

Měření pološířky turbulentních struktur na tokamaku GOLEM

Eliška Hostáková, Gymnázium prof. Jana Patočky, eli@hostak.cz
Matěj Blahník, Všeobecné gymnázium Vimperk, blahn24@oag.cz
Martin Zuzek, Gymnázium Dobruška, martin.zuzek@seznam.cz
Tobiáš Křištof, Gymnázium Cheb, tokrist@gymcheb.cz

20.6.2023

Abstrakt

V našem projektu jsme se na tokamaku GOLEM snažili co nejpodrobněji prozkoumat turbulenci v plazmatu. Jedná se o stále ne zcela popsáný jev, který je předmětem intenzivního vědeckého výzkumu. Turbulence jsou zcela přirozeným chováním přehřátého, ionizovaného plynu, tzv. plazmatu, uzavřeného v magnetickém poli. Vlivem turbulence se horké plazma z vnitřní vrstvy uvolní a snaží se dostat ven, čímž plazma přichází o energii. U větších reaktorů, které pracují při vyšších teplotách, mohou tyto turbulentní struktury (bloby) v krajním případě poškodit vnitřní stěnu komory tokamaku. Pochopení fyziky vzniku a chování blobu je zásadní pro úspěšné zvládnutí technologie termojaderné fúze v budoucích letech.

1 Úvod

Lidstvo se již mnoho desetiletí snaží najít vhodný zdroj energie. Avšak od spalování uhlí a ropy až po obnovitelné zdroje, zatím žádný způsob získávání energie nesplnil požadavky, které jsme si vytyčili. Buď je příliš nešetrný k životnímu prostředí nebo není dost účinný/rentabilní. Při lidském honu za energií jsme se dostali až k jádru atomu. To skrývá dostatek energie, ale je velmi složité ji z něj dostat.

První a jednodušší možnost je štěpení těžkých jader na jádra lehčí. Tento způsob je dnes běžně využíván ve štěpných elektrárnách a osvědčil se mnoha lety praxe. Bohužel i přes všechna pozitiva, která jsou se štěpením spjatá, má i několik negativ. Tím největším je nutnost použití vhodného jaderného paliva, ze kterého vzniká velké množství radioaktivního odpadu. Zároveň, nehledě všechna bezpečnostní opatření, stále existuje i hrozba jaderné nehody, podobné těm, ke kterým došlo například v Černobyli nebo Fukušimě.

Druhou možností, jak z atomového jádra dostat energii, je takzvaná jaderná fúze, neboli slučování více lehkých jader do jednoho těžšího, podobně jako je tomu ve hvězdách. K jaderné fúzi v pozemských podmínkách potřebujeme pouze dva izotopy vodíku, deuterium a tritium. Deuterium, neboli těžký vodík, je poměrně lehce dostupné a jeho zásoby jsou prakticky neomezené, jelikož se nachází například v mořské vodě. Tritium je radioaktivní izotop vodíku, který se zatím vyrábí především v CANDU reaktorech. V budoucnu by však měl být vyráběn přímo ve fúzních elektrárnách ostřelováním atomů lithia neutrony, které vznikají při fúzní reakci. Existují dva přístupy, jak fúzi zažehnout.

Inerciální udržení sází na malé palivové terčičky které jsou stlačeny sadou laserů. Dojde tak k malému jadernému výbuchu. Druhý přístup využívá elektřiny a magnetismu. Záměrem je dlouhodobé udržení plazmatu v uzavřené nádobě pomocí silných magnetických polí. Průkopníky této metody byli vědci ze SSSR, kteří jako první sestrojili koncept reaktoru toroidálního tvaru s plazmatem řízeným elektrickým i magnetickým polem: tokamak. V dnešní době jsou tokamaky žhavými adepty na využití jako budoucí fúzní reaktory. GOLEM, na kterém jsme měli tu čest pracovat my, je nejstarší dosud funkční tokamak na světě.

Bohužel je fúze stále ve fázi vývoje a s tím se objevují i nové komplikace, které musí být eliminovány dříve, než se technologie fúze použije v praxi. Přesto je fúze zřejmě tou nejslibnější možností pro budoucnost energetického průmyslu, a investice do jejího výzkumu jsou v zájmu celého lidstva.

