

# Energie hvězd pro lidstvo

Již dvacátá pátá konference Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA), zaměřená na perspektivy využití energie z termojaderné fúze, se konala loni v říjnu v Petrohradu. Příspěvky prezentované na této konferenci inspirovaly autory k článku o současném stavu tohoto oboru.

Jan Mlynář, Ústav fyziky plazmatu AV ČR a Slavomír Entler, Centrum výzkumu Řež

Především je nutné říci, že zhruba osm set účastníků konference prezentovalo neobvykle široké spektrum prací. Sahaly od čistě teoretických studií nestabilit ve vysokoteplotním plazmatu, přes prezentace nových metod řízení velkých experimentů, přes práce týkající se výzkumu materiálů, až po příspěvky věnující se projektové přípravě budoucích fúzních reaktorů. Tak obsáhle přehlídkla úsilí, které je a bude nutné vynaložit ke zvládnutí tohoto nového zdroje energie, vyvolá v každém odborníkovi obavy, zda nám potřebné nadšení nevyprchá dříve, než se fúzní reaktory podaří zrealizovat. Fakticky ale všechny prezentace v první řadě dokládají obrovský pokrok, ke kterému v našem oboru za posledních dvacet let došlo. Do fúzního výzkumu s velkým odhodláním vstoupila Čína, ale i Jižní Korea a Indie. Podařilo se zahájit stavbu velkého mezinárodního experimentu ITER. Ten se stal asi největší motivací pro výzkumné práce na celé řadě doprovodných programů, včetně těch, které se rozvinuly přímo v České republice – zejména instalace tokamaku COMPASS v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR a výzkum fúzních technologií v Centru výzkumu Řež. Proč je vlastně vize zvládnutí jaderné fúze tak atraktivní a přitom tak časově náročná?

## ATOMOVÁ JÁDRA SE SLUČUJÍ

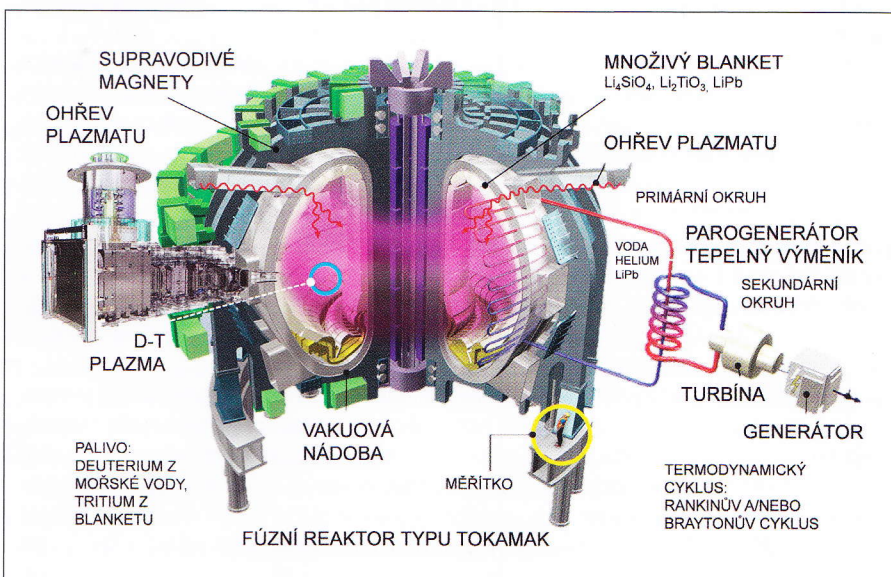
Termojaderná fúze je zdrojem energie hvězd, včetně našeho Slunce. Jde o proces, při kterém se za velmi vysokých teplot slučují atomová jádra, a to převážně jádra vodíku na helium. Je tedy zřejmé, že pokud by se nám podařilo zkonstruovat termojaderný reaktor, získali bychom nový, velmi výkonný a přitom surovinnově zajištěný zdroj energie. Zdroj navíc mimořádně bezpečný, protože produktem reakce je malé množství naprosto neškodného hélia, a udržování potřebných extrémně vysokých teplot je možné jen za předpokladu fungujícího systému řízení. Jedná se přitom o teploty opravdu mimořádně vysoké – jádra paliva totiž musí mít takovou tepelnou rychlost, aby s dostatečnou četností překonávala vzájemně elektrické odpuzování. To začíná platit až od teplot desítek miliónů stupňů.

