

## Principy termojaderného reaktoru ITER

*Jan Mlynář, FJFI ČVUT, Praha*

**Abstract.** ITER, a major international infrastructure dedicated to fusion research, will be built in France in order to validate and develop thermonuclear fusion as a new abundant resource of energy. In this article, elementary physical properties of high temperature plasmas confined by magnetic field are reviewed with respect to our technical capabilities, thus explaining step by step the form, functionality, requirements and in particular the size of the ITER reactor. The text also includes a few relevant historical remarks, and mentions possible paths towards fusion energy as well as the prospects of this unique challenge that requires cutting edge science and technologies.

### Úvod

Perspektiva lidstva z hlediska zásobování energií není právě růžová. Spotřeba energie přitom stále roste, a to hlavně ze dvou důvodů: lidí přibývá a řada chudých zemí začíná bohatnout. Bude vůbec možné energii nadále někde brát a neničit přitom životní prostředí? Příroda nám dává celkem jasnou odpověď: Ano, v principu to možné je, ale bude to velmi složité. Důvodem k opatrnému optimismu je to, že život na Zemi má mnohem větší energetický obrat nežli civilizace, a to nemluvíme o takových procesech, jako je koloběh vody nebo pohyb atmosféry. Stále ještě platí, že se na Zemi může lidem žít dobře, pokud nebudeme bezohledně narušovat její rovnováhu. Naprostá většina dnešního blahobytu je postavena doslova na „pálení ohňů“ v měřítku, které není dlouhodobě udržitelné. Pomalu si to snad uvědomujeme a začínáme se postupně učit, jak se procesů zachycování a spotřeby energie v přírodě co nejlépe a co nejšetrněji účastnit, nebo alespoň jak zmírnit nežádoucí důsledky toho, jak užíváme energii dnes. Vedle toho se pokoušíme s dostupnými technickými prostředky sestavit principiálně nové zařízení na uvolňování energie, které by bylo inspirováno stabilním, prakticky nevyčerpateľným a nesmírně bohatým zdrojem tepla a světla pro celou naši planetu, totiž Sluncem. Snažíme se o to již třetí generaci, ale teprve teď se v tomto směru začíná realizovat opravdu úctyhodný mezinárodní projekt, známý pod jménem ITER [1]. ITER se stává po mezinárodní vesmírné stanici

ISS největší výzkumnou investicí lidstva a předčí tím i CERN. Pokusme se zde shrnout, jak fyzikové vlastně dospěli k jeho podobě a funkci.

### Termojaderná fúze

Je tomu teprve devadesát let, co vynikající britský astrofyzik Arthur S. Eddington správně „uhodl“ mechanismus uvolňování energie ve Slunci (a vlastně prakticky ve všech hvězdách) [2]: V nitru hvězd dochází za velmi vysokých teplot ke slučování (fúzi, syntéze) vodíku na hélium. Vyřešil tím jednu z velkých fyzikálních záhad té doby. Až mnohem později bylo možné dopočítat, že měl pravdu – v roce 1920 ještě nebylo známo nic o neutronech, o struktuře atomového jádra ani o jaderných interakcích a Eddington svoji úvahu založil pouze na znalosti Einsteinova vztahu  $E = mc^2$  a čerstvě naměřeného překvapivého rozdílu v hmotnosti atomu hélia oproti čtyřem atomům vodíku (Francis W. Aston, Nobelova cena za chemii 1922). Čas ukázal, že Eddingtonova úvaha byla bezchybná.<sup>1)</sup>

Protože jde ve hvězdách o reakci slučování atomových jader za velmi vysokých teplot, vžil se pro ni název „termojaderná fúze“ (dříve se říkalo též „termojaderná syntéza“, což bylo bližší ruštině; místo přívlastku „termojaderná“ se často užívá „termonukleární“). Naopak zatím není zcela vžitě, že jde vlastně o proces spalování. V podstatě jediným rozdílem oproti ohni je to, že se energie neuvolňuje díky reakcím mezi atomy, ale přímo mezi atomovými jádry. Stejně jako u spalování (a narozdíl od jaderného štěpení!) množství paliva není pro spuštění reakcí vůbec podstatné. Zato zásadním způsobem záleží na teplotě – reakce spalování

