

Turbulencia tokamakban és tokamak körül

Zoletnik Sándor

KFKI RMKI

1121 Budapest, Konkoly Thege u. 29-33. Tel: (06 1) 3922753 E-mail:

Ez a cikk a Magyar Nukleáris Társaság 2009-es közgyűlésén a Simonyi Emlékplakett díjhoz kapcsolódó előadás leírt változata. Sajnos az elmúlt egy év hektikus volt, számtalan azonnali megoldást igénylő feladattal, ezért a cikk megírása váratott magára egy évet. Ez alatt a témában új fejlemények is történtek, melyeket ez az írás már tartalmaz.

Az előadás témája nagyrészt a plazmaturbulencia, mely mai tudásunk szerint a mágnesesen összetartott plazmákban a részecskék és a hő transzportjáért nagy részben felelős. Áttekintjük a téma állását, és hogy hova remélünk eljutni a következő években. A cím második fele nem annyira a tudományra, mint inkább a legnagyobb szabályozott magfúziós kísérlet, az ITER helyzetére utal. Ennek előrehaladása kulcsfontosságú és az elmúlt évek turbulenciái után remélhetőleg most már nyugalmasabb előrehaladást fog mutatni.

Bevezetés

Az idén éppen tíz éve van, hogy a Magyar EURATOM Fúziós Szövetség [1] a szerző vezetésével megkezdte működését. Ezt az tette lehetővé, hogy Magyarország 1999-ben belépett az EURATOM együttműködésbe, és ezzel megnyílt az út az európai munkamegosztásban való részvételre. Ennek keretében a magyar kutatóközösség a plazmadiagnosztikára és ezen belül is két témára szakosodott: a plazmába lőtt szilárdtest pelletek párolgására és a plazmaturbulenciára. Tíz évvel ezelőtt a közösség kettő egész és három fél kutatóból állt, a háttér az egy évvel előtte lebontott MT-1M tokamakon, valamint különböző német együttműködésekben elért eredmények adták. Azóta nagy utat tettünk meg: ma körülbelül 70 magyar fizikusnak és mérnöknek van valamilyen köze a szabályozott magfúziós kutatásokhoz, az ember-év ráfordítás 35 körül van évente.

Ez a fejlődés öröme igen, de ünneplésre nem ad okot, hiszen az aktív részvételünkkel zajló európai fúziós kutatások előtt óriási kihívások állnak. Ezek közül legnagyobb az ITER [2] berendezés megépítése, amely a tervek szerint 500 MW fúziós teljesítményt lenne képes demonstrálni 500 másodperces impulzusokban. Ezzel megvalósulna a fúziós energiatermelés fizikai-technikai demonstrációja, és a következő lépés a gyakorlati megvalósítás lenne.

Transzport mágneses fúziós berendezésekben

A szabályozott magfúziós folyamatok energetikai hasznosításához 100 millió Kelvin hőmérsékletű, plazma állapotú deutérium-trícium (DT) keveréket kell összetartani, fűteni és szabályozni gyakorlatilag állandósult állapotban. A fúziós reakciókban hélium atommagok (alfa részecskék) keletkeznek 3,5 MeV energiával. Ezeket és magát a plazmát a mágneses térnek hosszú ideig egyben kell tartania, hiszen a plazma alfa részecskék általi fűtése a leggazdaságosabb módja lenne a hőmérséklet fenntartásának. A mágneses téren

keresztül tehát a részecsketranszport (diffúzió) kellően alacsony kell, hogy legyen. Ezzel szemben amint az alfa részecskék leadták energiájukat, gyorsan el kellene őket távolítani a plazmából, hiszen szennyezésnek számítanak. A fúziós berendezésekben tehát a részecskék transzportsebességének egy meghatározott tartományban kell lennie, hogy a veszteség ne legyen túl nagy, viszont a keletkező hélium és más, a plazmába kerülő szennyező kellő sebességgel diffundáljon kifelé.