Při takových teplotách je látka ve stavu plně ionizovaného plynu neboli fyzikálního plazmatu, jehož studiu se dnes věnuje velká řada vědeckých pracovišť, a to zdaleka nejen kvůli termojaderné fúzi.

## VÝZKUM ZAČAL PŘED ŠEDESÁTI LETY

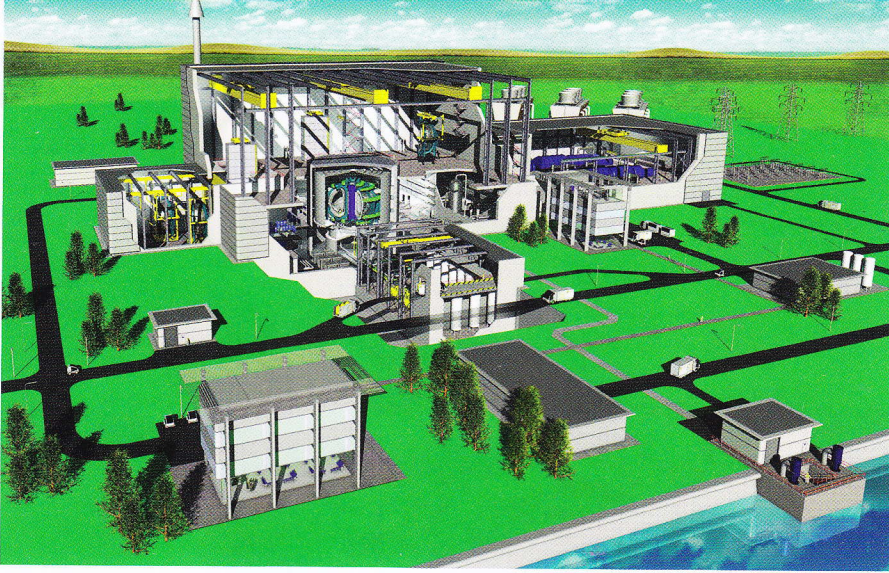
Fyzikové vstupovali před šedesáti lety do výzkumu fúze s velkým optimismem, který byl založen jednak na zjednodušených výpočtech, a jednak na prvních pozorováních produktů fúzních reakcí. Experimenty ale záhy ukázaly, že dosažení velmi vysokých teplot brání řada nestabilit, které v lepším případě vedou ke složitému turbulentnímu chování plazmatu, a v horším případě k úplné ztrátě kontroly. V prvním případě plazma špatně udržuje teplo, protože horké částice turbulencemi rychle unikají ven, ve druhém případě se plazma srazí se stěnou experimentálního zařízení a okamžitě vychladne. Brzy bylo zřejmé, že turbulentnímu transportu tepla (na rozdíl od nestabilit) nedokáže zcela zabránit žádné zařízení, a proto bude třeba počítat s poměrně špatným udržením tepla v sebelépe ovládaném plazmatu. Jediný prostředek, kterým umíme rychlý