<sup>1)</sup> Energii uvolňovanou ve Slunci fúzními reakcemi lze tak počítat poměrně jednoduše: Jestliže je hmotnost vodíkového atomu  $m_H = 1,007\,825\,m_u$  a hmotnost atomu hélia  $m_{He} = 4,002\,6\,m_u$ , vychází rozdíl klidových hmotností  $\Delta m = 4m_H - m_{He} = 0,0287\,m_u$ . Po dosazení číselných hodnot pro atomovou hmotnostní konstantu  $m_u = 1,660\,54 \cdot 10^{-27}\,kg$  a rychlost světla  $c = 2,997\,92 \cdot 10^8\,m \cdot s^{-1}$  vychází energie uvolněná při transmutaci čtyř vodíků na hélium  $\Delta E = \Delta mc^2 = 4,28 \cdot 10^{-12}\,J = 26,7\,MeV$ . Výhodou tohoto výpočtu je, že se vůbec nemusíme zajímat o mechanismy, kterými se energie uvolňuje (a které zahrnují i přeměnu protonu na neutron a anihilaci pozitronu s elektronem). Stejně tak lze snadno odvodit, že při výkonu Slunce  $3,939 \cdot 10^{26}\,W$  (tato hodnota obsahuje veškerý vyzařovaný výkon včetně neutrin) se každou sekundu spálí  $6,16 \cdot 10^{11}\,kg$  vodíku. Jde o impozantní číslo jen do té doby, než jej srovnáte s hmotností celého Slunce, která je  $2 \cdot 10^{30}\,kg$ . Zrovna tak si můžete odvodit, že měrný výkon tohoto „přírodního fúzního reaktoru“ není nijak ohromující a vychází jen několik stovek Wattů na metr krychlový – fúzní reakce se totiž odehrávají od středu Slunce do zhruba  $1/10$  jeho poloměru, tj. v objemu přibližně  $4/3 \pi \cdot 7 \cdot 10^7\,m^3 = 1,44 \cdot 10^{24}\,m^3$ . Sluneční reaktor tedy vyvíjí v přepočtu na jednotku objemu méně tepla než metabolismus lidského těla!

začínají měřitelně probíhat (a tedy uvolňovat energii) až od určité kritické teploty. Okamžik, kdy dojde k vyrovnání výkonu reakcí a tepelných ztrát, nazýváme v obou případech „zapálením“. Zapálení zásadně mění situaci, od té chvíle totiž dokáží samy reakce udržovat teplotní podmínky nutné k dalšímu spalování – mluvíme o hoření.<sup>2)</sup> Lze tedy právem říci, že společným rysem Slunce a ohně je to, že někdy v minulosti muselo dojít k jejich zapálení a až jim dojde palivo, nutně vyhasnou.

Oproti ohni je ovšem termojaderná fúze nesrovnatelně vydatnější – z daného množství paliva uvolní téměř miliardkrát více energie. Místo milionů tun uhlí by proto termojaderné elektrárně stačilo pár kilogramů vodíku, místo milionů tun zplodin bychom produkovali pár kilogramů hélia. Podmínky nutné k zapálení fúze jsou ovšem nesrovnatelně tvrdší než k zapálení ohně. Poprvé je správně odvodil před více než padesáti lety britský inženýr J. D. Lawson [3]: Za prvé, je třeba dosáhnout teploty ideálně v řádech stovek miliónů Kelvinů, a za druhé, musí být zajištěna dostatečná hustota paliva – tím vyšší, čím bude mít hořící palivo větší tepelné ztráty. K druhé, technicky hůře splnitelné podmínce, se ještě vrátíme. Nyní se budeme věnovat podmínce vysoké teploty.