Szerencsére ez a feltétel elvileg megvalósítható, mivel a DT fúziós reakciók sebessége kicsi. Példaként véve az ITER berendezést, 500 MW fúziós teljesítmény mellett a reakcióráta $N_{DT}=3 \times 10^{20}$ [s⁻¹]. Az ITER plazma térfogata kb. 1000 m³, tehát köbméterenként és másodpercenként $n_{DT} = 3 \times 10^{17}$ reakció történik. A tervezett $n = 10^{20}$ m⁻³ plazma ionsűrűség mellett ez azt jelenti, hogy a plazma $n/(2n_{DT}) \approx 150$ másodperc alatt fogyasztja el a kamrában levő üzemanyagot, ennyi idő alatt kellene az alfa részecskéket is eltávolítani. Az energiamérleg viszont akkor lesz pozitív, ha kielégítjük az $n\tau_E > 10^{20}$ [m⁻³s] Lawson kritériumot [3], amiből a τ_E energia-összetartási időt a τ_p részecske-összetartási idővel egyenlőnek véve az ITER-re $\tau_p \approx 1$ s minimális érték adódik. Világos tehát, hogy energetikailag pozitív, állandó üzemű reaktort lehetne építeni, ha a részecske- (és energia-) összetartási idő valahol a néhány másodperc vagy néhány tíz másodperc tartományban lenne.

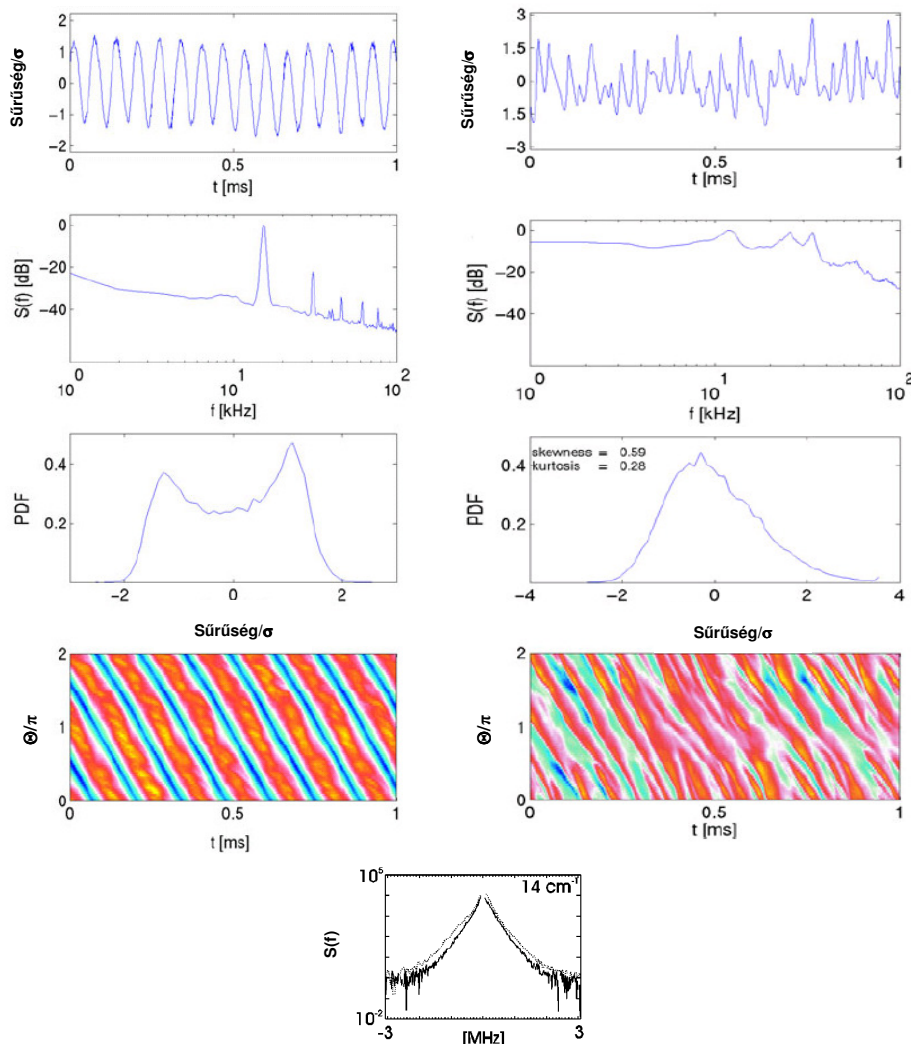
A tokamak berendezések geometriájában az úgynevezett neoklasszikus transzport elmélet adja meg a részecskék páronkénti ütközéséből eredő, mágneses téren keresztüli effektív diffúziós együtthatót. Az ITER berendezésre ez — a feltett paramétereiktől függően — 100-1000 másodperces részecske-összetartási időt ad [4], ami lényegesen hosszabb, mint az energetikai megfontolások által megkívánt 1-10 másodperces minimális érték és arra utal, hogy inkább a hélium diffúziója lenne a probléma, mint az energiavesztés. A valóságban ez sajnos nem így van, már az évtizedekkel ezelőtt végzett kísérletek is kimutatták, hogy az energia- és a