2 Měření radiálního profilu iontového nasyceného proudu na tokamaku GOLEM

2.1 Teorie

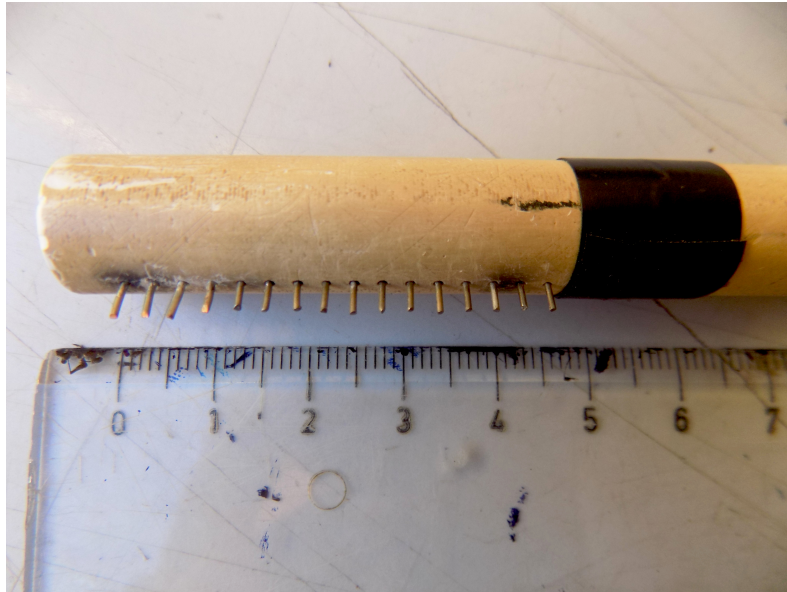
Turbulence v plazmatu jsme měřili na tokamaku GOLEM, pomocí hřebínkové sondy.

Turbulence je proces transportu plazmatu napříč siločarami magnetického pole, k němuž dochází vlivem různých vnitřních nestabilit v plazmatu. Jednou z hlavních příčin je takzvaná výměnná nestabilita. Plazma má blíže ke stěně reaktoru nižší hustotu než uprostřed komory a mezi těmito úrovněmi má tendenci se promíchávat. K tomu dochází za vzniku turbulentních struktur (blobů). Ty jsou následně vyvrženy ven z plazmatu. Tyto horké struktury s sebou nejen odnášejí velké množství energie, ale zároveň mají nepříznivý vliv na stěny komory tokamaku.

Hřebínková sonda je zařízení, které se skládá z 16 Langmuirových sond (postavením připomínají hřeben), z nichž je každá připojená k výstupu. Celá sonda je upevněna na manipulátoru, který ji do prostoru komory tokamaku vsouvá zespodu, čímž umožňuje měření v různých vrstvách plazmatu.

Langmuirova sonda je složená z jednoduchého vodiče, který je vsunut na okraj plazmatu, kde funguje jako elektroda. Může měřit ve dvou režimech: - plovoucí režim Vf, kdy do sondy není pouštěno žádné napětí, - režim iontového nasyceného proudu, kdy je do sondy pouštěno záporné napětí ve velikosti -130 V. Záporně nabitá sonda pak odstiňuje elektrony a sbírá pouze ionty. Mezi režimy lze přepínat pomocí takzvané "stříbrné krabičky". Ta buď pouze zaznamenává data ze sondy nebo v příslušném módu i pouští napětí do sondy.

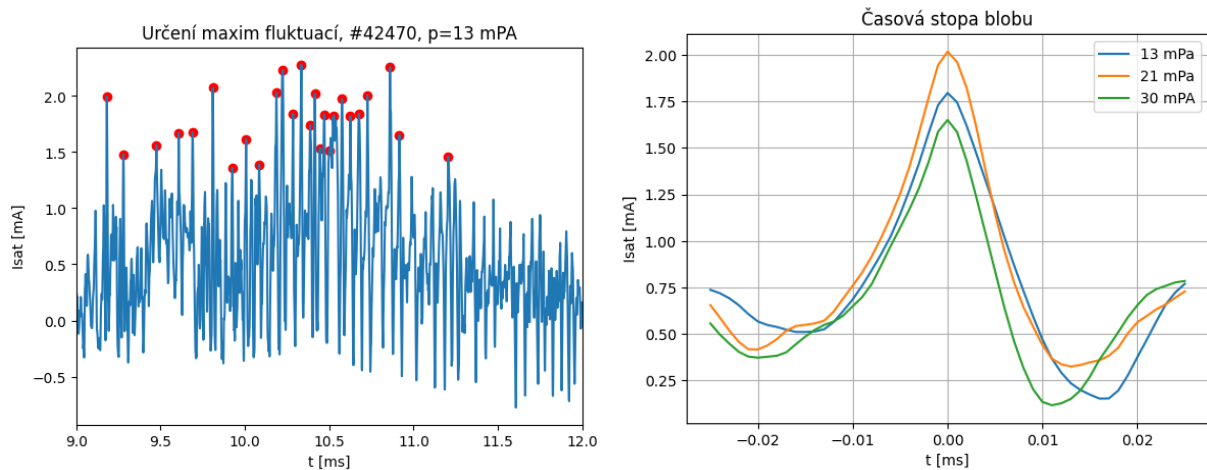
Pomocí hřebínkové sondy můžeme měřit turbulentní struktury (bloby), které přes sondu v průběhu výboje procházejí. Tyto bloby vidíme jako výrazné fluktuace v signálu zaznamenaného na sondě. Pomocí metody zvané podmíněný průměr jsme pak schopni spočítat takzvanou časovou stopu průměrného blobu. Jedná se vlastně pouze o průměr přes fluktuace signálu. Z takovéto časové stopy blobu jsme pak následně schopni určit typickou pološířku blobu, což je jedna ze základních charakteristik turbulentního transportu na tokamacích. Na základě toho můžeme výsledky srovnávat s jinými tokamaky, případně pak pomocí extrapolace určovat, jaké tyto délky budou na budoucích zařízeních (ITER, DEMO).