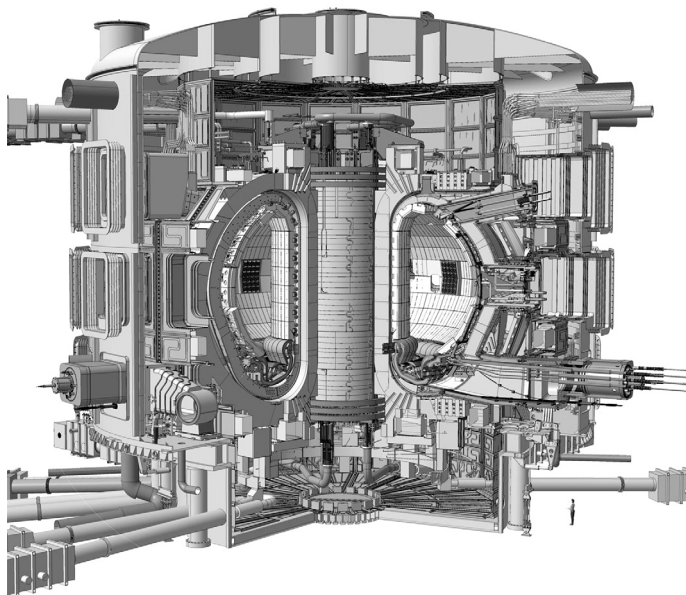
### Teplota potřebná k zapálení fúze

Již za teplot kolem desetitisíce stupňů se začínají atomy srážet tak vysokou rychlostí, že se srážkou ionizují – z plynu se stává tzv. fyzikální plazma. Plazma je zvláště zajímavé tím, že v něm funguje silové působení na dálku; nikoliv lokální srážky, ale dalekodosahové elektrické a magnetické síly rozhodují o drahách částic [4]. Za teploty potřebné pro termojaderné reakce bude palivo ve stavu plně ionizovaného plazmatu, ve kterém se místo atomů pohybují zvláště atomová jádra a zvláště elektrony. Tato skutečnost nám dává jedinečnou možnost palivo izolovat a ovládat pomocí dalekodosahových sil, například pomocí magnetického pole. Nabitě částice se totiž v magnetickém poli pohybují podél jeho silokřivek. Z hlediska izolování horkého plazmatu od našeho „chladného světa“ je proto nejlepší, pokud silokřivky z plazmatu vůbec nevychá-

---

<sup>2)</sup> Pro přemýšlivé: Znamená to, že po zapálení nastane nadprodukce výkonu reakcí, která povede k nekontrolovanému nárůstu teploty? Ano, ale nejde o nic hrozného. V okamžiku zapálení skutečně nastane tzv. tepelná nestabilita, proces hoření nicméně záhy nalezne stabilitu při vyšší teplotě – jak známo, teplota hoření je vyšší než zápalná teplota. Stabilizujícím faktorem je to, že vyšší teplota znamená zpravidla vyšší tepelné ztráty a často i určité zhoršení podmínek pro reakci (snížení tzv. účinného průřezu reakci).

zejí – tj. pokud se dráhy částic v plazmatu uzavírají.<sup>3)</sup> Nejjednodušším a dnes zdaleka nejužívanějším řešením je spoutání plazmatu do tvaru prstence (čili do tvaru pneumatiky, američané také říkají „doughnut-shape“ vzhledem k tvaru jejich koblih). Potřebné magnetické pole vytváří tzv. cívka toroidálního pole – vlastně obyčejný solenoid stočený do prstence. Dvnitř této cívky pak „stačí“ vložit nádobu s palivem, které se zahřeje na potřebné termojaderné teploty. Jak je vidět na obr. 1, ITER má v zásadě vypadat právě tak. Jen je ze tří důvodů mnohem složitější.

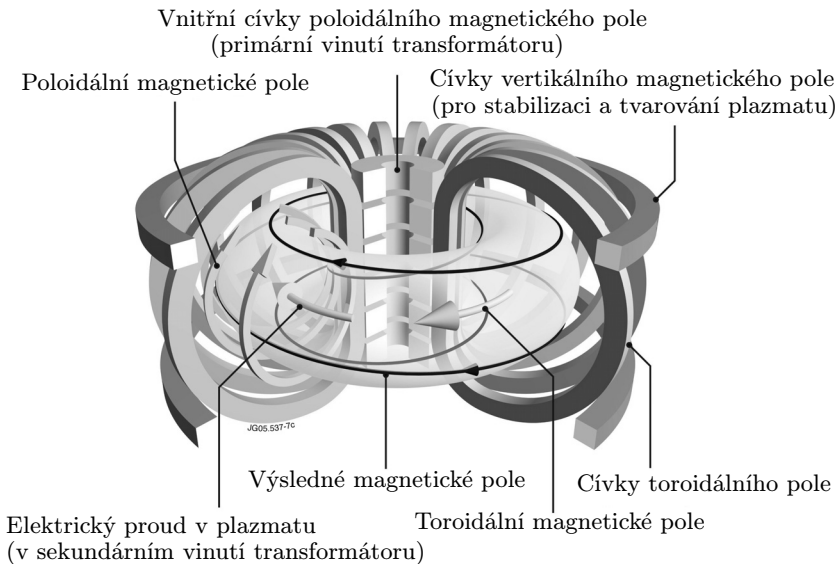


Obr. 1. Schéma reaktoru ITER v řezu

Za prvé, z teorie stability plazmatu v magnetickém poli bylo hned zpočátku známo, že samotné pole toroidální cívky k udržení plazmatu ne-