hődiffúzió sokkal nagyobb a neoklasszikusan számolt értéknél. A gyorsabb diffúzió oka a részecskék kollektív viselkedésében keresendő. Ez azt jelenti, hogy a plazmában kisméretű örvények, hullámok vannak és ezek transzportálják a részecskéket és az energiát. A helyzet hasonló a cukros tea viselkedéséhez, ahol a kockacukorból csak nagyon lassan diffundál szét a cukor, keveréssel, tehát kollektív örvénylő mozgással kell segíteni neki. A tokamakokban a plazma maga szolgáltatja a milliméter-centiméter méretű örvényeket különböző instabilitásokon keresztül.

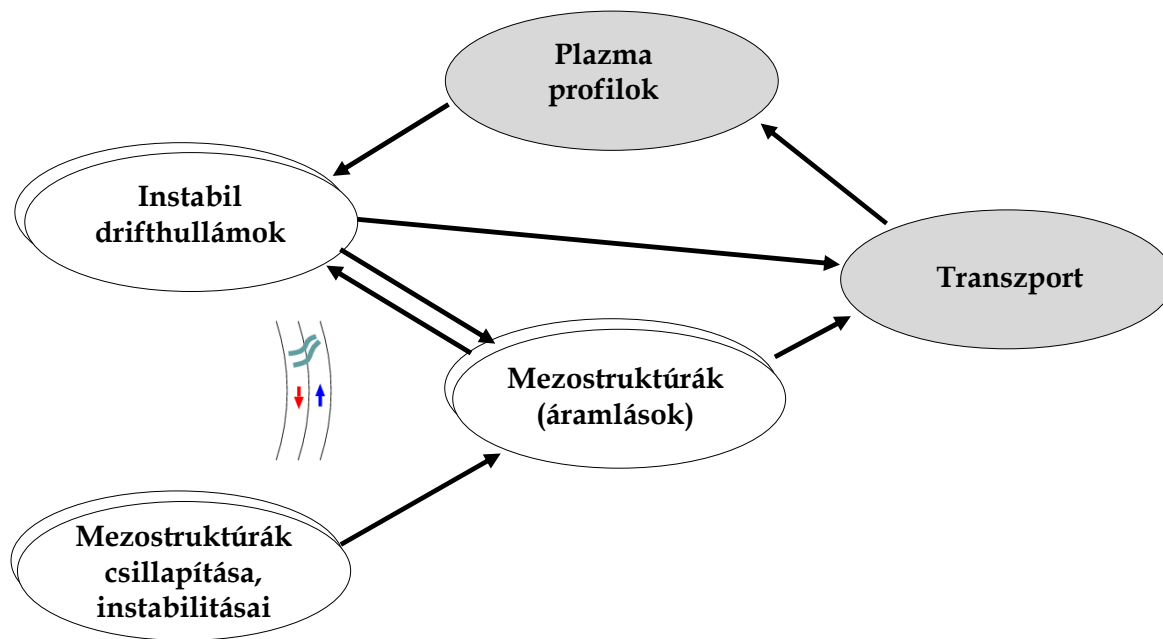
A lehetséges instabilitásokra több lehetőség is van, de ezek mindegyikét a plazmán belüli inhomogenitások hajtják. Az úgynevezett „drift hullámokat” [5] a plazma belső tartományában tartják felelősnek. Maga a hullám a sűrűség gradiens miatt képes stabilan létezni, azonban más inhomogenitások teszik őket csak instabillá. A jelenség alapvető tulajdonsága, hogy különböző hullámhosszak egész

tartománya képes instabillá válni és a különböző méretű hullámok egymással nemlineárisan kölcsönhatnak. A mechanizmust jól preparált, lineáris geometriájú laboratóriumi kísérletekben részletesen vizsgálták (1. ábra) és kimutatták, hogy elég erős destabilizáló hatás mellett turbulens viselkedés alakul ki [5], mely a plazmaparaméterek (pld. sűrűség) véletlenszerű fluktuációjában nyilvánul meg. Ilyen fluktuációkat valóban lehet is mérni a tokamak plazmában, bár erre speciális módszereket kellett kifejleszteni.