Obrázek 1: Fotografie hřebínkové sondy použité pro měření.

2.2 Výsledky

Provedli jsme tři měření při různém tlaku uvnitř komory tokamaku. Hodnoty tlaku byly: 13 mPa, 21 mPa, 30 mPa. Identifikovali jsme maxima v iontovém nasyceném proudu v časovém úseku 9-12 ms, kdy byly výboje nejstabilnější. Určili jsme polohy maxim fluktuací v analyzovaném signálu, příklad pro výboj s tlakem 13 mPa je na obrázku 2. Vytvořili jsme průměrný průběh fluktuace blobů pro každý výboj. Určili jsme maximální hodnotu iontového nasyceného proudu pro typický blob a jeho pološířku. Maximum a pološířka pro tlak 13 mPa je 1,80 mA a 15,7 μ s, pro 21 mPa je 2,02 mA a 15,5 μ s, pro 30 mPa je 1,65 mA a 13,5 μ s.



Obrázek 2: Vlevo) Nalezení maxim měřeného signálu nasyceného proud. Vpravo) Časové stopy blobů pro tři různé hustoty plazmatu.

2.3 Diskuze

Očekávali jsme, že se zvyšujícím se tlakem se bude zvyšovat amplituda iontového nasyceného proudu. Pro první dvě měření jsme tuto skutečnost pozorovali, ale při posledním zvýšení tlaku amplituda klesla. To přisuzujeme naražení na hustotní limit, který způsobil degradaci výboje.

U pološířek jsme očekávali podobný vývoj, a sice že se při zvyšujícím se tlaku bude pološířka zvětšovat — se zvyšující se hustotou se struktury budou pohybovat pomaleji. Při prvních dvou měřeních se zvětšovala podle očekávání, při třetím měření se ale zmenšila. Opět to přisuzujeme naražení na hustotní limit. Hodnoty pološířek jsme porovnali s hodnotami z tokamaku COMPASS, kde typicky nabývaly pološířky $5 \mu\text{s}$. Jsou faktorem 3 menší, což pravděpodobně souvisí s vyšší rychlostí struktur.

Aby se naše závěry daly ověřit, bylo by třeba provést sérii dalších měření a data z nich zpracovat, ale to by bylo časově velmi náročné.

3 Shrnutí

Pro tři hustoty nasyceného iontového proudu jsme měřili pološířky turbulentních struktur na tokamaku GOLEM. Očekávali jsme, že se bude zvětšovat, což se při prvních dvou měřeních potvrdilo, ale při třetím se zmenšila, pravděpodobně kvůli degradaci výboje zapříčiněného naražením na hustotní limit. Pro potvrzení závěrů je nutné udělat sérii dalších měření, to by ale bylo časově náročné.

Poděkování

Děkujeme FJFI za umožnění výzkumu na tokamaku GOLEM. Zvláštní poděkování patří panu Ing. Vojtěchu Svobodovi za velkou pomoc s ovládním zmíněného tokamaku a dále vedoucímu našeho miniprojektu panu Ing. Petru Máchovi. Vřelé poděkování také patří panu dr. Janu Stöckelovi za zřízení tokamaku GOLEM jakožto vzdělávacího zařízení pro studenty na FJFI.

Reference

- [1] Ing. Vojtěch Svoboda: *Tokamak GOLEM*, Dostupné z:
<http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/Education/Presentations/VoSv/present.pdf>
- [2] Ing. Petr Mácha. *Sondová měření na tokamaku GOLEM*
- [3] Převzato z: *Rake probe*, [20.6.2023], Dostupné z:
<http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/Diagnostics/ParticleFlux/RakeProbe/indexrake-probe-geometry>