<sup>3)</sup> Nabité částice mají v magnetickém poli dvě složky rychlosti: podél siločivky a kolmo k siločivce, kolem které rotují. V případě plazmatu nalezneme v obou složkách tepelné rozdělení rychlostí, což také znamená, že směr pohybu částic je v libovolně zvoleném malém objemu zcela nahodilý. Je tomu tak přesto, že rotace kolem siločivky má výsadní směr, který je dán nábojem částice a směrem pole. Tento zdánlivý paradox má jednoduchou interpretaci – siločivky popisují kontinuum, tj. každá částice má jinou osu rotace. Všimněte si také, že při stejné teplotě je průměrná rychlost elektronů kvůli jejich nízké hmotnosti výrazně vyšší než průměrná rychlost jader.

stačí (je to blíže vysvětleno např. v rámečku na konci článku [5]). Je třeba dosáhnout toho, aby se silokřivky na své cestě kolem prstence pomalu stáčely do šroubovice (obr. 2), tj. aby navíc k hlavnímu toroidálnímu poli existovala i složka magnetického pole obepínající plazmatický sloupec (tzv. poloidální magnetické pole). Jednou z metod, jak toho dosáhnout, je vytvořit a udržovat v prstenci plazmatu silný elektrický proud. Tento princip využívá konfigurace zvaná *tokamak*. V tokamaku se (alespoň zpočátku) proud v plazmatu indukuje transformátorovým efektem. U tokamaku tedy najdete primární vinutí s mnoha závity, sekundárním vinutím nakrátko je jediný závit plazmatu (obr. 2). Tokamak potřebuje i velké prstencové cívky vertikálního pole (v principu stačí Helmholtzovy cívky), které zajišťují, aby se plazma nerozpínalo. Magnetická pole dnešních tokamaků jsou navíc řízena zpětnovazebními systémy, tj. reagují v reálném čase na náhodný pohyb plazmatu a „zatlačují“ ho zpátky do požadované polohy. Fantastickým výsledkem uplynulých 50 let výzkumu je fakt, že z původně milisekundových experimentů se dnes daří udržovat vysokoteplotní plazma kontinuálně (desítky minut). ITER je také tokamak, typický experiment s vysokoteplotním plazmatem v něm má trvat několik minut, vyloučeny ale nejsou ani hodinu trvající experimenty.



Obr. 2. Schéma tokamaku – černě je vyznačen průběh typické silokřivky

Za druhé, za účelem dosažení termojaderných teplot je nutné k tokamaku připojit velké systémy ohřevu plazmatu, blíže viz např. [6]. Zatím nejvhodnějším systémem ohřevu jsou tzv. neutrální svazky, které chrlí do plazmatu obrovské množství velmi rychlých atomů. Ty se v plazmatu ionizují, načež jsou okamžitě zachyceny magnetickým polem a pak postupně srážkami předávají svoji kinetickou energii pomalejším částicím plazmatu. Druhým používaným systémem jsou elektromagnetické vlny, které podobně jako v mikrovlnné troubě plazma ohřívají pomocí absorpce vln na rezonančních frekvencích. K dosažení i k prostému udržení (tj. ke kompenzaci neustálých tepelných ztrát) velmi vysokých teplot horkého plazmatu jsou nutné mimořádně vysoké výkony ohřevu. U velkých tokamaků včetně ITER se jedná o desítky megawattů (!). Připomeňme, že všechny systémy ohřevu je po zapálení možné vypnout (tak jako po zapálení ohně již nebudeme potřebovat zápalku) – s určitým ohřevovým výkonem se nicméně počítá i u budoucích reaktorů, a to jednak kvůli možnosti řídit výstupní výkon a jednak kvůli možnosti optimalizovat oblast plazmatu, ve které bude probíhat termojaderná fúze. Samozřejmě všechny tyto velké systémy ohřevu jsou dnes také řízeny v reálném čase, tj. umí automaticky reagovat na parametry plazmatu. Díky pokroku v ohřevu plazmatu dnes již není žádný problém dosahovat potřebných termojaderných teplot (kolem 200 milionů stupňů), řada tokamaků demonstrovala i „přestřelení“ teploty. Například na japonském JT-60U bylo dosaženo přes půl miliardy stupňů [7], kdy již fúze funguje hůř (ztráty výkonu rostou rychleji než fúzní výkon).

