

Příspěvek českých vědců k historické smlouvě na konstrukci obálky termojaderného reaktoru ITER

ITER je největší pozemský vědecký projekt. V roce 2027 má spustit první experimenty, kde plazma horké 150 milionů stupňů Celsia bude produkovat půl GigaWattu tepelné energie, minimálně ¼ hodiny, opakovaně alespoň tisícekrát. Tento prototyp termojaderné elektrárny budoucnosti podpisem smlouvy s dodavateli obálky reaktorové nádoby přestoupil na podzim 2013 z fáze fyzikálních studií a inženýrského designu do fáze *konstrukce*.

Čeští vědci z Ústavu fyziky plazmatu Akademie Věd se v posledních letech podíleli na fyzikálních studiích pro jeho design ve dvou úkolech.

Evropští vědci přijeli do Anglie ničit největší tokamak světa JET ... prý za účelem vědeckého zkoumání pro ITER?!

Ha! Nejprve piráti u Afrikého rohu ... a teď zase Vandalové 4. století se opět objevili v Evropě? Je to tak ... nicméně tentokrát s nejlepšími vědeckými úmysly! Záměrný “vědecký vandalizmus” byl proveden léta páně 2013 z důvodu zhora prostého: **“Ověřit, zda-li divertor z wolframu vydrží tepelné namáhání výbuchy v tokamaku ITER”**. O co jde? Divertor, to je ten “příkop” ve spodní části vakuové komory, kterou zde vidíte na fotografii tokamaku JET nedaleko Oxfordu. Plazma, za podmínek nezbytných k termojadernému slučování, nám bohužel pravidelně “vybuchuje” tzv. ELM nestabilitou. V případě JETu to lze přirovnat k 50 gramům výbušniny s kadencí 3000/minutu – tedy asi jako pořádný kulomet. Odhady pro ITER ale odpovídají spíše 10kg dynamitu několikrát za vteřinu, tedy asi jako dělo tanku, tedy s tím že ITER bude mít 10x rychlejší kadenci!

Vědci celého světa si lámají hlavu, jak se těchto výbuchů buď zbavit, anebo alespoň jak safra tuto energii absorbovat bez poškození reaktoru. Nemožný úkol? Inu, možná ne. Divertor sestává z centimetrových lamel, vyrobených z Wolframu který, jak známo, je kovem s nejvyšší teplotou tání (3422°C). Jelikož tyto ELM-výbuchy na největším tokamaku světa JET jsou příliš slabé (jako ten kulomet), jednu lamelu tudíž angličtí vědci schválně vystrčili do plazmatu. Potom si pozvali na pomoc další Evropské vědecké Vandaly (včetně nás z Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd), a pustili na ni kadenci ELMů. Po několika desítkách výbuchů jsme potom pozorovali, že se již wolframová lamela dostatečně zahřála, každým dalším výbuchem se skutečně taví, tavenina odtéká bokem a stačí zatuhnout dřív nežli přijde další “výbuch”.

Odjížděli jsme tedy domů spokojení – divertor je zničen, fyzika dobytá! Dozvěděli jsme se totiž důležitý výsledek: poškození přesně odpovídá počítačovým simulacím, tavenina odtéká na bezpečné místo a hlavně nevypřskává do plazmatu, které by tím ochladila a zastavila tak termojaderné reakce.

Tento pozitivní závěr měl poté ve zmíněné smlouvě z podzimu 2013 významný vliv na



Illustration 1: Do útoku! Na divertor JETu!

rozhodnutí vědecké komise ITERu zrušit původní plán postavit dva divertory, a ušetřit tak stovky milionů Eur za prvotní instalaci robustnějšího prototypu z uhlíkového kompozitu. Držte nám palce, aby

toto rozhodnutí ušetřit bylo správné.

Čeští vědci optimalizují tvar kachliček vnitřního obložení ITERu

Zvidavec: Cha, co je to za umění, správně natvarovat kachličky?

Fyzik: Inu, předpovědět jejich správný tvar není vůbec snadné a přitom můžete “zadarmo” významně zlepšit schopnost tokamaku absorbovat teplo bez poškození vnitřní stěny. Zkrátka, vyrobí-li se špatně, významně to omezí schopnost plazmatu ITERu vstoupit do vysokoteplotní fáze potřebné k termojadernému slučování.

Zvidavec: O co jde?

Fyzik: Idea je snadná: teplo, které odteče z centra plazmatu směrem ke stěnám, proudí v blízkosti stěny pouze podél magnetických siločar, to znamená téměř vodorovně a rovnoběžně s povrchem kachliček vnitřního obložení reaktoru. Správným zakřivením kachliček můžeme dosáhnout ideálně rovnoměrného tepelného zatížení. Budou-li zakřivené moc či málo, budou se přehřívat na špičce anebo naopak na okrajích. V takovém případě je jisté, že se buď lokálně roztaví anebo dokonce odpadnou díky tepelné roztažnosti, způsobující pnutí. To správné zakřivení lze popsat jedním “magickým” číslem ... ale kolik to bude?

Zvidavec: Cha, když je to tak důležité, jak to, že to ještě nikdo neví?