Minden jel arra utal tehát, hogy a tokamak plazmában kifejtett turbulenciával van dolgunk, ez határozza meg a részecskék és a hő transzportját [7]. A mért effektív transzportsebességek sokkal nagyobbak a neoklasszikus értéknél, az ITER esetén például az energia-összetartási időt néhány másodpercre becsülik, amely legalább két nagyságrenddel kisebb a neoklasszikus becslésnél.



1. ábra: Drift hullámok aktivitása alacsonyhőmérsékletű plazmakísérletben a gerjesztés két értékénél. [5] Az ábrák értelmezése fentről lefelé: sűrűség időbeli változása, teljesítmény-spektruma, valószínűség-eloszlása (PDF) és téridőbeli változása. A baloldali oszlopban kis gerjesztésnél egy domináns hullám jelenik meg, míg a jobb oldalon sok hullám együttes jelenléte kifejtett turbulens viselkedést mutat. Ilyen turbulens jellegű az alsó ábrán bemutatott, a W7-AS sztellarátorban végzett saját méréseiből származó sűrűségfluktuáció spektrum is. ($k = 1 \text{ cm}^{-1}$ hullámszámmal [6].)



2. ábra: Kölcsönhatások a turbulencia-áramlás-profil rendszerben.

Turbulencia és áramlások

Az elmúlt évtizedben a drifthullám turbulenciára számos numerikus szimuláció született, amelyek különböző elméleti alapon (kinetikus, folyadék) és különböző effektusok figyelembevételével vizsgálják a plazmaturbulenciát. A számítások geometriája sokszor erősen egyszerűsített, a határfeltételek nem veszik figyelembe a plazma határán zajló atomfizikai folyamatokat és egyes plazmaparaméterek számítása sem mindig önkonzisztens. A redukált probléma ellenére a számítások rendkívül erőforrás-igényesek, a világ legnagyobb számítógépein futnak. Az ilyen modellek alapján számolt transzportegyütthatók nagyságrendi egyezést mutatnak a mérésekkel. A számítások azonosították azokat a mechanizmusokat is, amelyek fontos elemei a plazmaturbulenciának.

Az egyik döntő mozzanat volt, amikor 2000-ben A. M. Dimits és munkatársai azt találták [8], hogy a turbulencia által okozott hőtranszport nem ugrik fel azonnal, amikor a plazma hőmérséklet-gradiense eléri az instabilitás kritikus határát, hanem egy meredekebb gradiensenél növekszik csak fel a kísérletileg tapasztalt érték közelébe. A szimulációs eredmények vizsgálata után arra a következtetésre jutottak, hogy ez az eltolódás („Dimits shift”) annak eredménye, hogy a plazmában mindkét tórusz szög mentén szimmetrikus, de radiálisan lokalizált és nyírt áramlások jelennek meg, melyeket maga a turbulencia kelt. Ezeket hívják zonális áramlásoknak, amelyek részben kiveszik az energiát a turbulenciából, részben széttépik az örvényeket és ezzel csökkentik azok hatását. Erről a folyamatról és a kísérleti vizsgálatokban való magyar részvételről publikált cikket a Nukleonban Bence Attila és Berta Miklós [9]. A zonális áramlások mellett bizonyos paramétertartományokban a szimulációk radiális, úgynevezett „streamer” áramlásokat is mutattak [10], amelyek a részecskéket és a hőt igen

intenzíven tudják szállítani, akárcsak egy futószalag. Ezeket a turbulencia által keltett áramlási mintázatokat összefoglaló néven mezostruktúráknak nevezzük, utalva arra, hogy méretük a mikroturbulencia mm-cm skálája és a berendezések méteres skálája között helyezkedik el. A mezostruktúrák részecskeütközések és más folyamatok révén csillapodnak, az eredmény egy önszabályozó rendszer, amelyben a primer instabil hullámok és az áramlások dinamikus egyensúlyban vannak, ahogy azt a 2. ábra szemlélteti.

A turbulencia és a streamer-ek hő- és részecsketranszportot okoznak a mágneses téren keresztül, amely természetesen megváltoztatja a plazma hőmérséklet, sűrűség és más profiljait. Mivel a kezdeti instabilitásokat ezen profilok gradiensei gerjesztik, egy második szabályzó kör is kell, hogy létezzen, amelynek elemeit a 2. ábrán szürkével jelöltük. A végeredmény tehát egy többszörösen visszacsatolt rendszer, melynek egyes elemei maguk is több alkotórészt tartalmaznak. A fúziós plazmafizika legutóbbi évtizedének óriási eredménye, hogy az elméletileg megjósolt zonális áramlások mindkét ágát (a periodikus Geodesic Acoustic Mode, GAM és kvázistatikus zonális áramlás), valamint kölcsönhatásukat a turbulenciával kimutatták [11]. Ebben a munkában magyar kutatók és részt vettek, különböző általunk épített mérésekkel kimutattuk mind az alacsonyfrekvenciás, mind az oszcilláló zonális áramlásokat.

