

TDK dolgozat

Zsuga Lilla Veronika

BSc I. évfolyam, BME TTK

Témavezetők:

Dr. Zoletnik Sándor főmunkatárs

MTA Wigner FK

Dr. Pokol Gergő egyetemi docens

BME Nukleáris Technikai Intézet

2014

Kivonat

TDK dolgozatom témája a magfúziós energiatermelés kutatásához kapcsolódik. A fúziós energiatermelés megvalósításához szükséges magas hőmérsékletű plazma mágneses összetartását megvalósító berendezésekben megfigyelték, hogy ha a fűtési teljesítmény meghalad egy határt, a plazma úgynevezett L-H átmeneten esik át. Az L-mód az alacsony összetartású üzemmód, a H-mód a magas összetartású üzemmód jelölése. Az átmenet hatásának következtében, a plazma szélén egy vékony rétegben a hőszigetelés spontán módon megjavul. Ez a fúziós energiatermelés megvalósítása szempontjából kedvező, mivel csökkenti az energiavesztést. Felmerül azonban az a probléma, hogy a szennyezők is benne maradnak a plazmában.

Van egy másik jelenségkör, ami megoldást jelenthet. A H-módban megjelennek az úgynevezett plazmaszéli módus instabilitások (ELM – Edge Localized Mode). Ezek során hirtelen energia- és részecsketranszport történik a plazma szélső rétegeiből a plazmán kívülre, amely szabályozatlan esetben a berendezés vákuumfalának károsodásához is vezethet. Elméleti számítások szerint ezt a jelenséget egy magnetohidrodinamikai instabilitás megjelenése okozza, azonban a folyamat részletei még nem értelmezhetők, ezért részletes kísérleti vizsgálatokra van szükség.

Egyes megfigyelések alapján [1], az ELM-ek előtt $30 - 40 \mu\text{s}$ -mal 40 kHz körüli frekvencián prekursor rezgések jelennek meg. Ez a folyamat része lehet, amit megértve lehetőség adódhat az ELM események szabályozására. Így irányítottan tisztíthatnánk a plazmát és elkerülnénk a spontán ELM instabilitások szerkezetroncsoló hatását.

A fúziós plazmafizikában alkalmazott egyik diagnosztika a lítium-atomnyaláb diagnosztika [2], mely során egy $30 - 50 \text{ keV}$ energiájú lítiumnyalábot lőnek a plazmába, majd a detektált fényintenzitás alapján mérik a plazmasűrűséget. Az ELM esemény során a sűrűség plazmaszéli eloszlásának mereksége hirtelen lecsökken. Ez megfigyelhető a diagnosztika által visszaadott jeleken, ahogyan az ELM instabilitásokat megelőző sűrűségbeli ingadozások (prekursor rezgések) is. A háttérsugárzás kiszűrésére a gyors nyalábszaggatás módszerét [2] használják, amely során az atomnyalábot $4 - 5 \mu\text{s}$ -os periódusidővel megszakítják, így mérve a teljes- és a háttérsugárzást is. A háttérsugárzást levonva a teljes jelből, a tisztított jel már ideális a sűrűségmérésre.

Dolgozatomban bemutatok egy általam kidolgozott és letesztelt módszert a prekursor rezgések detektálására és nagyszámú esemény statisztikai elemzésével megvizsgálom, hogy az ELM események hány százalékában láthatók ezek a jelenségek.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	5
1.1. Energiatermelési lehetőségek	5
1.2. Fúzió	5
1.3. Fúzió a Földön	6
1.4. Energiamérleg	8
1.5. Tokamak	9
1.6. L-H átmenet	12
1.7. ELM-események	13
1.8. Nyalábemissziós spektroszkópia	15
2. ELM prekursor rezgések vizsgálata	17
2.1. Célkitűzés	17
2.2. ELM mérések a TEXTOR tokamakon Litium nyalábbal	17
2.3. A munka előzményei	18
2.4. Adatfeldolgozás módszere	20
2.5. Prekursorok	21
2.6. ELM-ek	21
2.7. Prekursor eloszlás	22
2.8. Prekursorok és ELM-ek közti összefüggés	26
2.9. Következtetések	26
3. Összefoglalás	28
4. Fejlesztési lehetőségek	30
Irodalomjegyzék	32

1. fejezet

Bevezetés

1.1. Energiatermelési lehetőségek

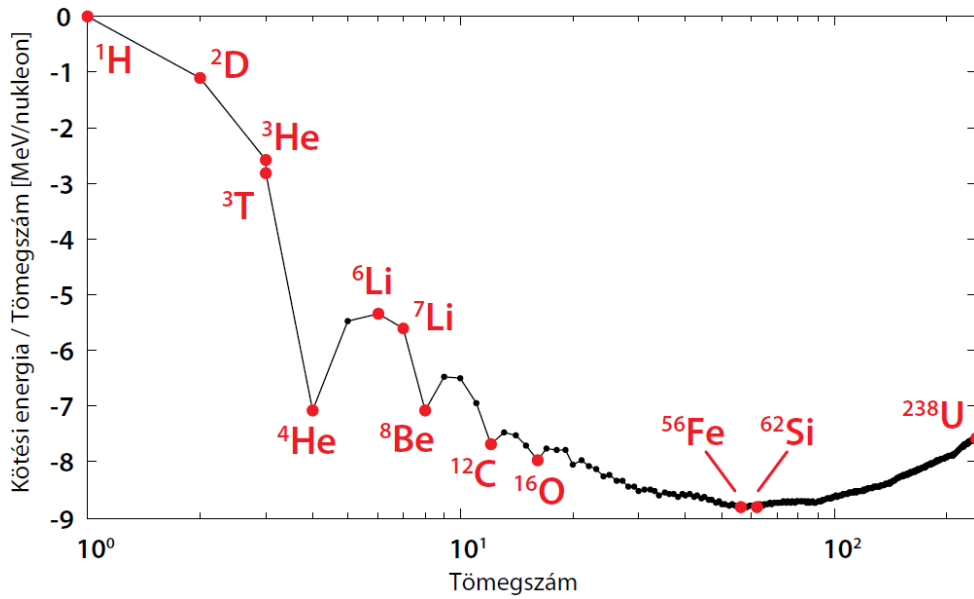
Korunk egyik legnagyobb problémája az egyre növekvő energiaigények kielégítése. A fosszilis energiaforrások végesek, ezért a tudományos társadalom egyik fontos feladata alternatív energiaelőállítási módok kifejlesztése. Jelenleg a fosszilis anyagok kiváltására a megújuló energiaforrások és a fisszióval nyert atomenergia áll rendelkezésre. A megújuló energiaforrások, mint például a Napenergia, szélenergia felhasználási lehetőségei azonban erősen helyrajzi adottságoktól függőek. A fisszióval nyert energia termelése során pedig radioaktív anyagok keletkeznek, amelyek biztonságos kezelése nagy problémát jelent. Azonban az atommagok energiáját hasznosíthatjuk fúziós folyamatokkal is. Régóta kutatják ennek kivitelezési lehetőségeit.[3]

1.2. Fúzió

A mai fisszióval működő erőművek, a nagy rendszámú atomok hasadásánál felszabaduló energiát hasznosítják, kihasználva a szabályozható láncreakciót. Ennek előnye, hogy spontán reakciók is létrejönnek valamint, hogy nem szükséges hozzá kezdeti energiabefektetés. A magfúziós folyamatokban kis rendszámú atommagok egyesülnek. Ha a fúzióval létrejött atomban a 1.1 ábrán látható, egy nukleonra jutó kötési energia abszolút értéke nagyobb, mint a két kiindulási magban külön, a fúzió során is energia szabadul fel.[3]

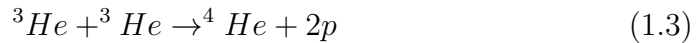
Ehhez viszont nagy kezdeti energiabefektetés szükséges, mivel az atommagok közötti elektrosztatikus taszítást le kell győzni. Láncreakció nem segíti a folyamatot és spontán reakciók sem lépnek fel[3].

A Nap is ilyen módon termel energiát. A Nap többféle fúziós folyamatból nyeri energiáját, azonban ezek nem alkalmasak földi energiatermelésre. Az



1.1. ábra. Egy nukleonra eső kötési energia [3]

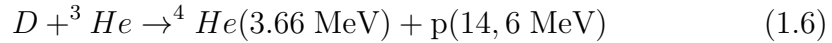
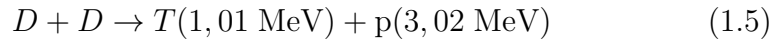
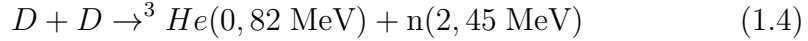
egyik a CNO ciklus, a legtöbb energiát adó pedig a következő ${}^4\text{He}$ termelő ciklus [4].



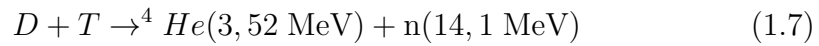
Mindkét folyamatot korlátozza, hogy szükséges hozzá, hogy a proton β -bomlással neutronná alakuljon, ami lassan következik be, így a Napban az energiatermelés nagyságrendileg mindössze 1 W/m^3 teljesítménysűrűséggel működik.