Za třetí platí, že ta nejsilnější magnetická pole, která dokážeme v tokamaku vyrobit (řádově Tesla) zvládnou termojaderné plazma o tlaku, který odpovídá několikanásobku atmosférického tlaku (čili tlaku několika set tisíc Pascalů). Technicky nelze dosáhnout podstatně vyšších magnetických polí, a tedy ani vyšších tlaků plazmatu, a to mimo jiné proto, že by to konfigurace tokamaku mechanicky nevydržela – cívky na sebe totiž během experimentu působí vzájemně obrovskými elektromechanickými silami. Proto musí být konstrukce tokamaků velmi pevná. Ovšem pozor, tlak plynu (i plazmatu) je úměrný součinu teploty a hustoty. Jestliže má plazma za stamilionových teplot atmosférický tlak, znamená to, že musí mít zhruba milionkrát nižší hustotu než vzduch (který má atmosférický tlak za teplot řádově stovek Kelvinů)<sup>4)</sup>. Skutečně, palivo se do tokamaku

---

<sup>4)</sup> Všechno zlé je k něčemu dobré. Fakt, že realistická magnetická pole zvládají pouze nízké hustoty paliva, sice velmi výrazně snižuje dosažitelný výkon termojaderných

před experimentem napouští za pokojové teploty na tlak řádově několika desetin Pascalů. Ve vysokoteplotním plazmatu přitom chceme pouze palivo, a nic jiného než palivo, žádný kyslík nebo dusík ze vzduchu, který by způsoboval vyšší ztráty tepla rentgenovým zářením a navíc by snižoval pravděpodobnost toho, že se v plazmatu srazí a sloučí částice paliva. Proto je palivo třeba napouštět do nádoby, ze které byl všechn vzduch co nejlépe vyčerpán. Prstencová nádoba tokamaků musí proto být zároveň i velmi kvalitní vakuovou nádobou. Ta musí být před experimentem vyčerpána na vysoké vakuu, běžně na milióntiny napouštěcího tlaku (tj. na  $10^{-7}$  Pa). Přitom například vakuová nádoba ITER má objem přes 1 000 m<sup>3</sup>. Zajistit tak vynikající vakuu u velkých tokamaků je další dosud nevidaná technická výzva, viz např. [8]. Vakuové čerpání bude na ITER řešeno pomocí velkých vymrazovacích vývěv, ve kterých veškerý plyn namrzá na plochách chlazených kapalným héliem [9].

A stále za třetí, k vytvoření vysokých magnetických polí v řádu Tesla je nutné, aby v cívkách tekla velmi vysoký elektrický proud. Jeho výše závisí na počtu závitů, ale zpravidla jde o desítky tisíc Ampér. Dokud jsou cívky tokamaku z běžného vodiče (nejčastěji z mědi), nemůžeme experimentovat příliš dlouho. Takový tokamak má obrovský příkon (český tokamak COMPASS [10] spotřebovává během experimentu desítky megawattů elektřiny, společný evropský tokamak JET [11] dokonce stovky megawattů) a ten jde ještě ke všemu na nežádoucí ohřev cívek. Již po několika vteřinách (či u větších zařízení po několika desítkách vteřin) je třeba experiment ukončit, jinak by tepelné rozpínání mědi vedlo k nevratným deformacím cívek. Po experimentu se cívky zpravidla dvacet minut chladí vodou, která protéká samotnými dutými měděnými vodiči. Jedinou realistickou alterativou, která umožní kontinuální experimentování (a v budoucnosti provoz reaktoru) a zároveň zásadním způsobem srazí vlastní spotřebu elektrické energie, je použití supravodivých cívek. Právě proto bude mít ITER supravodivé cívky tak, jako je má již dnes řada menších moderních tokamaků (francouzský Tore Supra, čínský EAST, korejský KSTAR...<sup>5)</sup>). Použití supravodivých cívek ovšem před-

---

reakcí, zato znamená jedinečnou bezpečnostní pojistku. Přestože totiž pracujeme s tak vysokými teplotami, vzhledem k nízké hustotě plazmatu je celková tepelná energie paliva nízká. Pokud ztratíme nad plazmatem kontrolu a plazma se srazí se stěnou, plazma okamžitě vychladne, reakce se zastaví, přičemž se miliardkrát hustší stěna žádným nebezpečným způsobem nezahřeje.