přenos tepla kompenzovat, je pak dostatečná velikost plazmatu. A tak již před čtyřiceti lety začínalo být zřejmé, že nádoba fúzního reaktoru musí mít značnou velikost, zajišťující objem plazmatu kolem jednoho tisíce metrů krychlových. Škoda, že nevyšel menší – to by bylo snadné postavit demonstrační fúzní reaktor – na druhou stranu ale musíme být rádi, že nevyšel podstatně větší, protože to by znamenalo, že je dostupnými technickými prostředky nerealizovatelný. Krátce předtím se také ukázalo, že největší naději pro zvládnutí řízené fúze představuje zařízení nazývané tokamak, ve kterém je poměrně řídké vysokoteplotní plazma stabilně udržováno ve vakuu silným magnetickým polem. A dlouhých čtyřicet let pak trvalo, než se podařilo postupně navrhnout a především prosadit stavbu prvního dostatečně velkého experimentálního fúzního reaktoru ITER. Ten má konfiguraci tokamaku a staví jej v současné době sedm mocností (EU, Japonsko, Ruská federace, USA, Čína, Jižní Korea a Indie) ve francouzském výzkumném středisku Cadarache. Jen pro úplnost dodejme, že fyzikové vyvíjejí i několik dalších nadějných konfigurací magnetického pole (zejména stellarátory a pinče) a také nadále pracují



Obrázek č. 1: Funkční schéma fúzního reaktoru založeného na konfiguraci tokamak





Obrázek č. 2: Schéma fúzní elektrárny s reaktorem typu tokamak

Zdroj: ITER Organization

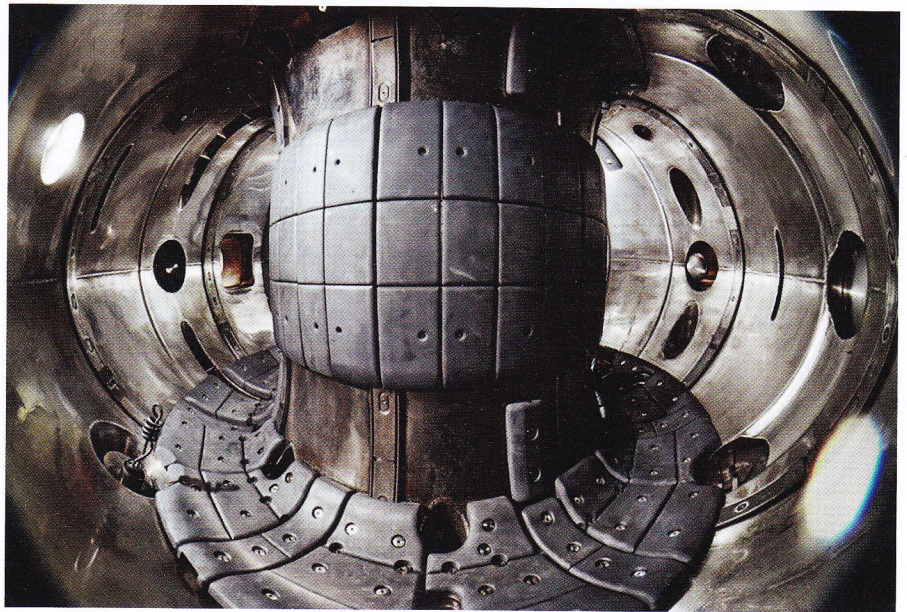
na úplně odlišném principu, který je znám jako inerciální fúze. V inerciální fúzi se pomocí intenzivních laserových svazků odborníci snaží zapálit fúzi jen na kratičký okamžik, zato s vysokou hustotou paliva. Klíčová zařízení inerciální fúze se jmenují NIF (USA) a Laser Mégajoule (Francie).

### UPLATNILA SE FYZIKA PLAZMATU

Fúzní výzkum na bázi udržení v magnetickém poli se mezitím zásadně proměnil – fyzika plazmatu odvedla neuvěřitelný kus práce, plazma se dnes daří stabilně izolovat od stěn zařízení po dobu mnoha desítek sekund, a běžně jsou dosahovány optimální teploty pro fúzi, tj. zhruba sto miliónů stupňů. Na evropském tokamaku JET byl pozorován výkon fúzních reakcí až do řádu desítek megawattů, při kterém byl již prokázán i samohřev plazmatu fúzí. Tím byl výzkum termojaderné fúze přiveden do situace, ve které je další pokrok především otázkou technického, tj. jaderně-inženýrského vývoje. Je třeba detailně řešit otázky chlazení, materiálů, palivového cyklu i radiační bezpečnosti, které byly dřív jen předmětem akademických diskusí. ITER se stal prvním fúzním zařízením, které potřebovalo (a již i získalo) řádnou jadernou licenci. Fúzní elektrárny se samozřejmě budou řídit stejnými bezpečnostními pravidly jako nové jaderné elektrárny.