1.3. Fúzió a Földön

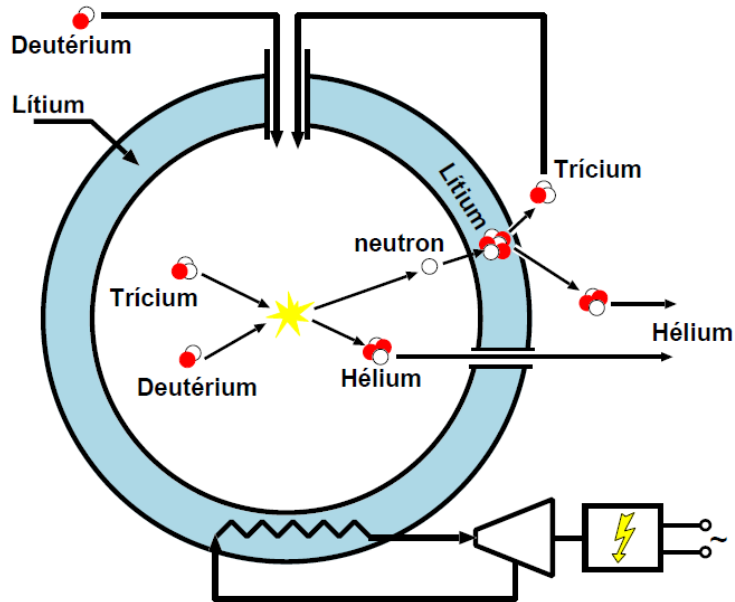
A különböző magreakciókat vizsgálva kiderült, hogy azok a nagyobb valószínűséggel bekövetkező reakciók, amelyekben deutérium is jelen van. Ezen folyamatok:



A magreakciók közül a befektetett energiamennyiség és a felszabadult energiamennyiség aránya a következő reakciónál a legideálisabb:

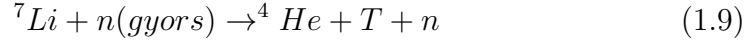
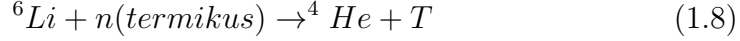


A deutérium nagy mennyiségben kinyerhető a vízből (a hidrogén magok 1/6000-ed része deutérium), a trícium azonban kis mennyiségben található meg a Földön, ezért a folyamatot úgy kell megtervezni, hogy pótolja a tríciumot, ami elhasználik a fúziók során. Ennek megoldása, ha a reaktort trícium-szaporító köpennyel veszik körül. Egy leendő reaktor működési elve látható a 1.2 képen.



1.2. ábra. Trícium-szaporító köpeny [3]

A trícium-szaporító köpennyel kihasználhatók a következő folyamatok:



A fúziós energiatermelés előnye a fissionnal szemben, hogy a fúzió során nem keletkeznek radioaktív izotópok. A trícium azonban radioaktív, β -bomló, így ennek a komponensnek a mennyiségét minimalizálni kell. Magának a reaktornak az anyaga is felaktiválódik az erős neutronsugárzás következtében, ezt optimális anyagválasztással lehet minimalizálni.[3]

Nagy hátrány azonban a fissionhoz képest, hogy a fúzió létrejöttéhez le kell győzni az atommagok közti elektrosztatikus taszítást az úgynevezett Coulomb gátat. Ehhez vagy nagyon nagy sebességre vagy nagyon magas hőmérsékletű közegre van szükség[3].

A részecskegyorsítóval létrehozott fúziós reakció a részecskék szóródása miatt nem elég nagy hatásfokú az energiatermeléshez. Ha termikus közegben szeretnénk fúziót létrehozni a Coulomb-szórás nem okoz veszteséget. Ehhez azonban nagyságrendileg 100000000 K-re van szükség. Emiatt a plazma edényben tárolása nem lehetséges, mivel ilyen magas hőmérsékleten egy anyag sem marad szilárd állapotban. Azonban ilyen magas hőmérsékleten a termikus energia már lényegesen nagyobb, mint az elektronok kötési energiája. Az anyag plazma állapotba kerül, melyben a részecskék nagy része töltéssel rendelkezik és így mágneses térrel irányítható [3].

1.4. Energiamérleg

A fúziós reaktor energiaviszonyait a Q tényezővel jellemzik.

$$Q = \frac{P_f}{P_h} \quad (1.10)$$

ahol P_h a külső plazmafűtés teljesítménye, a P_f pedig a fúzióban felszabaduló teljesítmény.

A plazma P_v energiavesztését (sugárzás, hővezetés, konvekció) egyensúlyban a külső fűtés és a fúziós teljesítményből a plazmában maradó rész fedezi. Mivel a reakcióban felszabadult energia megközelítőleg 20 %-át az α -részecskék viszik el, ideális lenne ezen részecskék felhasználása a plazma fűtésére. Amikor az α -fűtés fedezi a teljes veszteséget $Q = \infty$. Ekkor begyújtásról beszélünk. Ebből az instabil állapotból a plazma átugrik az égés

stabil állapotába, melyben a veszteségek emelkedése korlátozza a hőmérséklet további emelkedését. Ez az állapot energetikai szempontból fennmarad, amennyiben a többi körülményt (sűrűség, gázcsere) is stabilizálni tudjuk [3].

1:1 arányú homogén V térfogatú és n sűrűségű D-T plazma α -részecske fűtésének teljesítménye:

$$P_\alpha = V \left(\frac{n}{2}\right)^2 C(T) \quad (1.11)$$

A veszteségi teljesítmény:

$$P_v = \frac{V \frac{3}{2} nkT}{\tau_e} \quad (1.12)$$

τ_e az energia-összetartási idő, ami megadja, hogy a magára hagyott plazma mennyi idő alatt veszt el az energiáját.

Ahhoz, hogy képesek legyünk energiát termelni egy fúziós atomerőművel tehát a begyűjtés szükséges, ami azt jelenti, hogy az α -részecske fűtés teljesítménye meg kell hogy haladja a veszteségi teljesítményt [3]. A teljesítmények viszonya a 1.3 ábrán figyelhető meg, ahol a szaggatott vonal a veszteségi teljesítmény görbéje, a folytonos vonal pedig az α -részecske fűtés teljesítményének görbéje.

$$n\tau_e \geq \frac{6kT}{C(T)}, \quad T_{opt} = 25 \text{ keV} \quad (1.13)$$

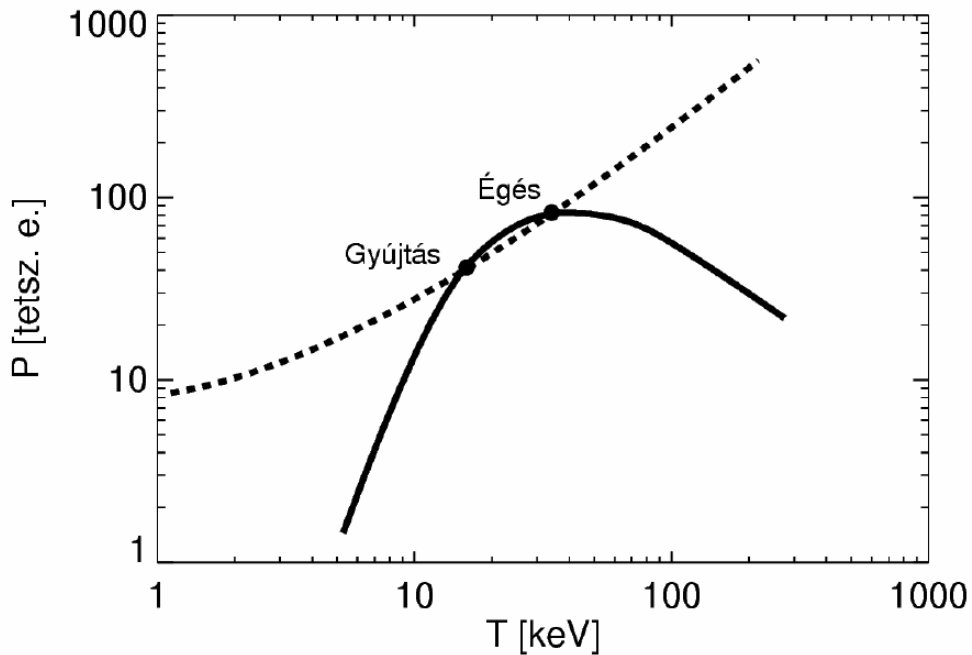
Így megkaphatjuk a Lawson-kritériumot:

$$n\tau_e \geq 10^{20} \text{ sm}^{-3} \quad (1.14)$$

A Lawson-kritérium tehát megad egy határt, amit el kell érni, ha energiát szeretnénk termelni. A teljesítéséhez nagyon nagy sűrűséget vagy minél hosszabb energia-összetartási időt kell elérjünk [3].

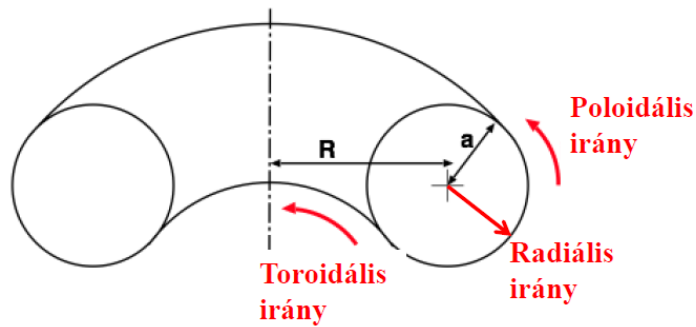
1.5. Tokamak

A fúziós kísérleteknek két fő iránya alakult ki. Az egyik, amikor nagyon nagy sűrűséget igyekeznek elérni, hogy a Lawson kritérium teljesüljön, ezek a tehetetlenségi összetartásos kísérletek.