<sup>5)</sup> Supravodivé cívky toroidálního magnetického pole byly poprvé použity před více než třiceti lety na tokamaku T-7 v moskevském Kurčatovově ústavu. Na systému,

stavuje další obrovskou technickou a investiční komplikaci. Supravodiče jsou velmi drahé, křehké, vyžadují neustálé chlazení kapalým héliem a také musejí být uzavřeny v kryostatu (v technickém vakuu), jinak by se na nich rychle vytvářela námraza. Všimněte si na obr. 1 velkého kryostatu kolem ITER, kvůli kterému vlastně ze samotného tokamaku budoucí návštěvníci nic neuvidí. ITER bude mít největší supravodivé cívkvy světa; dnes toto prvenství drží detektor CMS v CERN [13].

Tím jsme prošli všechny hlavní principy, které daly ITER jeho podobu, kromě jediného: co vlastně určuje velikost ITER. Proč nemůžeme postavit malý termojaderný reaktor?

### Hustota paliva

Zde se musíme vrátit ke druhé Lawsonově podmínce, která je mezi odborníky známa jako „Lawsonovo kritérium“: V reaktoru musí být dostatečná hustota paliva, tím vyšší, čím vyšší jsou tepelné ztráty plazmatu. Toto kritérium lze jednoduše zapsat pomocí vzorce

$$n \cdot \tau_E > 1,5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s},$$

kde uvedená číselná hodnota odpovídá nejméně náročné fúzi deuteria s tritiem<sup>6)</sup> při optimální teplotě,  $n$  je hustota částic (přesněji řečeno počet

který v něm nahrazoval indukovaný proud proudem vlečeným pomocí vysokofrekvenčního vlnění, se významně podíleli i naši odborníci. Tento tokamak je dnes provozován v čínském Hefei pod názvem HT-7 [12].

6) Deuterium D a tritium T (čti trícium), čili těžký a supertěžký vodík (a ještě jinak izotop vodíku s jedním a se dvěma neutrony v jádře) jsou prvními kandidáty na palivo budoucích fúzních elektráren, protože oproti jiným fúzním reakcím dochází k fúzi D+T poměrně snadno (tato reakce má velký tzv. účinný průřez). Produktem fúze D+T je jádro hélia  ${}^4\text{He}$  (čili částice alfa) a neutron. Tak jako v předchozím příkladě lze snadno odvodit, kolik energie fúzní reakce D+T uvolní: Při hmotnosti deuteria  $m_D = 2,0141 m_u$ , tritia  $m_T = 3,0160 m_u$ , neutronu  $m_n = 1,0087 m_u$  (a hélia z předchozího příkladu) dostáváme  $\Delta mc^2 = 2,81 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 17,5 \text{ MeV}$ . Tuto energii odnášejí ve formě kinetické energie produkty, tj. neutron a alfa částice. Za pozornost rozhodně stojí, že lehký neutron odnáší přibližně čtyři pětiny energie (14 MeV), zatímco alfa částice jen jednu pětinu (2,5 MeV). Zkuste sami ukázat, že takové rozdělení energií plyne přímo ze zákonů zachování hybnosti a energie. Skutečnost, že při fúzi D+T vznikají energetické neutrony, je na jednu stranu nepříjemná (neutrony plazma neohřejí, protože je magnetické pole reaktoru nezachytí, a navíc představují z hlediska materiálů reaktoru obrovskou radiační zátěž), na druhou stranu neutrony přenášejí energii do hloubky materiálů a tím se u prvních reaktorů výrazně zjednodušuje přenos výkonu – chlazení reaktoru může být objemové, v asi metr tlusté obálce reaktoru. Bez neutronů bychom museli odvádět veškerý fúzní výkon jen z povrchu stěny vystavené plazmatu a to by byl na dnešní fyziku a techniku zatím příliš tvrdý oříšek.



elektronů na metr krychlový plazmatu) a tzv. doba udržení energie  $\tau_E$  charakterizuje právě množství tepelných ztrát plazmatu. Doba udržení energie je za podmínky tepelné rovnováhy (kdy tepelná energie plazmatu neklesá ani neroste) definována jako