A plazmatranszport nemlineáris jellegét más megfigyelések is igazolják, többek között jó látható, hogy a hővezetés gyorsabban nő egy kritikus hőmérséklet-gradiens felett [7], a plazma perturbálására nemlokális és nemlineáris választ ad [12], valamint spontán állapotátmenetek is megfigyelhetők. Ez utóbbiak közül az úgynevezett H-mód a legjelentősebb [13], amely egy stabil nyírt áramlás folytán transzport gátat (jó hőszigetelő réteget) alakít ki a plazma szélén. Ez az ITER berendezés tervezett standard üzemmódja is. A nemlineáris

transzportot, a H-mód átmenetet a numerikus tokamak modellek még nem tudják reprodukálni, bár mint fentebb már jeleztük nagyságrendileg a transzport sebességekre jó értékek adódnak. Ennek vélhetőleg az az oka, hogy a második szabályzókört – a profilok és a turbulencia kölcsönhatását – a mai numerikus modellek számítástechnikai kapacitás korlátok miatt nem tudják önkonzisztensen számolni. Egy pontos numerikus modellhez ezen felül szükséges lenne még újabb elemeket is figyelembe venni, elsősorban a plazma határrétegének hatását, valamint a fúzióban és a plazma fűtése során keletkező szupratermális gyors részecskék és a turbulencia kölcsönhatását. Remények szerint a rohamosan fejlődő számítástechnika a következő tíz évben megteremti a lehetőségeket és ezzel az ITER berendezés indulásakor már egy nagyrészt önkonzisztens modellezés áll majd rendelkezésre.

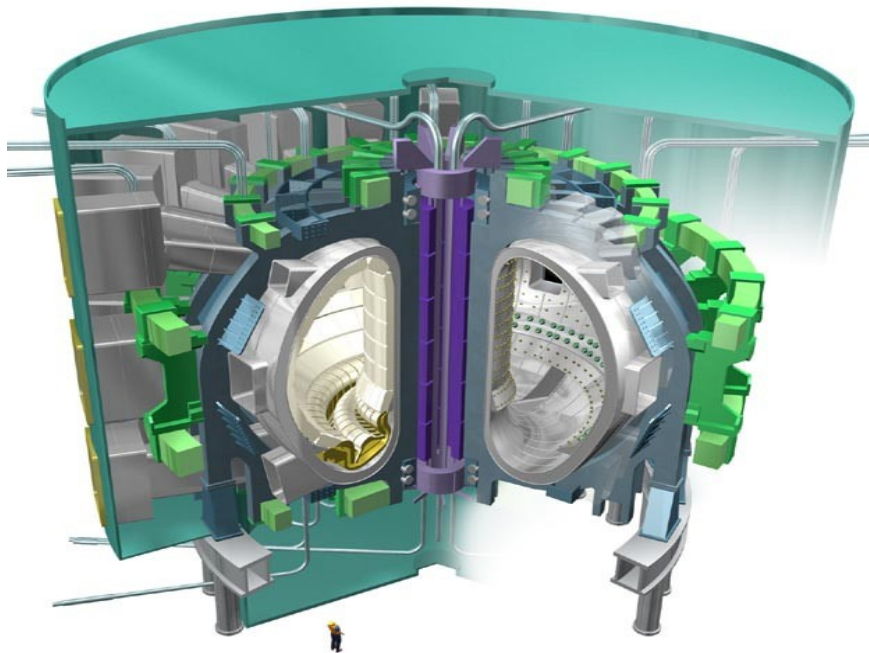
Természetesen a turbulencia megértése érdekében nem csak az elméletek és a numerikus modellek fontosak, hanem épp annyira lényeges ezek ellenőrzése és validálása a kísérletekben. Itt mutatkozik meg a fúziós plazmafizika egyik alapvető jellegzetessége: a fizikai elméletek és a technológia szoros kapcsolata. A turbulencia kölcsönhatások alapjait vizsgálni lehet kis laboratóriumi kísérletekben, azonban az elméleteket validálni csak akkor lehet, ha minden kölcsönhatás egyszerre jelen van. A gyors alfa részecskék csak akkor jelennek meg lényeges számban, ha deutérium-trícium plazmával üzemel a berendezés, ami önmagában jelentős technológiai kihívás, és jelenleg csak a világ legnagyobb tokamakja, a JET képes rá [14]. Azonban még a JET-en sincs lehetőség arra, hogy az alfa részecskék jelentős fűtést képviseljenek, ezért a turbulenciával való esetleges kölcsönhatásukat nem lehet kísérletileg tanulmányozni. Mindenképpen szükséges tehát egy, a mai berendezéseken lényegesen túlmutató kísérlet megépítése, amely validálja az elméleteket és a technológiát is egyszerre. Ez lenne az ITER