1.3. ábra. Gyújtás és égés [4]

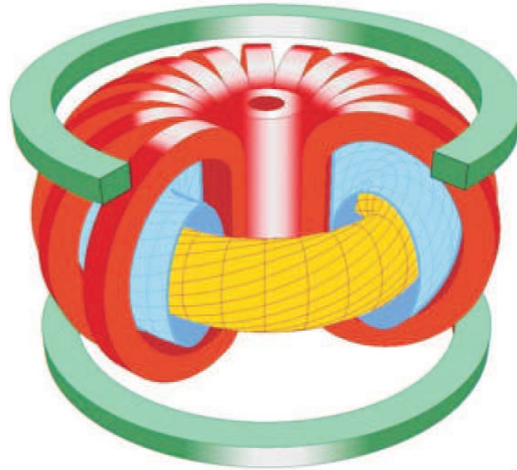
A kísérletek másik iránya, hogy mágneses összetartásos módszerrel próbálják meg növelni az energia összetartási időt. Ezek a berendezések nagyrészt olyan mágneses teret hoznak létre, amelyben az indukcióvonalak toroidálisak, így nem hagyják el a berendezést [4].



1.4. ábra. Toroidális és poloidális irányok [3]

A toroidális berendezések egyik fajtája a tokamak. A tokamakokban külső tekercsekkel toroidális indukcióvonalakat hoznak létre. Ezen kívül a kamra közepén található egy szolenoid tekercs, amellyel a berendezés tengelyében fluxus változást hoznak létre, ami toroidális áramot indukál a plazmában. Az

áram körül poloidális indukcióvonalak jelennek meg. A toroidális és poloidális irányú (az irányok szemléltetése látható a 1.4 ábrán) indukció vonalak szuperpozicionálódnak és helikálisan felcsavart erővonalrendszer jön létre, mint az a 1.5 képen is megfigyelhető [3][4].



1.5. ábra. Tokamak felépítése [3]

Ilyen helikálisan csavart mágneses térszerkezetre a plazmában megjelenő különböző driftek (a részecske populációkat egy irányban elmozdító sebességek) miatt van szükség, melyek függőleges irányban lassan szétválasztják az elektronokat és ionokat. A helikális vonalak mentén gyorsan áramló részecskék kiegyenlítik a driftek hatását.

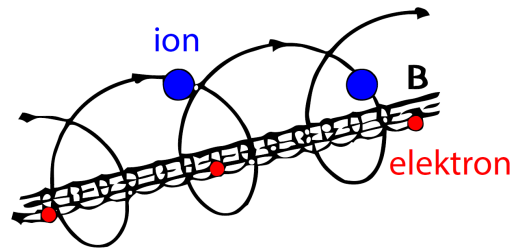
Hogy optimalizálják a veszteségeket, a berendezések méretét kellett növeljék. A diffúziós veszteségek a plazmafelület méretétől függenek, a plazma fűtési teljesítménye viszont a térfogatával arányos. Így a berendezés méretének növelésével javítani lehet a teljesítmények arányán.

Ezen kívül a tisztaság is nagyon fontos kérdés, mivel a plazmából kisugárzott energia négyzetesen nő az atommagok rendszámával. A plazma tisztításának megoldására limitereket kezdtek építeni a tokamakokba. Ez egy poloidális gyűrű, ami lehántja a legkülső plazma réteget, így csökkenti a plazma és a kamrafal érintkezési felületét. A másik megoldás erre a problémára a divertor kamra. A működési elve az, hogy további mágneses erővonalakkal elvezetik a plazmát a divertor kamrába és a plazma ott érintkezik a limiterrel [4].

Az energiatermelés megvalósításához a legfontosabb megoldandó probléma a kívánt hőmérséklet elérése. A plazmában folyó áram ohmikus fűtése nem elég a fúziós hőmérséklet eléréséhez, mivel a hőmérséklet növekedésével csökken a plazma ellenállása és így az ohmikus fűtés teljesítménye. Tehát

kiegészítő fűtések használata szükséges. Kiegészítő fűtésként használnak atomnyaláb fűtést, amely során ionokat gyorsítanak fel, majd egy gázon átlőve semlegesítik őket. A semlegesek bejutnak a plazmába, de mire a plazma belső rétegeibe érnek jó eséllyel ionizálódnak újra. Ionként ezek a részecskék a plazmában már eddig is bent lévő töltött részecskékhez hasonlóan, az indukcióvonalak mentén kezdenek haladni. Ütköznek a plazmában lévő ionokkal így energiát adva át nekik. A fűtésen kívül ez a módszer anyagpótlásra is felhasználható [4].

A töltött részecskék a plazmában nem egyszerűen az indukcióvonalakkal párhuzamosan mozognak, hanem ciklotron mozgást is végeznek melynek tengelye az indukciós erővonal. Ezt a pályát Larmor-pályának nevezik, a 1.6 ábrán látható az elvi rajza. Egy másik fűtési módszer, amikor az ionok vagy az elektronok ciklotron frekvenciájával megegyező frekvenciájú rádióhullámokkal sugározzák be a plazmát. A részecskék energiát vesznek fel a sugárzásból. Ez aztán elosztódik a részecske populációk között [4].



1.6. ábra. Larmor-pálya [3]

A tokamak kísérletek jelenlegi rövidtávú célja, hogy megépítsék az ITER-t (International Thermonuclear Experimental Reactor - Nemzetközi Kísérleti Termonukleáris Reaktor), amit az utolsó még villamos energiát nem termelő kísérletnek terveznek [5]. Németországban, Jülichben működött 2013-ig a TEXTOR (Tokamak EXperiment for Technology Oriented Research) tokamak. A TEXTOR kör keresztmetszetű limiteres tokamak. A kísérlet fő célja a plazma és a kamra fal kölcsönhatásának tanulmányozása, erre irányuló mérési módszerek fejlesztése volt.

1.6. L-H átmenet

A kiegészítő fűtések teljesítményének növekedésével a veszteségi teljesítmény nő és az energia-összetartási idő csökken. A kísérleti tapasztalatok alapján $\tau_e \sim 1/\sqrt{P_{add}}$, ahol P_{add} a kiegészítő fűtés teljesítménye. Emiatt az arányosság miatt a kiegészítő fűtés hatására a plazma hőmérséklete lassabban

emelkedik, mivel a fűtési teljesítmény növelése magával vonja a veszteségek növekedését. Ezt az összetartás degradációjának nevezik [4].

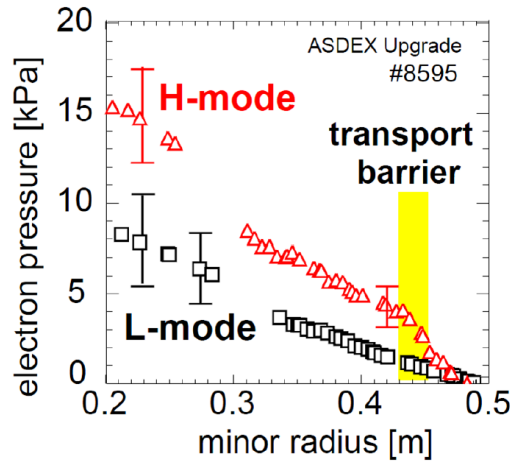
Létezik azonban egy másik jelenség is. A divertoros tokamakokban egy kritikus fűtési teljesítmény elérését követően a plazma hirtelen más állapotba kerül és az energia-összetartási ideje közelítőleg a kétszeresére növekszik. Ezen jelenség hátterében a plazmaturbulencia áll [4]. A mágnesesen összetartott plazmában az intenzív mennyiségek gradiensei mikroinstabilitásokat okoznak. Ezek az úgynevezett univerzális instabilitások, melyek dominálják a transzport folyamatokat. Jellemzően elektrosztatikus hullámok jönnek létre miattuk [3]. Itt az elektrosztatikus jelző azt jelenti, hogy a mágneses tér elsőrendben változatlan, a hullámok csak az elektrosztatikus potenciált perturbálják. Az ebből fakadó E elektromos tér azonban $v_d = E \times B / B^2$ drift sebességet kelt amely az elektronokat és ionokat azonos sebességgel mozgatja a mágneses térre merőlegesen. Mérések és numerikus modellek egybehangzóan azt mutatják, hogy az instabil hullámok lokális potenciálperturbációkat keltenek melyek körül az elektromos tér örvényszerűen áramoltatja a plazmát. Ezek az örvények a mágneses téren keresztül energia- és részecsketranszportot okoznak.

A modellek szerint a kisméretű örvények nemlineáris kölcsönhatásokon keresztül makroszkópikus áramlásokat is indukálhatnak. Ezek olyan erők lehetnek, hogy szétnyírják a plazmaszéli örvényeket, így akadályozva a turbulens transzportot a plazmán kívülre. Transzportgát jön létre a plazmaszélén. Ezt a jelenséget nevezik L-H átmenetnek. Az L (Low confinement) az alacsony összetartású mód, míg a H (High confinement) a magas összetartású mód. A két mód közti különbséget szemlélteti a 1.7 ábra. A H mód az, ahol jelen van ez a transzportgát, ami miatt a plazmaszéli nyomás profil meredekebbé válik, pedesztál jön létre, a veszteségek csökkennek [3].