### DEMONSTRAČNÍ FÚZNÍ ELEKTRÁRNA DEMO

Slovo „iter“ v latině znamená „cesta“ a projekt ITER je skutečně krokem na cestě k fúznímu energetickému zdroji. ITER má umožnit získat dostatek experimentálních údajů a zkušeností, aby bylo možné postavit fúzní elektrárnu. První fúzní elektrárna bude podobná existujícím jaderným elektrárnám, jen místo štěpného jaderného reaktoru bude fúzní reaktor. Fúzní reaktor bude produkovat teplo, které bude chladicím okruhem odváděno k výrobě elektrické energie. K tomu ale musí být ještě vyřešena řada vědeckých a technologických úkolů. Fyzika plazmatu musí být dopracována do stavu, který umožní rutinně ovládat fúzní plazma při provozu



Obrázek č. 3: Pohled do vakuové nádoby tokamaku COMPASS

Zdroj: ÚFP AV ČR

elektrárny. Musí být dopracovány a zdokonaleny metody diagnostiky a potlačování poruch plazmatu, aby tyto poruchy nehrály v provozu energetických reaktorů podstatnou roli a nenarušovaly výrobu elektřiny. Technologické úkoly zahrnují především vývoj vysoce odolných materiálů a konstrukcí vnitroreaktorových komponent, včetně možnosti jejich údržby či výměny, a zdokonalení technologie pro ohřev plazmatu a neinduktivního generování proudu. Odolnost materiálů vnitroreaktorových komponent i účinnost ohřevu plazmatu se budou výraznou měrou promítat do ekonomiky fúzních elektráren. První fúzní elektrárna bude muset prokázat, že uvedené úkoly byly úspěšně vyřešeny. Proto je označována jako Demonstrací fúzní elektrárna, zkráceně DEMO. Na projektu DEMO dnes začíná pracovat nezávisle většina partnerů ITER.

### NOVÉ MATERIÁLY ZMĚNILY VÝZKUM

Velký význam nejenom pro oblast jaderné fúze má vývoj nových materiálů, které musí vydržet náročné podmínky uvnitř fúzního reaktoru. Ačkoliv je plazma spoutáno ve vakuu magnetickým polem reaktoru, intenzivně

působí na okolní konstrukce. Zařízení umístěná uvnitř fúzního reaktoru se označují jako fúzní jaderná technologie a zahrnují především tzv. první stěnu, divertor a blanket reaktoru. První stěna označuje vnitřní stěnu reaktoru, která vymezuje prostor s plazmatem. Divertor je zařízení, které odklání (divertuje) siločáry magnetického pole, odvádí okrajové plazma od první stěny a snižuje množství nečistot v plazmatu. Blanket reaktoru je vnitřní obal reaktorové nádoby přímo navazující na první stěnu a jeho primární funkcí je odvádět uvolněnou energii z reaktoru. V první

generaci fúzních reaktorů bude v blanketu také probíhat výroba izotopu vodíku, tritia (se dvěma neutrony v jádře) ozařováním lithia neutrony, produkovanými fúzní reakcí. Tritium a deuterium totiž představují nejreaktivnější palivo, jejich fúze je nejsnáze dosažitelná, tritium se však v přírodě nevyskytuje. První stěna a divertor, společně označované jako *Plasma Facing Components* (komponenty obklopující plazma) jsou vystaveny extrémnímu působení plazmatu ve formě vysokého energetického toku a přímého kontaktu s plazmatem. Proto musí být vyrobeny z materiálů, které tomuto působení odolají, a musí být velmi dobře chlazené.