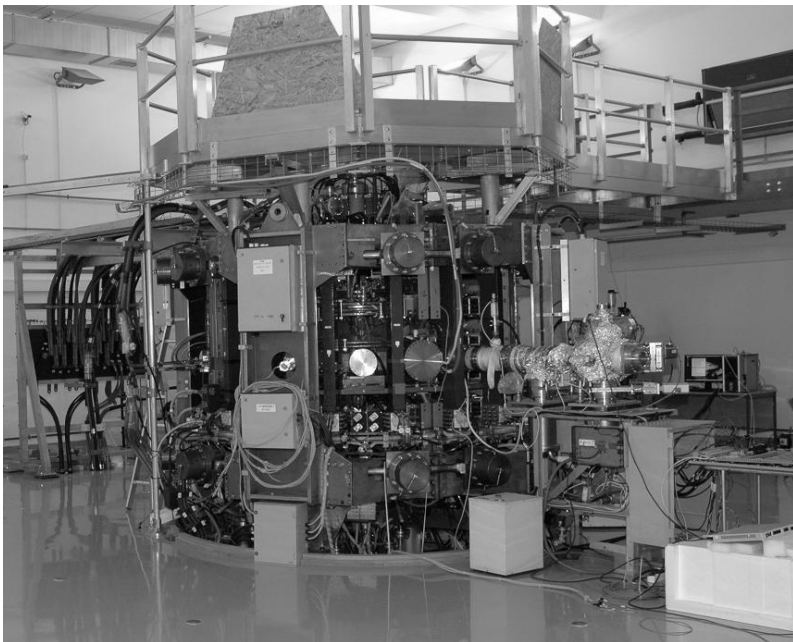
$$\tau_E = \frac{W_p}{P_L},$$

kde  $W_p$  je tepelná energie plazmatu a  $P_L$  výkon všech energetických ztrát.

Podílem veličin energie a výkonu (tj. Joule/Watt) je skutečně čas v sekundách. Názorně si lze dobu udržení energie představit jako čas, za který po vypnutí zdrojů tepla (ohřevu a fúzních reakcí) poklesne teplota plazmatu na jednu e-tinu (kde  $e$  je Eulerovo číslo).

Atmosférický tlak ve vzduchu odpovídá hustotě zhruba  $10^{25}$  částic na metr krychlový. Jak jsme uvedli výše, termojaderný reaktor typu tokamak zvládá udržet plazma přibližně s miliónkrát nižšími hustotami, čili ke splnění Lawsonova kritéria potřebujeme dosáhnout dobu udržení odhadem deset vteřin. Přesnější výpočty (zejména s ohledem na to, že v samotném centru plazmatu jsou hustoty paliva o něco vyšší) vedou k požadavku na dobu udržení  $\tau_E = 6$  s. A právě tady je příčina největších technických obtíží. Taková kvalita tepelné izolace plazmatu sice není nedostižně vysoká (to bychom výzkum fúze s magnetickým udržením již vzdali), ale je na samých hranicích našich technických možností.

A aby toho nebylo dost, tak se doba udržení špatně teoreticky předvídá. Vysokoteplotní plazma je plné turbulencí, které zapříčiňují vysoké tepelné ztráty prouděním, přičemž turbulentní procesy se popisují nelineárními vztahy, které se stále nedaří dost dobře modelovat. Při výpočtech doby udržení pro nové projekty se proto spoléháme na dosavadní experimentální měření, na extrapolace dat z existujících zařízení (včetně našeho tokamaku COMPASS, obr. 3). Ostatně neznalost mechanismů tepelných ztrát ve vysokoteplotním plazmatu byla v historii výzkumu fúze příčinou jak prvotního bezbřehého optimismu, tak následujícího období temné beznaděje. V současné době platí, že podle výsledků experimentů je z hlediska doby udržení energie neúspěšnější konfigurací magnetického pole právě tokamak (a proto je ITER tokamak). Pečlivý výzkum na tokamacích kombinovaný s jejich postupným zvětšováním vedl k neuvěřitelnému vzrůstu doby udržení z několika milisekund až na jednu sekundu, což je již bolestně blízko ke splnění Lawsonova kritéria.