Ez az állapot kedvező lehetne az energiatermelés szempontjából, azonban ebben a módban is problémát okoznak különféle makróinstabilitások. Ezek a plazma szélső rétegének vagy egészének összeomlásához vezetnek, miliszekundumok alatt elveszik a plazmában lévő összes energia. Ezek az instabilitások a szerkezet rendkívüli károsodását okozzák [6].

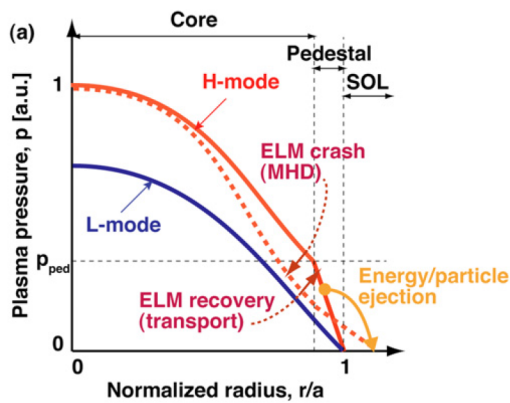
1.7. ELM-események

Az egyik ilyen instabilitás a plazma külső 10%-át érintő plazmaszéli módus (Edge Localized Mode - ELM). Az ELM zavart okoz a mágneses térben, részecske- és energiaáramlást hoz létre a transzportgát két oldala között. Az ELM-ek akkora hőterhelést okozhatnak a kamrafalon, ami már komoly károkat okozhat.



1.7. ábra. Elektron nyomás L és H módban [3]

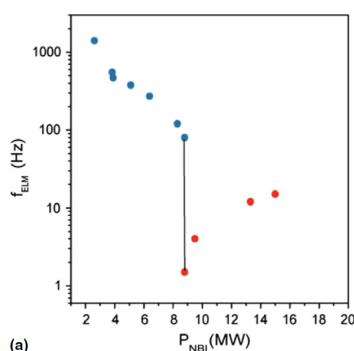
Az ITER H módban, ELM-ek jelenlétében fog működni, így rendkívül fontos a későbbi kísérletek szempontjából ezen jelenségek megértése. Az elméletek szerint, amikor a pedesztálban a nyomásgradiens elér egy korlátot egy magnetohidrodinamikai hullám instabillá válik és amplitúdója gyorsan ($100 \mu\text{s}$ vagy rövidebb időskálán) növekszik. Ennek során részecske- és energiatranszport indul a plazma külső rétegéből, az úgynevezett SOL-ba (Scrape Of Layer, a plazma külső rétege, amit már lehánt a limiter). A plazma közepét nem érinti a jelenség. A nyomásgradiens lecsökkentése után leáll az instabilitás és lassan újraépül a pedesztál és ez periódikusan ismétlődik. Ez a jelenség felhasználható lehet a plazma tisztaságának biztosítására és a sűrűség szabályozására, azonban erősen limitálhatja a szerkezet élettartamát [7].



1.8. ábra. Plazma nyomás L és H módban a plazma különböző rétegeiben [7]

Az ELM-eknek több típusa létezik. Alacsonyabb fűtési teljesítménynél a

III-as típusú ELM-ek jelennek meg. Ezt a típust magas frekvencia (néhány száz Hz) és kis amplitúdó jellemzi. Növelve a fűtési teljesítményt egy vékony teljesítmény sávban nem jelennek meg ELM-ek. Tovább növelve a fűtés teljesítményét I-es típusú, alacsonyabb frekvenciájú (néhány Hz), de nagyobb amplitúdójú ELM események következnek be [7]. Az ELM frekvenciák függése a fűtési teljesítménytől megfigyelhető a 1.9 ábrán. Ezek az ITER esetén már károsítanák a divertor elemeket, ezért energiájuk csökkentésére empirikusan több módszert fejlesztettek ki. Ezek alkalmazhatóságához az ELM fizika részletes megértése szükséges.



1.9. ábra. ELM frekvencia a fűtési teljesítmény függvényében [7]

1.8. Nyalábemissziós spektroszkópia

Egy jövőbeni reaktor üzemeltetéséhez pontosan ismernünk kellene a plazma állapotát: a részecske populációk sebességét, hőmérsékletét és sűrűségét. Jelenleg főképp azért szükséges rengeteg szempont szerint vizsgálnunk a plazmát, hogy a benne zajló jelenségeket empirikus tapasztalatok alapján elméleti eszközök segítségével megérthessük. A plazma mérésére szolgáló módszereket plazmadiagnosztikának nevezzük. Az egyik diagnosztikai módszer az atomnyaláb diagnosztika.

Ha semleges atomnyalábot lövünk a plazmába, annak atomjai gerjesztődnek. Fényt fognak kibocsájtani magukból, amelynek intenzitása a gerjesztés mértékétől függ. Mivel dominánsan az elektronok okozzák a gerjesztést a fényintenzitás mértékéből következtetni lehet az elektronsűrűsége. Fűtésre használnak hidrogén nyalábokat, azonban ennek fénye gyenge a plazmához képest. Van mód rá, hogy mégis következtessenek ebből a gyenge sugárzásból az elektronsűrűsége, azonban ha olyan atomot lőnek a plazmába, amely alapvetően nem tartozik az összetevői közé, egyszerűbb vizsgálni a sugárzást

[3]. Leggyakrabban lítium atomnyalábot használnak. Egy fűtött kerámia lítiumforrásból elektromos térrel kiszívják a lítiumionokat, amiket egy nagyobb elektrosztatikus térrel felgyorsítanak. Átengedve őket egy nátrium gőz cellán semlegesítődnek. Így egy gyors semleges nyalábot kapnak, ami be tud jutni a plazmába mivel nem hat rá a mágneses erőtér. A plazmába jutó ionok nem csak gerjesztődnek, hanem ionizálódnak is. Az ionok elhagyják a nyalábot, amely így 5 – 15 cm alatt elfogy. A plazma szélén az ionizáció még nem jelentős, ezért a megfigyelt fény közel arányos a plazma elektronsűrűségével.

Lítium nyalábemissziós spektroszkópia diagnosztikával a plazma szélén lehet mérni a plazma sűrűségeloszlását akár mikroszekundumos időfelbontással, így kiválóan alkalmas az ELM jelenség vizsgálatára.

2. fejezet

ELM prekursor rezgések vizsgálata

2.1. Célkitűzés

Dolgozatomban ELM jelenséget közvetlenül megelőző, úgynevezett prekursor rezgések vizsgálatába kapcsolódtam be a TEXTOR tokamakon, a Wigner FK és a BME NTI együttműködésében mért lítium atomnyaláb diagnosztika jelek tanulmányozásával. Korábbi vizsgálatok során megállapítást nyert, hogy az ELM-ek előtt a lítium atomnyaláb diagnosztika jeleiben gyakran tapasztalhatók gyorsan növekvő amplitúdójú rezgések, melyeket valószínűleg az ELM-et kiváltó instabil hullám okoz. Munkám célja az volt, hogy módszert dolgozzak ki a hullámok megjelenésének statisztikai vizsgálatára és nagyszámú ELM eseményből kvantitatív kijelentést tegyek előfordulásuk gyakoriságára.

2.2. ELM mérések a TEXTOR tokamakon Lítium nyalábbal

A dolgozatom adatait a TEXTOR tokamak lítium atomnyaláb diagnosztika jeleinek vizsgálatával kaptam. Bár a TEXTOR nem rendelkezik divertorral, mégis egy szűk paramétertartományban ebben a berendezésben is megjelent a H mód. Ennek a tokamaknak a H módját enyhe meredekségű pedesztál kialakulása jellemzi.

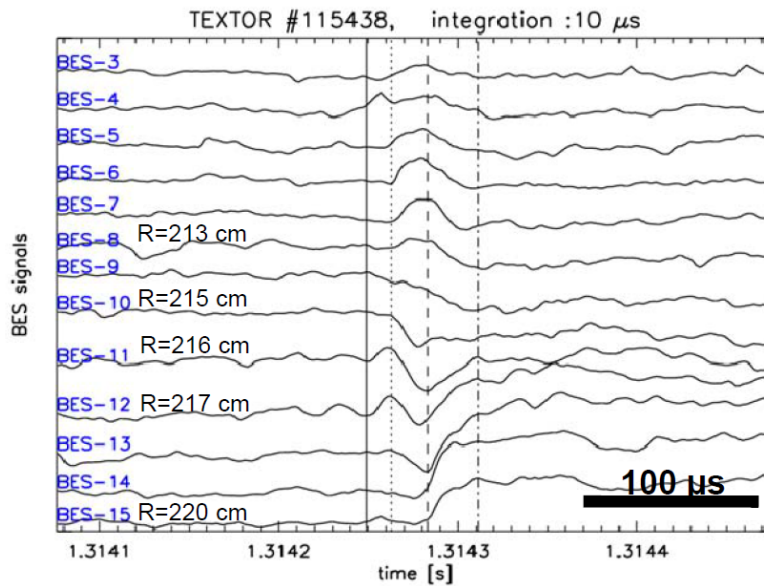
A szél- és határréteg plazmát (Scrape-off layer - SOL) és a plazmaszéli régiókat vizsgálták egy 35 keV-os lítium atomnyaláb diagnosztikával. Ezzel a nagy hatékonyságú eszközzel néhány μs -os időbeli felbontással vizsgálható

a sűrűségprofil 14 csatornán. A csatornák radiálisan 1 cm-enként vannak elosztva.