Fyzik: Inu, žádnému tokamaku to zatím nikdy nevadilo. Mají totiž příliš krátké výboje, za kterou se ty kachličky nestačí moc zahřát. Jeden příklad už ale máme: na největším tokamaku světa JET v Anglii se tyto kachličky opravdu částečně roztavily během experimentu s dlouhým plazmatem v roce 2012.

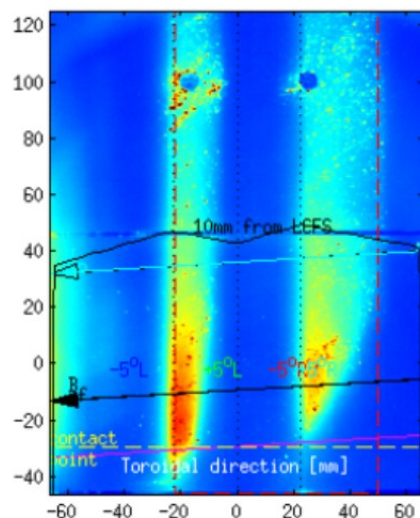
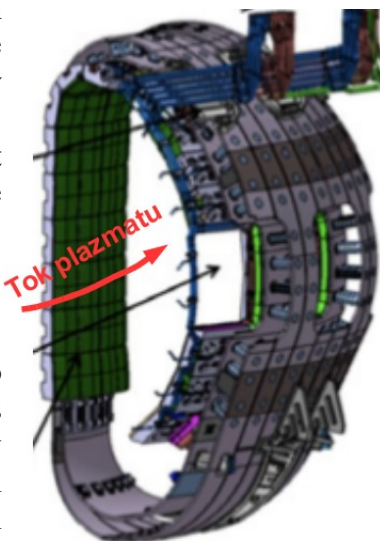


Illustration 2: Řez komorou ITERu. Ty zelené čtverečky jsou metr veliké, vodou chlazené, tunové bloky z mědi a berylia, jejichž optimální zakřivení se snažíme předpovědět. Vpravo je pak snímek z termovizní kamery ukazující teplotní mapu

Zvidavec: Chápu. Tak vy jste tedy toto podobné kachličky na tokamaku COMPASS v Praze. “magické” číslo spočítali. Jak?

Fyzik: Ano, věřím, že jsme jej odhadli správně. Bohužel, ani po desítkách let výzkumu tokamaků neexistuje žádný teoretický ani počítačový model schopný důveryhodné předpovědi – plazma je složitá bestie. Proto jsme provedli dva typy experimentů. Nejprve jsme, v rámci mezinárodního týmu desítek vědců, provedli během mnoha let 440 experimentálních výbojů na devíti tokamacích světa, od Číny, přes Prahu, Švýcarsko, Itálii, Francii, Anglii až do Kalifornie, a poté provedli jednoduchou matematickou extrapolaci na ITER. Zjistili jsme tím, jak se toto číslo mění se šestnácti různými parametry plazmatu, převážně s velikostí těch tokamaků. Ve vědě obecně platí, že čím větší rozsah parametrů, tím přesnější předpověď. Nejmenší z nich byl CASTOR s objemem plazmatu 100 litrů, dnes operující na ČVUT v Praze pod názvem GOLEM. Největší z nich byl již zmíněný JET s plazmatem velikosti 80'000 litrů. Extrapolaci jsme nakonec provedli docela přesně.

Zvidavec: takže máme vyhráno, hotovo?

Fyzik: Bohužel ne. během těch let jsme totiž zjistili, že problém je složitější. Toto magické číslo bohužel výrazně mění svoji hodnotu v těsné blízkosti stěny, což jsme objevili díky roztavení beryliových kachliček na JETu v roce 2012. Jinými slovy, tato “magická” čísla jsou tři, ale ta námi použitá diagnostika je ani “nevidí”.

Proto jsme téměř celý rok 2013 zasvětili experimentům na českém tokamaku COMPASS, do kterého jsme vložili postupně několik různě tvarovaných kachliček a pozorovali rozložení teploty jeho povrchu pomocí termovizní kamery a sond. Postupně se k nám přidávaly další týmy vědců na tokamacích ve Švýcarsku a Kalifornii a také jeden moudrý Profesor z MIT v Bostonu s teorií kupodivu velmi dobře popisující naše společná pozorování.

Zvídavec: A jak to nakonec dopadlo?

Fyzik: Přestože stále máme nejasnosti v tom, proč vlastně ta čísla jsou dvě a jaký fyzikální proces je způsobuje, zdá se, že už jsme schopni velmi přesně předpovědět jejich hodnoty pro ITER a tím i ten optimální tvar těchto kachliček. Teď, na jaře 2014, právě probíhá vyjednávání s inženýry a vrcholovým vedením mezinárodní organizace ITER o námi navrhovaných změnách. Ačkoliv nic z toho ještě není ve výrobě, úprava stávajícího designu kachliček bude znamenat několik let práce desítek inženýrů kvůli návazností na mnoho dalších konstrukcí. Pokud se proto ITER rozhodne změnu neprovést, máme velké obavy, že až se ITER spustí, budou buď kachličky odpadávat (a taková oprava by byla extrémně náročná), anebo se významně sníží jeho termojaderné parametry. Drž nám tedy prosím palce, abychom se nespletli!

Zvídavec: Tak vám držím palce!

Mgr. Jan Horáček, dr. és sc.