Energetický tok na první stěnu ITER má dosahovat celkově až 700 MW a bude tvořen tokem vysokoenergetických neutronů (14 MeV) o velikosti přibližně 1 MW/m<sup>2</sup> a tepelným tokem (tepelnou radiací) nárazově až 5 MW/m<sup>2</sup>. Divertor sice nebude zatěžován tak velkým tokem neutronů, avšak tepelný tok může dosahovat až 20 MW/m<sup>2</sup>. Při poruchách plazmatu může být po krátkou dobu energetický tok ještě mnohonásobně vyšší. Například tzv. ubíhající elektrony mohou způsobit velice krátký a lokalizovaný



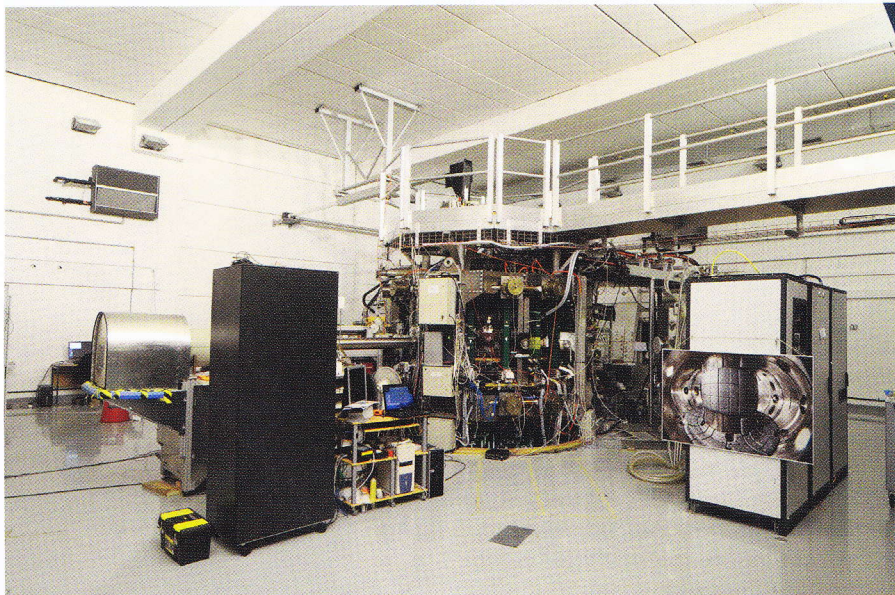
energetický impuls na první stěnu o velikosti až 40 GW/m<sup>2</sup>. Extrémní energetický tok patří mezi nejdůležitější specifika fúzních energetických reaktorů.

## MATERIÁLY PRO FÚZI

Na základě fyzikálních vlastností se pro první stěnu a divertor velkých fúzních reaktorů hodí nejlépe wolfram, které má ze všech kovů nejvyšší teplotu tání: 3422° C, a má také vysokou tepelnou vodivost. Wolfram je ale nevhodný z hlediska možného znečištění vysokoteplotního plazmatu, protože se z něj vzhledem k vysokému atomovému číslu stává za vysokých teplot velmi intenzivní zdroj rentgenového záření. To může způsobit tak velké tepelné ztráty, že plazma zanikne. Hlavně z tohoto důvodu bude první stěna reaktoru ITER vyrobena z berylia, nejjednoduššího existujícího kovu s atomovým číslem 6. Berylium má ale nízkou teplotu tání, a proto nebude vhodné pro energetický reaktor. Nejvíce tepelně namáhaná součást reaktoru, divertor, bude každopádně již v ITER vyrobena z wolframu.