A háttérsugárzás kiszűrése érdekében a gyors nyalábszaggatás módszerét használták. 250 kHz frekvenciával megszakították a sugárnyalábot, így közel egyszerre mérve a háttér- és teljes sugárzást. A teljes sugárzásból levonva a háttér értékeit megkapható az a sugárzás, ami csak a lítium atomokból származik és amiből a sűrűségprofilra lehet következtetni. Ezzel a módszerrel 4 μs időfelbontással tanulmányozható az atomnyaláb fényének változása. Szintén megkapjuk a háttérsugárzás időbeli változását, amely a plazma és a fal kölcsönhatásának erősségéről ad kvalitatív információt.

A jelek fent leírt kezelését témavezetőm, Zoletnik Sándor dolgozta ki, a munka kezdetekor már rendelkezésre álltak 14 csatornán a háttértől megtisztított és a háttér jelek.

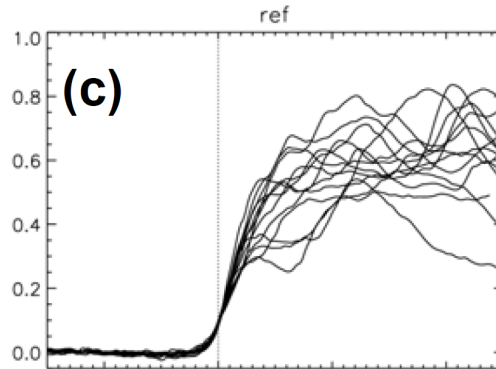
A 2.1 képen megfigyelhető a különböző csatornák viselkedése, egy ELM idején. R a tokamak középpontjától mért távolság, a tórusz középvonala $R = 175$ cm-nél van [1].



2.1. ábra. Az ELM idejében megfigyelt változások a különböző csatornákon [1]

2.3. A munka előzményei

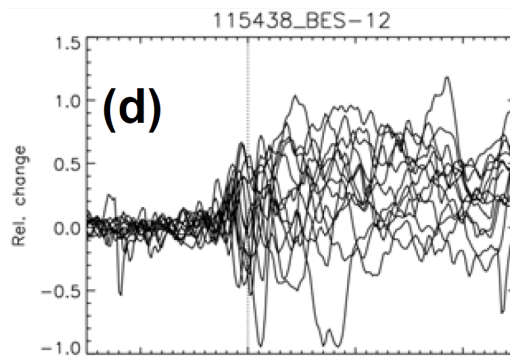
Az ELM-ek alatt a plazma-fal kölcsönhatás erősen megnövekszik, ennek hatására a lítium atomnyaláb diagnosztika háttér jeleiben minden ELM során



2.2. ábra. A referencia jelek viselkedése ELM eseményeknél [1]

egy impulzus figyelhető meg. Az adatok statisztikai elemzéséhez a 14 csatorna háttérsugárzását összevonva Zoletnik Sándor ELM referencia jelet hozott létre. Az ELM jelenség kezdetének azt az időpontot tekintette, amikor a referencia jel elért egy meghatározott szintet, ami ez egyes ELM impulzusok amplitúdójának 5 – 10 %-a. A referencia jelek viselkedése megfigyelhető a 2.2 ábrán. Az események közelítőleg 90 %-ában a referencia időpont $[-20, 10]$ μ s-os környezetében a referencia jelek ugyanolyan viselkedést mutattak [1].

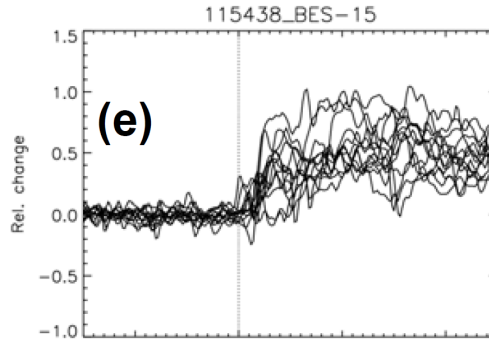
Mikor a háttérjel már emelkedik, de még az ELM esemény előtt, a pedesztál legmeredekebb részén egy mindössze 1 – 2 cm-es radiális sávban perturbáció jelenik meg a háttértől megtisztított lítium atomnyaláb jelben, 30 – 50 kHz frekvenciával. Ez a 2.3 képen is megfigyelhető prekurzor rezgés, melynek összefüggését vizsgáltam az ELM-ekkel. A 2.3 ábra egy mérőcsatornán mutatja több ELM jelét a referencia időpontok egybeesésével.



2.3. ábra. Prekurzor rezgések az ELM események előtt[1]

A feldolgozás nehézsége, hogy ezekre a rezgésekre nem jellemző állandó amplitúdó és élettartamuk igen rövid, mindössze 1-2 periódus idejéig megfigyelhetők. A SOL rétegben jelentős sűrűségváltozás láthatólag késéssel mu-

tatkozik, ahogy az a 2.4 ábrán is látszik, tehát az ELM kiváltó oka a pedesztál meredek részén kell legyen, de néhány $10 \mu\text{s}$ alatt a felnövekvő instabilitás már a SOL-ba juttatja a plazmát [1] [8].



2.4. ábra. Sűrűségváltozás [1]

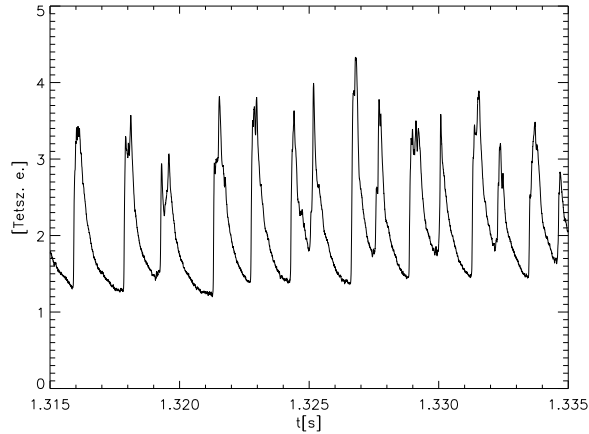
2.4. Adatfeldolgozás módszere

Az adatok feldolgozását tipikusnak mondható ELMek kiválasztásával kezdtem. Ehhez egy programmal kirajzoltattam egy olyan mért jelet a 115438-as számú TEXTOR kisülésből, amelyen az ELM impulzusok jól láthatók. Erre mutat példát a 2.5 ábra. Az ELMek közül kiválasztottam statisztika végzéséhez megfelelő mennyiségű tipikusnak mondhatót.

- Az előző ELM lecsengése után indulnak;
- Felfutásuk nem mutat dupla csúcsos vagy más irreguláris szerkezetet.

Az ELM kezdetét manuálisan (egérrel) kijelöltem. Így kaptam 170 darab közelítő ELM időt. A statisztikus feldolgozáshoz ezeket az időpontokat a program a fent leírt módon pontosította.

Ezeket az időpontokat elmentettem. A továbbiakban a 9, 10, 11, 12, 13 és 14-es csatorna háttérsugárzástól megtisztított jeleivel dolgoztam. A csatorna számozás a plazmából kifelé haladva növekszik, a limiter sugár a 12-13-as csatorna körül van. A H-mód pedesztál ennél kicsit beljebb, a 10-11-es csatornáknál van. A jelekben a tapasztalatok alapján két időablakban kerestem rezgéseket. Mivel a 0 pont az ELM kezdete volt, az ELM-eket a $[0, 250 \cdot 10^{-6}]$ s-os tartományban kerestem. Ez a tapasztalatok alapján megfelelő hosszúságú idő ablak. A prekursor rezgéseket kezdetben a $[-100, 0]$ μs -os idő intervallumban kerestem.



2.5. ábra. Példa az ELM-ek kiválasztására szolgáló jelről.