tokamak, amely a JET-nél kétszer nagyobb méretű lenne. Egy ilyen méretű és tríciummal működő berendezésen azonban a mérési lehetőségek meglehetősen korlátozottak, azért a kölcsönhatások részletes vizsgálatához elengedhetetlen kisebb berendezéseket is üzemeltetni. Ezt biztosítaná a ma meglévő berendezések egy részének vagy megépítendő kisebb fúziós kísérleteknek a hosszútávú üzemeltetése.

Turbulencia a tokamak körül

A fenti megfontolások miatt látható, hogy az ITER kísérletnek kulcsszerepe van a fúziós fizika és technológia fejlődése szempontjából, érdemes tehát megvizsgálni, mi ennek a kísérletnek a lényege, története és helyzete.

Az ITER egy hagyományos tokamak rendszerű berendezés lenne [2], amely lineáris méretében körülbelül kétszerese az eddigi legnagyobb tokamaknak, a JET-nek. A plazmát összetartó mágneses teret szupravezető tekercsek állítanak elő, ezzel a toroidális mágneses tér statikusan jelen lehet. A maximum 15 MA-es plazmaáramot elsősorban a jelenlegi berendezésekhez hasonlóan induktív módon hajtják, ez a plazmakisülés időtartamát kb. 500 másodpercre korlátozza majd. Standard H-módban a plazmától 500 MW fúziós teljesítményt várnak, amelyet 80 százalékban a DT reakcióban keletkező neutronok, 20 százalékban az alfa részecskék visznek el. A 400 MW neutron teljesítmény összemérhető egy majdani fúziós erőmű teljesítményével, ezért alkalmas a trícium termelő köpenyelemek technológiájának tesztelésére. Ezek azonban csak tesztek lesznek, tríciumból az ITER nem lesz önellátó. A plazma felfűtését maximum 73 MW külső fűtési teljesítmény szolgálja, ez szükséges ahhoz, hogy elérjék a H-módot és beinduljon a fúziós reakció. A fúzióban keletkező 100 MW alfa részecske teljesítmény képviselné ezután a fűtési igény domináns részét.



3. ábra: Az ITER berendezés számítógépes modellje. A berendezés alatt méretarányként egy ember áll. A tórusz alakú vákuumkamra a baloldalon ki van béléve a védő köpenyelemekkel, míg a jobboldalon ezek a kamra alján elhelyezkedő divertor is hiányzik. A toroidális mágneses teret a kamrát körülölelő kék tekercsek állítják elő. A zöld tekercsek és a berendezés közepén elhelyezkedő központi szolenoid állítják elő a szabályzótereket és a plazmaáramot. Az egész berendezés egy henger alakú kriosztátban helyezkedik el, amely a tekercsek 5 Kelvin körüli működési hőmérsékletét biztosítja.

Az ITER kísérlet jelenleg – a plazmához hasonlóan – meglehetősen turbulens állapotban van, azonban remény van a helyzet rendezésére. A problémák gyökerének megértéséhez érdemes áttekinteni a projekt történetét. Az ITER gondolata 1985-ben merült fel, mint a kelet-nyugati enyhülés egy eleme. Ekkor négy partner (Európai Közösség, USA, Szovjetunió, Japán) szövetkezett, hogy megépítsenek egy fúziós fizikai-technológiai teszt berendezést. Az első koncepció 6 m nagysugarú tóruszról szólt. A részletes tervek 1998-ra készültek el [15], ekkor már 8 m nagysugárról volt szó. A költségbecslés lényegesen megugrott, ahogy a 4. ábra mutatja is. Sajnos ekkorra a Szovjetunió összeomlása következtében jóval kisebb hajlandóság mutatkozott nagy együttműködésekre, valamint Amerikában is lényegesen csökkentek a tudományos kutatási kiadások, ezért a berendezés megépítésére nem akadt elég pénz.