## S WOLFRAMEM SE NEVYSTAČÍ

V případě reaktoru DEMO bude první stěna podle současných představ vyrobena buď celá z wolframu, nebo přímo z nízkoaktivovatelné feriticko-martenzitické oceli. Pro její ochranu je zvažována wolframová povrchová vrstva nebo zpevnění povrchu dopováním oxidy nejrůznějších látek po vzoru ODS ocelí. Konečné řešení první stěny ale musí být navrženo v souladu s dosaženým pokrokem ve fyzice plazmatu reaktoru. Divertor reaktoru DEMO bude muset zvládnout dlouhodobou vysokou zátěž, včetně spouštění a odstavení reaktoru. Protože wolfram trpí při vyšších teplotách rekrystalizací a při nízkých teplotách křehnutím, jsou pro energetický reaktor vyvíjeny na bázi wolframu nové materiály, které tyto nedostatky nebudou mít. Mezi



Obrázek č. 4: Celkový pohled na tokamak COMPASS v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR

Zdroj: ÚFP AV ČR

perspektivní materiály patří například lamináty, kompozity, funkčně gradované materiály nebo speciální slitiny wolframu s mědí.

## OCEÁN DÁ ENERGI NA MILIARDY LET

Fúzní elektrárna o elektrickém výkonu 1000 MW spotřebuje denně méně než 1 kg vodíkových izotopů. Ve světových oceánech se přitom nachází 1,53×10<sup>20</sup> kg vodíku a z toho 4,76×10<sup>16</sup> kg potřebného izotopu deuteria. Při současné celosvětové energetické spotřebě by zásoby deuteria vystačily pro celý svět na dobu zhruba 8 miliard let – déle, než existuje naše Země a déle, než bude existovat Slunce ve své současné podobě. Fúzní elektrárna o zmíněném výkonu 1000 MW<sub>EL</sub> každý den přefiltruje přibližně 25 m<sup>3</sup> vody, z toho 24 999 m<sup>3</sup> vrátí zpět do moře. Jako odpad vyprodukuje 0,5 kg inertního helia. Jinými slovy, pro 1 měsíc plného provozu fúzní elektrárny o stejné velikosti, jako je naše největší

jaderná elektrárna v Temelíně, bude stačit přefiltrovat vodu ze standardního plaveckého bazénu. Než bude zvládnuta fúze využívající pouze deuterium, bude vstupem palivového cyklu také lithium pro výrobu tritia. I zásoby lithia jsou ovšem v zemské kůře (a nakonec i v recyklovaných akumulátorech počítačů) obrovské a vydržely by vospělé civilizaci na mnoho tisíciletí.

Výhody fúzních elektráren jsou natolik zásadní, že se fúzní elektrárny dříve či později bezpochyby stanou páteří světové energetiky.

## O AUTORECH

**Doc. RNDr. JAN MLYNÁŘ, Ph.D.**

vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu v Praze. Po dvouletém působení v ČEZ, a.s., získal postdoktorský úvazek na švýcarském tokamaku TCV. V roce 2003 přijal čtyřletý kontrakt na evropském tokamaku JET. Po návratu do ČR působí na tokamaku COMPASS v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR a zároveň se věnuje výuce na JFI ČVUT.

**Ing. SLAVOMÍR ENTLER** vystudoval Energeticko-fyzikální fakultu Moskevského energetického institutu, poté zakládal výzkum fúzních technologií v ÚJV v Řeži u Prahy. V letech 1992 až 2012 pracoval v soukromém sektoru na modernizaci energetických zařízení. Od roku 2013 pracuje v Centru výzkumu Řež a věnuje se výzkumu fúzní jaderné technologie.

Kontakt: [mlynar@ipp.cas.cz](mailto:mlynar@ipp.cas.cz)  
[Slavomir.Entler@cvrez.cz](mailto:Slavomir.Entler@cvrez.cz)



Obrázek č. 5: Staveniště mezinárodního fúzního experimentu ITER. Dobře je vidět základová deska pro tokamak. S laskavým svolením ITER Organization.

Zdroj: ITER Organization