2.5. Prekurzorok

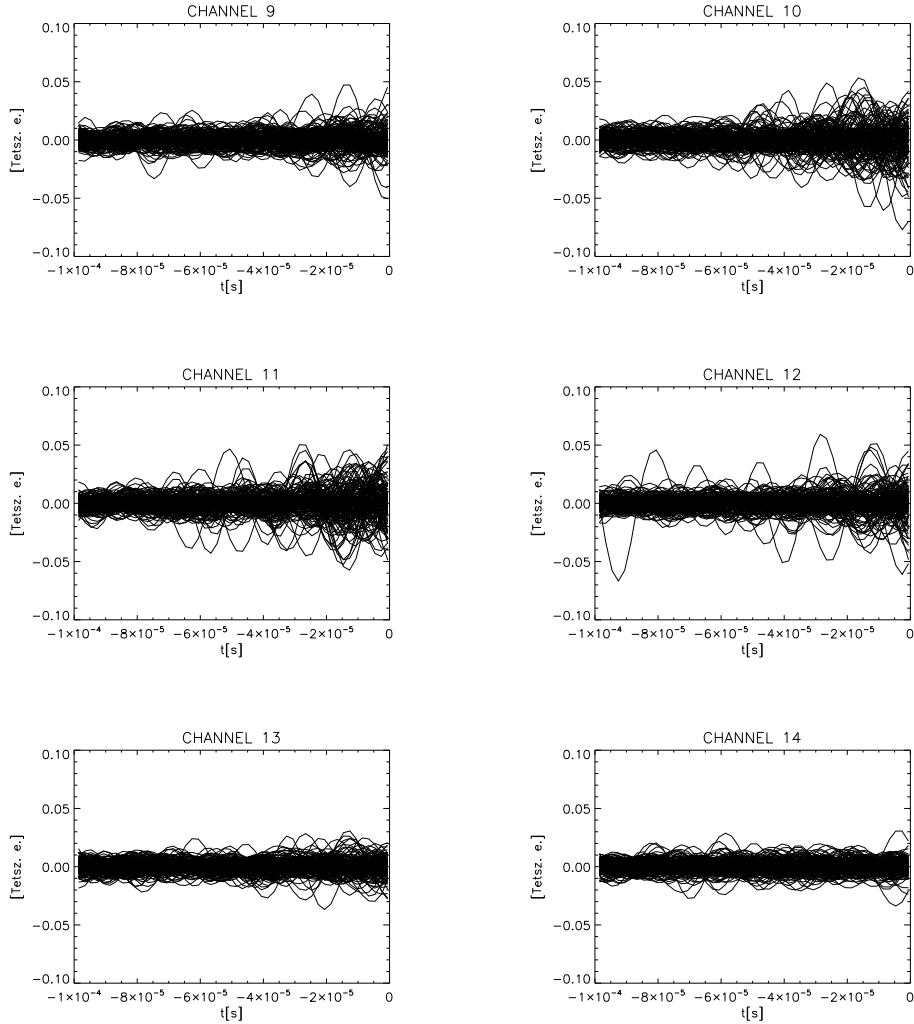
A prekursor rezgéseket a 40 kHz körüli tartományban kerestem, ehhez sávfrekvenciaszűrőt használtam. A legideálisabb szűrési tartomány kiválasztásához, több sáv szélességet kipróbáltam. Keskeny sáv szélességnél (10 kHz) a szűrő túl szelektív, a változó prekursor frekvenciák esetén nem optimális. Ráadásul a gyors amplitúdó növekedés miatt a prekursorok sáv szélessége sem keskeny. Túl nagy sáv szélességnél a zajok megnövekednek. A 20-60 kHz sáv mutatkozott legalkalmasabbnak a vizsgálatokra.

Ahogy az ELM-ek, a prekursor rezgések is bizonyos csatornákon jelennek csak meg. A tendenciák megfigyelése érdekében először csatornánként egymásra rajzoltam a prekursorok idejében megfigyelt rezgéseket. A jelek egymáson ábrázolását a $[-100, 0]$ μs -os ablakban végeztem, ahol az ELM fentebb közölt módon megállapított kezdési ideje volt a viszonyítási pont.

A 2.6 ábrákon jól megfigyelhető a tendencia, hogy az időablak második felében megnövekszik a rezgések amplitúdója. A tendencia csatornánként változó, a 10,11-es csatornában a legerősebb, míg a SOL-ban a 13-as csatornában alig látszik.

2.6. ELM-ek

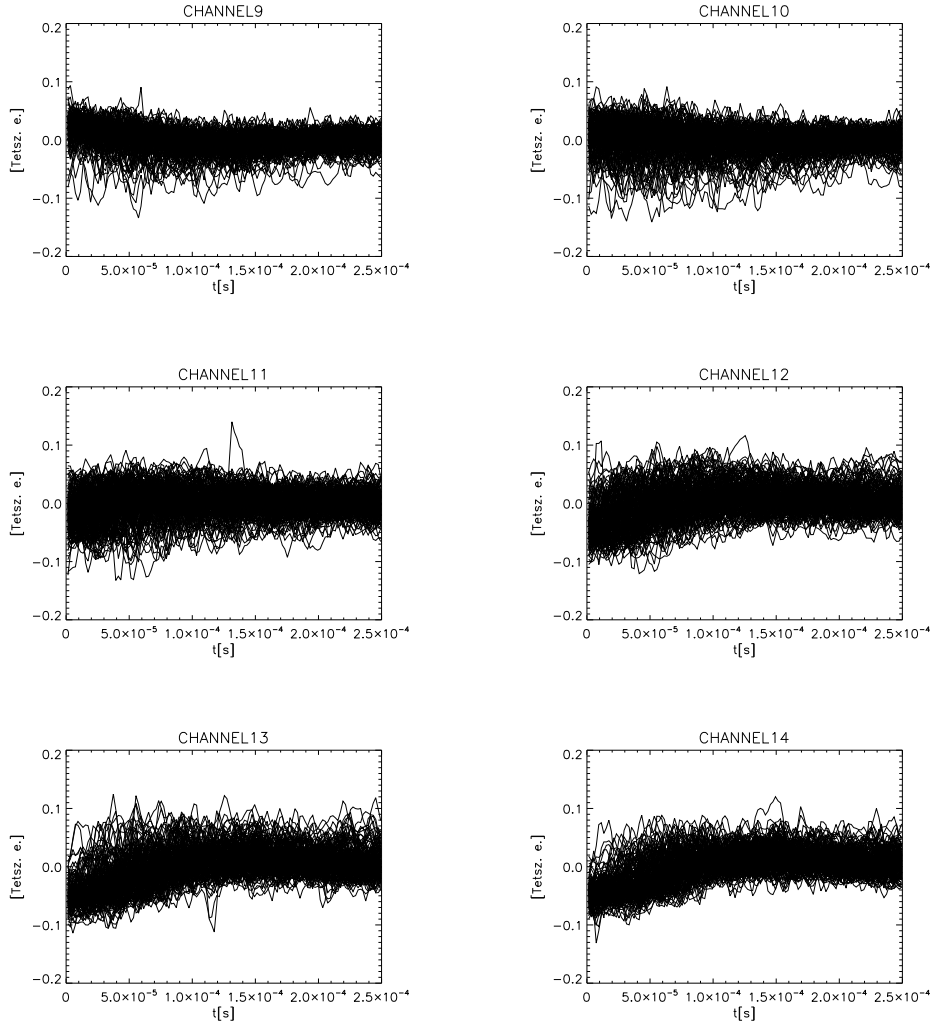
A 2.7 ábrákon az ELM időkből felvett rezgések láthatók egymáson ábrázolva.



2.6. ábra. A különböző csatornákon az ELM előtt megjelenő rezgések egymáson ábrázolva.

2.7. Prekursor eloszlás

Mivel a prekursor rezgések rövidek és nem állandó amplitúdójúak, jellemzésükre ideálisnak a bennük rejlő energia tűnt. Az energia kiszámításához beolvastam a mért teljes, háttérsugárzástól megtisztított jeleket és alkalmaztam rájuk a sávszűrő eljárást. Az egyes ELM-ek előtt két időablakban vizsgáltam a jeleket: a $[-100, -50] \mu\text{s}$ az ELM perukzor előtti szakasz, míg a $[-50, 0] \mu\text{s}$ a prekursorok megjelenésének tipikus ideje. Ezeket az időablakokat a prekursorok egymáson ábrázolásából származó megfigyelések alapján alkalmaztam.

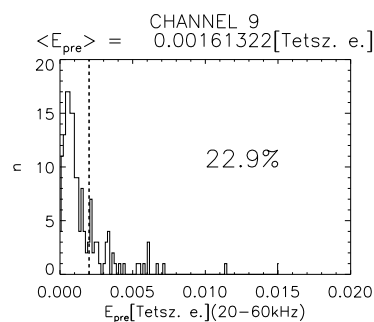
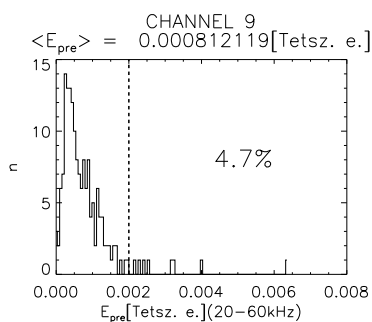


2.7. ábra. A különböző csatornákon ELM időben megjelenő rezgések egymáson ábrázolva.

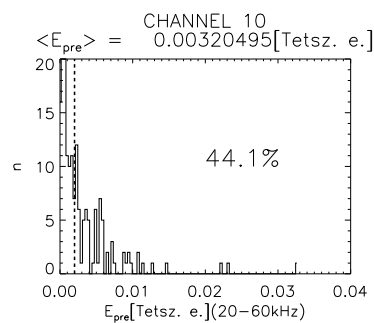
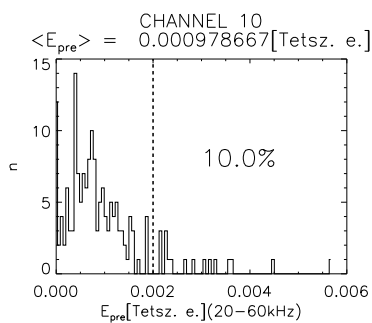
Mindkét szakaszban kiszámoltam az átlag jeltől való eltérés négyzetösszegét, ezt tekintetem az adott szakaszban mérhető prekursor energiának.