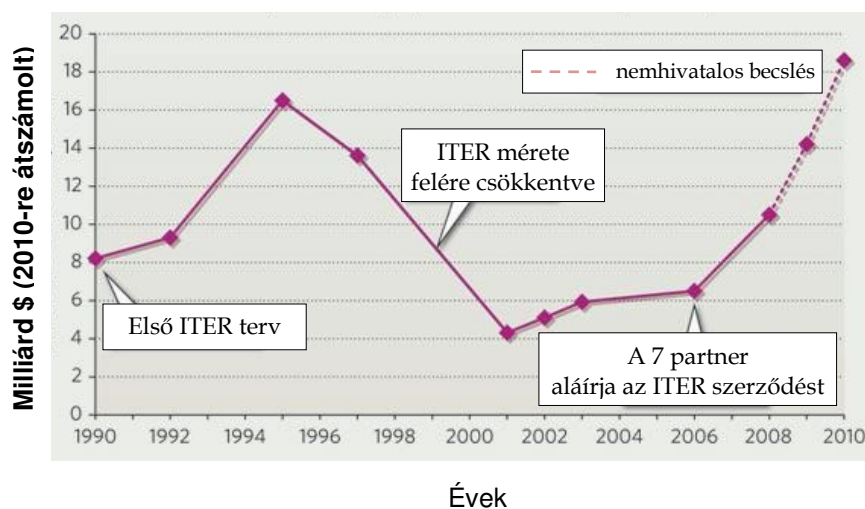
Ezen a ponton a plazmaturbulencia közvetlenül is beavatkozott az ITER történetébe. A kilencvenes években Amerikában koncentrált program zajlott „Transport Task Force” néven a turbulens transzport megértésére. Ennek során mérési eljárásokat és numerikus modelleket is fejlesztettek. Az egyik első numerikus modellt részletesen validálták a princetoni TFTR tokamak méréseivel és ez alapján kiszámították az ITER várható veszteségeit, amelyek nagyobbak adódtak, mint amit a tervezéskor figyelembe vettek [16]. Ugyan a modell alkalmazhatóságáról megoszlottak a vélemények, a tudományos berkekben zajló vita alapján az USA kormányzat drasztikusan csökkentette a fúziós költségvetést és kilépett az ITER együttműködésből. A döntés alapjául szolgáló számítások éppen a zonális áramlások hatását nem vették még figyelembe, amelyeket néhány évvel később lényegesen találtak [8].

Politikusi sugallatra a megmaradt három ITER partner kutatói 2001-re áttervezték a berendezést úgy, hogy a költségbecslés a felére essen. Ennek során a tórusz nagysugara lecsökkent 8 méterről 6 méterre, tehát a kezdeti koncepcióhoz került közelebb. A plazma teljesítményét is lényegesen kisebbre tervezték, de elég nagynak ahhoz, hogy tízszeres energia-sokszorozást tudjon demonstrálni [2]. Ez a terv szolgált a további tárgyalások alapjául, amelyek során 2003-ban az USA ismét csatlakozott a projekthez, majd

követte Kína, Dél-Korea és India is. Így alakult ki 2006-ra a végleges ITER megállapodás egy politikailag befolyásolt költségterv alapján. A berendezés felépítésének céldátuma 2016 volt.

Az ITER megépítéséről szóló szerződés 2006-os aláírása után először átvizsgálták a terveket. Találtak néhány kritikus elemet, amelyek részben azóta felismert jelenségekből, részben a modellek pontatlanságából adódtak, azonban alapvető problémát nem tártak fel. Kisebb termódosításokat követően 2008-ban készült egy újabb költségbecslés, amely drámai eredménnyel szolgált: legalább kétszer, de inkább háromszor annyi lesz a költség, mint eredetileg gondolták. Ez után hosszas elemzés következett, hogy mi a növekedés oka és azt találták, hogy mind külső, mind belső okok közrejátszottak. A külső okok a nyersanyag- és munkaerő költségek robbanása volt, néhány fontos alapanyag ára a többszörösére emelkedett. A belső okok között szerepeltek kihagyott tételek és termódosítások is. Akárhogy is, világossá vált, hogy a költség kevesebb nem lehet és valójában soha nem is fog kiderülni, mennyi lesz végül. Ennek az az oka, hogy a megállapodás szerint az ITER partnerek 90%-ban nem pénzt, hanem alkatrészeket adnak össze és az alkatrészek ára minden partner belügye. Az európai hozzájárulás – amely a berendezésnek körülbelül fele – az eredetileg gondolt 2,6 milliárd euró helyett 6,6 milliárd euró lesz. Ennek fedezésére politikai döntés már van, de forrás még nincs teljesen.