Ezután ábrázoltam ennek az energia értéknek az eloszlását a különböző csatornákon a megfelelőnek mutató 20 – 60 kHz-es frekvenciaszűrés után. Az ábrákon az alsó tengelyen található az energia értékek, a függőleges tengelyen pedig az olyan ELM-ek száma, amelyeket adott energiájú prekursor előz meg. Az ábrák felett az energiák átlaga van feltüntetve.

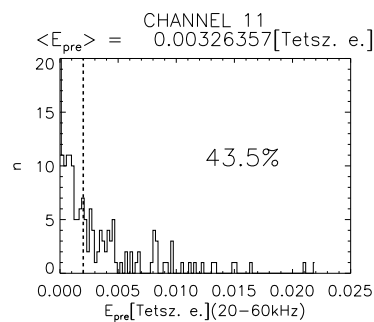
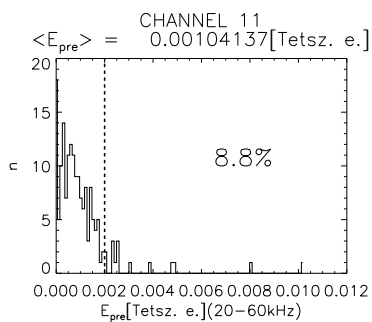
A 2.8, 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13 ábrák a $[-100, -50]$ μs -os és $[-50, 0]$ μs -os



2.8. ábra. 9-es csatorna rezgéseinek eloszlása a $[-100, -50]$ és $[-50, 0]$ μ s időablakban

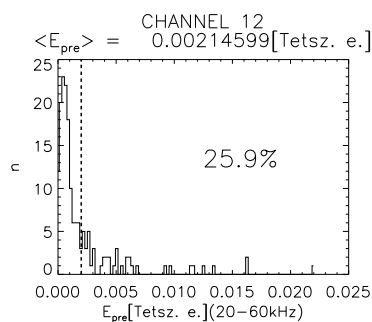
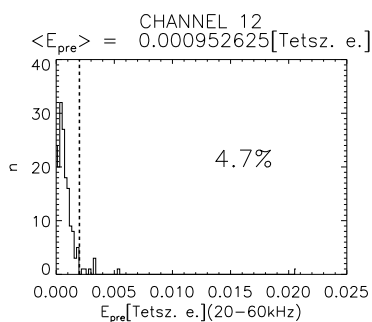


2.9. ábra. 10-es csatorna rezgéseinek eloszlása a $[-100, -50]$ és $[-50, 0]$ μ s időablakban

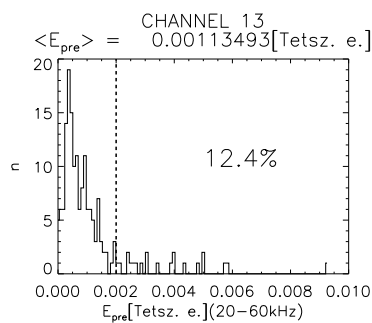
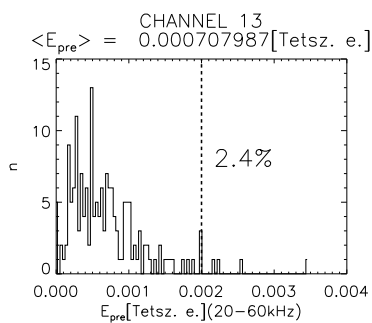


2.10. ábra. 11-es csatorna rezgéseinek eloszlása a $[-100, -50]$ és $[-50, 0]$ μ s időablakban

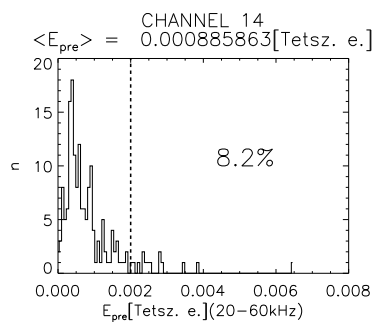
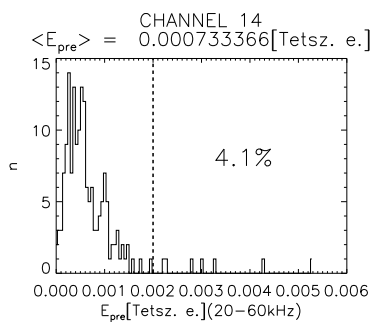
időablakban mutatják a rezgések energiájának eloszlását. Minden csatornán megfigyelhető, hogy 0,002-ig terjed a zavarok energiája. Ezt szaggatott vonal-



2.11. ábra. 12-es csatorna rezgéseinek eloszlása a $[-100, -50]$ és $[-50, 0]$ μs időablakban



2.12. ábra. 13-as csatorna rezgéseinek eloszlása a $[-100, -50]$ és $[-50, 0]$ μs időablakban



2.13. ábra. 14-es csatorna rezgéseinek eloszlása a $[-100, -50]$ és $[-50, 0]$ μs időablakban

lal meg is jelöltem az ábrákon, valamint feltüntettem, hogy az ELM-ek hány százaléka rendelkezik a zaj maximális energiájánál nagyobb energiájú prekur-

zorral. Az egyes csatornákhöz tartozó két időablakban megfigyelt eloszlásokat egymás mellett tekintve jól látható, hogy az ELM-hez közelebbi időablakban sokkal több zaj energiaszint feletti rezgés található, különösképpen a 10, és 11-es csatornákon, ahogy ez már a jelek egymáson való ábrázolásából is látható volt.

Az ábrákon megfigyelhető, hogy az esetek közelítőleg 30%-ában lesznek 0,002-nél nagyobb energiájú rezgések. Ez már olyan mennyiség, amelyet valószínűtlen, hogy a zaj okozna.

2.8. Prekurzorok és ELM-ek közti összefüggés

A jelvizsgálat igazi célja az volt, hogy összefüggéseket fedezzünk fel a prekurzor rezgések és ELM-ek között. Kapcsolat keresés céljából az ELM időben található rezgések energiáját is kiszámítottam. Ezt a prekurzoroknál ismeretett módon végeztem csak az ELM időkben vizsgált jeleket nem szűrtem meg.

Így már mindkét rezgés fajtáról voltak összehasonlítható adataim. Ezeket ábrázoltam egymás függvényében. Az alsó tengelyen az ELM időben megfigyelt rezgés energiája látható, a függőleges tengelyen a prekurzor időben megfigyelt rezgés energiáját ábrázoltam. Az ábrák felett az átlagos energiákat tüntettem fel. Így az egyes ELM időben történő rezgések energiájához, az előttük lévő prekurzor idejű rezgés energiáját rendeltem, ez alapján vizsgálva, hogy milyen összefüggés figyelhető meg köztük.

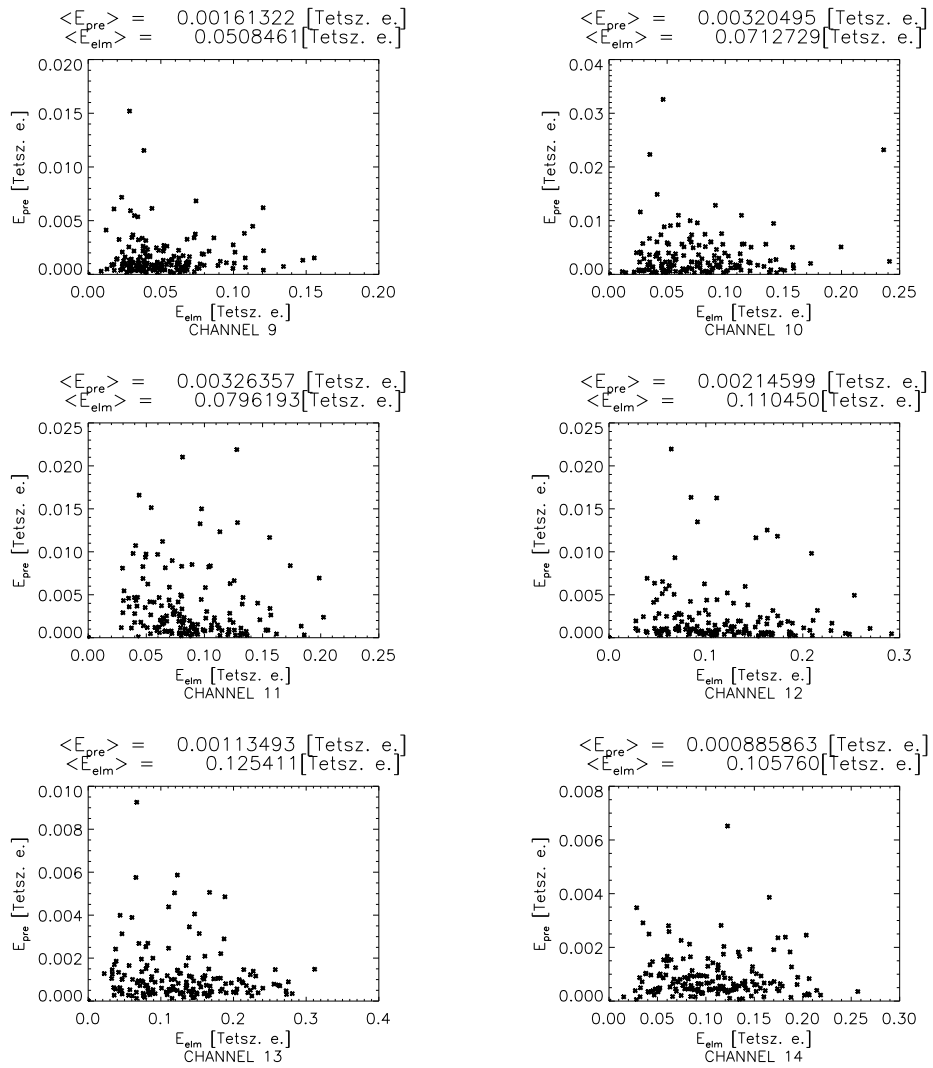
A 2.14 ábrákon látható, hogy az ELM energiák függetlennek mutatkoznak a prekurzor energiáktól.