A költségnövekedés mellett probléma adódott a határidővel is. A szerződés aláírása és ratifikálása már eleve két évvel késleltette a felépítést, de a 2018-as dátum is irreálisnak adódott a módosított tervek alapján. A 2010-es év során aztán több variációt alakítottak ki, amelyek közül az októberben elfogadott úgy szól, hogy 2019-ben a berendezés váza készül el: a mágnesetekercsek, a vákuumkamra, valamint minimális diagnosztikai és vezérlési infrastruktúra. A további elemek a következő 5-6 évben több lépcsőben épülnek be, ezzel a berendezés követi az eddigi fúziós kísérletek mintáját, ahol a kipróbálás és a fejlesztés mindig fokozatosan történt. A tervek az első deutérium-trícium üzem időpontját 2025-26-ra teszik, ez nem sokat csúszott az eredeti tervekhez képest.



4. ábra: Az ITER berendezés költségbecslésének változása. [17]

A pénzügyi- és határidő-turbulencia természetesen nem volt áldozat nélkül a vezetésben sem. 2010-ben leváltották az ITER teljes vezérkarát, akik egyébként jobbára politikai megfontolásokról kerültek helyükre. Az új ITER igazgató Osamu Motojima, korábban a japán LHD szupravezető sztellarátor építését vezette, és így a kutatók által is elismert fúziós szakember, akinek első dolga volt, hogy átszervezze a teljes vezetést. Az európai hozzájárulást szervező „Fusion for Energy” szervezet igazgatója szintén kicserélődött, egy átmeneti időszakra Frank Briscoe-t választották igazgatónak, aki szintén évtizedes tapasztalatokkal rendelkezik a JET működtetésében és továbbfejlesztésében.

Alapvetően ismertek, jó úton vagyunk, hogy előbb-utóbb megértsük a részleteket is. Az ITER építése körüli turbulencia csitulni látszik, mind a költség, mind a határidő stabilizálódik. A kulcsalkatrészek építése megkezdődött. Ha nagyobb technikai probléma nem jön közbe, 2019 végére remélhetőleg elindulnak az első kísérletek. Bár onnan még mindig messze van egy fúziós reaktor, de ma már sokkal megalapozottabban tervezhetünk, mint akár csak néhány évvel ezelőtt is.

Végszó

A cikkben leírtak szerint a 2010-es év végén bizakodva tekinthetünk a következő évtized elébe. A legnagyobb fizikai probléma – a plazmaturbulencia – mechanizmusai

Irodalomjegyzék

- [1] *A Magyar Euratom Fúziós Szövetség elérhető az interneten a www.magfuzio.hu címen.*
- [2] R. Aymar, et al. *Plasma Physics and Controlled Fusion* 44 519 (2002)
- [3] J.D. Lawson, *Proc. Phys. Soc. B* 70 6 (1957)
- [4] J. Wesson, *Tokamaks (second edition), Oxford University Press, (1997)*
- [5] O. Grulke, et al. *New Journal of Physics* 4 67.1 (2002)
- [6] N.P. Basse, et al. *Physics of Plasmas* 9 3035 (2002)
- [7] E.J. Doyle, et al. *Nuclear Fusion (Special issue ITER Physics Basis)* 47 S18 (2007)
- [8] A.M. Dimits, et al. *Physics of Plasmas* 7 969 (2000)
- [9] Bencze A, Berta M. *Nukleon* 2 32 (2009)
- [10] F. Jenko and A. Kendl, *Physics of Plasmas* 9 4103 (2002)
- [11] A. Fujisawa, *Nuclear Fusion* 49 013001 (2009)
- [12] K.W. Gentle, et al. *Physical Review Letters* 74 3620 (1995)
- [13] F. Wagner, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 49 B1 (2007)
- [14] J. Jacquinot, et al., *Nuclear Fusion* 39 235 (1999)
- [15] *ITER Final Design Report, IAEA (1998)*
- [16] J. Glanz, *Science*, 274 5293 (1996)
- [17] *Nature*, 465 532 (2010)