2.9. Következtetések

A fenti eredményekre két magyarázat mutatkozik. Vagy csak az ELM-ek egy része előtt vannak prekurzor rezgések, vagy azért csak 30%-ban láthatók prekurzorok, mivel ez egy lokális jelenség, nem az egész tokamakban figyelhető meg.

Az, hogy nem minden ELM előtt jelennek meg prekurzor rezgések nem tűnik valószínűnek, mivel megjelenésük egyértelműen az ELM-ek előtt van. Ezenkívül az ELM-ek sűrűségváltozása a prekurzor folytatásának tűnik.

Ha a prekurzorok nem az egész tokamakra kiterjedő jelenségek, akkor a statisztika alapján a toroidális kör közelítőleg harmadát érintik. Ez esetben



2.14. ábra. A különböző csatornákon megfigyelt ELM-ek és őket megelőző prekursor rezgések energia összefüggése

az elméletek megalkotásánál figyelembe kell venni a "balloning" típusú perturbációkat is.

3. fejezet

Összefoglalás

A fúziós kísérletek és egy jövőbeni fúziós reaktor működtetése szempontjából létfontosságú a fúziós plazmában megjelenő ELM események körülményeinek megértése. Ehhez egy fontos lépés a ELM instabilitások előtt megfigyelt prekuzor rezgések empirikus vizsgálata. Dolgozatom célja egy statisztika készítése volt ezekről a prekuzor rezgésekről, ami alapján összefüggésekre lehet következtetni a megjelenésük és az ELM események között. Munkámat megelőző cikkekből már látható volt, hogy a prekuzorok a pedesztálnál lévő plazma perturbációi, amik aztán a SOL rétegbe lökik a plazmát.

Témavezetőm Zoletnik Sándor munkáját folytatva vizsgáltam az ELM közeli idejű jeleket. Ehhez rendelkezésemre álltak a TEXTOR tokamak lítium atomnyaláb diagnosztika háttérsugárzástól megtisztított jelei számos csatornán, amik radiálisan lefedték az ELM-ek és prekuzorok szempontjából lényeges, pedesztál és SOL rétegeket. Zoletnik Sándor programja segítségével manuálisan kiválasztottam 170 tipikusnak mondható ELM-et a jelekben. Ugyanezen program segítségével pontosítottam az ELM-ek kezdetének idejét. Ezeket az idő adatokat elmentettem és a továbbiakban ezek segítségével készítettem statisztikát.

Első lépésben egy $[-100, 0]$ μs -os időablakot vizsgáltam viszonyítási pontnak a pontosított ELM kezdőidőpontokat tekintve. Az ebben az időszakban megjelenő rezgéseket egymáson ábrázoltam, frekvenciaszűrés elvégzése után. Korábbi cikkek és tapasztalatok alapján a prekuzor rezgések 40 kHz környékén figyelhetők meg. E körül a frekvencia szint körül szűrtem meg a jeleket többféle sáv szélességgel. Ezek közül ideálisnak a 20 – 60 kHz-os szűrés mutatkozott. Az ELM-eket megelőző rezgéseket egymáson ábrázolva megfigyelhető, hogy közelítőleg a $[-50, 0]$ μs -os időablakban növekedik meg a rezgések amplitúdója, legerőteljesebben a 10-es és 11-es csatorna jelein, amik a plazma pedesztál rétegében helyezkednek el.

Folytatásként a prekuzorok jellemzéséhez energiaértéket rendeltem hoz-

zájuk. Energiának a jel értékek átlagtól való eltérésének négyzetösszegét tekintettem. A kezdeti $[-100, 0]$ μs -os időablakot az egymáson való ábrázolás tapasztalatai alapján két részre bontottam. A $[-100, -50]$ μs időablakban a zaj figyelhető meg. A energiaértékeknek ábrázoltam az eloszlását ezen az időintervallumon. A hisztogramokon jól megfigyelhető, hogy a zaj energiaszint közelítőleg 0,002-ig terjed.

Ezt követően az előbbihez hasonlóan a $[-50, 0]$ μs időablakban megfigyelt rezgésekre is energia eloszlás hisztogramokat készítettem, az ábrákon jelölve a 0,002-es zajszint határt. Kiszámoltam, hogy a $[-50, 0]$ μs -os tényleges prekursor időben lévő rezgések hány százaléka haladja meg a zajszint határt. Ezen adatok alapján is nyilvánvaló, hogy a prekursor tevékenység a pedesztál (10, 11-es csatorna) réteget érinti. Az eredmények alapján az esetek közelítőleg 30%-ában figyelhetők meg az ELM-ek előtt prekursor rezgések.

Mivel a dolgozat célja a prekursorok és ELM-ek közti összefüggések keresése volt, az ELM-ek energiáját is kiszámoltam a fentebb leírt módszerrel. Ezután az egyes ELM-ek energiájához az előttük megjelenő prekursor energiáját rendeltem és ábrázoltam az összefüggést. Ezen ábrák alapján megállapítható, hogy az ELM-ek energiája nem függ az őket megelőző prekursor rezgés energiájától.

4. fejezet

Fejlesztési lehetőségek

A dolgozatban leírt egyszerű módszer is érdekes és hasznos információkat szolgáltatott, azonban számos módon továbbfejleszthető. A statisztika javítható több csatorna együttes kezelésével. A kapott eredmények összehasonlíthatók más diagnosztikákon kapott eredményekkel, célszerű lenne korreláció vizsgálatokat végezni.

A jövőben további statisztikák készítése indokolt más tokamakokból származó adatokon, mint például a KSTAR tokamak hidrogén nyalábemissziós, vagy az ASDEX Upgrade tokamak lítium atomnyalábos mérési adatain.

A feldolgozásnál tipikus ELM-ek halmazán dolgoztunk, érdemes lehet megvizsgálni az atipikus, időben egymáshoz közel elhelyezkedő ELM-eket.

Köszönetnyilvánítás

Ebben a fejezetben szeretném kinyilvánítani hálámat a témavezetőm Dr Zoletnik Sándor és konzulensem Dr Pokol Gergő felé. Mindketten rengeteg segítséget nyújtottak, mind a felkészüléshez, mind a dolgozat megírásához. Tapasztalataik alapján építő kritikákkal segítettek munkámat. Lényegében Dr Zoletnik Sándor munkáját folytattam és az adatfeldolgozó program megírásában is nagy segítségemre volt. Mindezekért szeretnék köszönetet mondani nekik!

Irodalomjegyzék

- [1] S. Zoletnik, Cs. Buday, D. Dunai, S. Kálvin, A. Kramer-Flecken, Y. Liang, G. Petravich, S. Soldatov, J. erson, D. Réfy, and TEXTOR Team. Dynamics of the Electron Density Profile and Plasma Turbulence during the L - H transition and ELMs in TEXTOR. *39th EPS Conference and 16th Int. Congress on Plasma Physics*, page O3.107, 2012.
- [2] D. Dunai, S. Zoletnik, G. Anda, G. Petravich, S. Kálvin, J. Sárközi, A. Kramer-Flecken, B. Schweer, S. Soldatov, , and the TEXTOR team. Turbulence properties of the edge plasma at TEXTOR measured by Beam Emission Spectroscopy. *36th EPS Conference on Plasma Phys. Sofia, June 29 - July 3, 2009 ECA*, 33E:P–1.182, 2009.
- [3] Pokol Gergő, Zoletnik Sándor, Papp Gergely, and Horváth László. *Bevezetés a fúziós plazmafizikába, Egyetemi jegyzet*. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2014.
- [4] Berei Klára, Fülöp Zsolt, Gyürky György, Horváth Dezső, Inzelt György, Klencsár Zoltán, Környei József, Köteles György, Krasznahorkay Attila, Lévy Béla, Radnóti Katalin, Sáránci István, Schiller Róbert, Szatmáry Zoltán, Szilvási István, Tóth Gyula, Vértes Attila, Wojnárovits László, Zaránd Pál, and Zoletnik Sándor. *Szemelvények a Nukleáris Tudomány Történetéből*. Akadémia Kiadó, 2009.
- [5] Zoletnik Sándor. Útban a JET-től az ITER felé. <http://magfuzio.hu/utban-a-jet-tol-az-iter-fele/>, 2009.
- [6] John Wesson. *The science of JET*. JET Joint Undertaking, 2000.
- [7] K. Kamiya, N. Asakura, J. Boedo, T. Eich, G. Federici, M. Fenstermacher, K. Finken, A. Herrmann, J. Terry, A. Kirk, B. Koch, A. Loarte, R. Maingi, R. Maqueda, E. Nardon, N. Oyama, and R. Sartori. Edge localized modes: recent experimental findings and related issues. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 49:S43–S62, 2007.

- [8] S. Zoletnik. Li-BES measurements of TEXTOR limiter H-mode measurement on 3 May 2011. 2011.