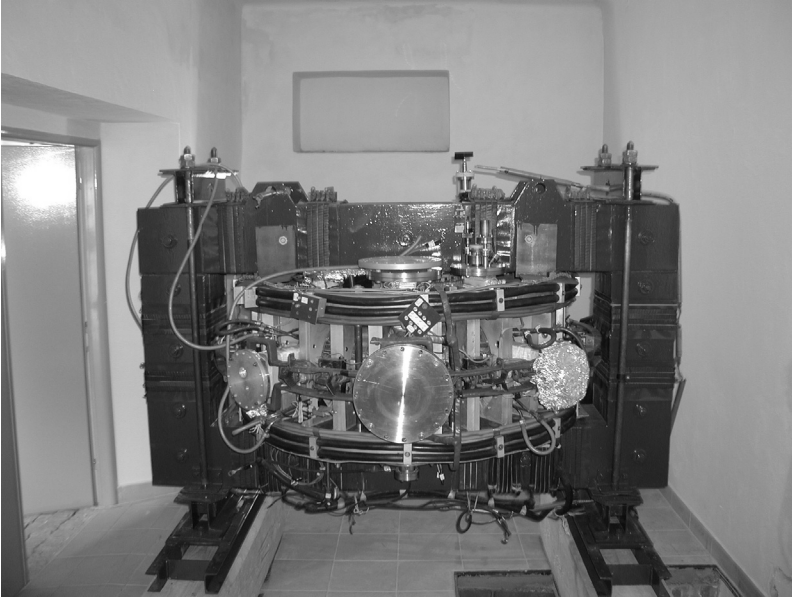


Obr. 3. Tokamak COMPASS pracuje od roku 2009 v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR [10]. Jeho plazma je tvarově stejné jako plazma větších moderních tokamaků včetně JET a ITER, hraje proto roli určitého „aerodynamického modelu“ pro větší experimenty. Na tokamaku COMPASS tak lze mimo jiné experimentálně studovat procesy, které ovlivňují dobu udržení.

### Co ještě chybí

Shrňme ještě jednou současnou situaci: Optimální teplotu dosáhnout umíme, hustotu (která je omezena velikostí magnetického pole) dále zvětšovat nemůžeme, a tak ve snaze o zapálení fúze zbývá jediná možnost, a sice zvýšit dobu udržení energie. Tu je potřeba zvýšit již „jen“ šestkrát, ale momentálně nevíme, jak jinak to udělat, než zvětšením reaktoru. A jak vždy říkáme studentům (o VŠ studiu fúze viz [14] a obr. 4), každý nápad na zlepšení samotné magnetické konfigurace je velmi vítaný, ale pozor, takových chytrých hlav už bylo, a občas i peníze na postavení experimentu se jim podařilo sehnat, jen zatím nikdy příroda nesplnila jejich očekávání. Chování turbulentního přenosu tepla opravdu neumíme dost dobře předvídat. Ani vlastně do detailů nevíme, proč z hlediska

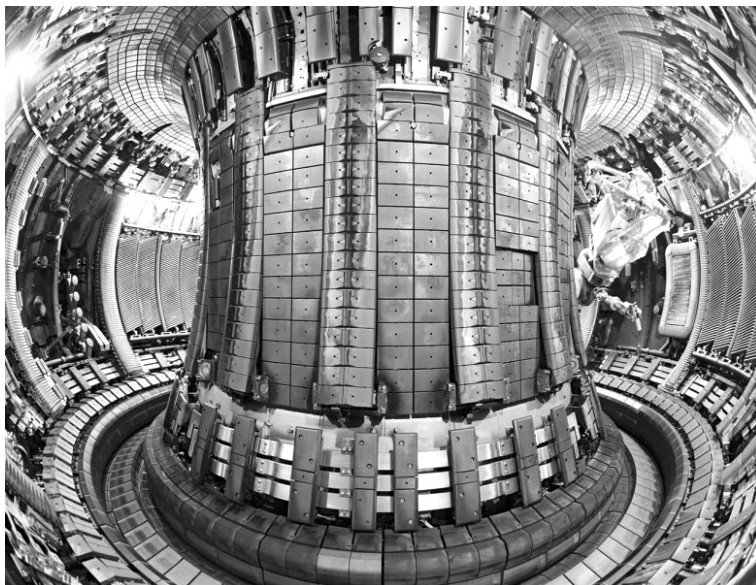
doby udržení vítězí právě tokamaky, ale zřejmě díky své relativní jednoduchosti a zejména osově symetrii.



Obr. 4. Malý tokamak GOLEM, který byl nedávno instalován na půdě Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT, je především určen k praktickému vzdělávání studentů v novém oboru Fyzika a technika termojaderné fúze [14].

Jediným způsobem, jak dosáhnout zapálení, proto dnes zůstává zlepšení izolace tepla zvětšením objemu plazmatu. I v běžném životě nakonec platí, že se teplo uložené ve větším objemu ztrácí pomaleji. Horký čaj v malé skleničce vychladne hned, zatímco ve velkém hrnci vydrží horký mnohem déle. Částice tekutiny se totiž vlivem srážek pohybují chaoticky a difundují z horkého objemu k chladným stěnám tzv. náhodnou procházkou (random walk). V učebnicích (a i třeba na wikipedii [15]) lze najít jednoduchý důkaz toho, že při dané střední volné dráze částic roste doba, za kterou dorazí částice z horké do chladné oblasti, se čtvercem vzdálenosti takových oblastí. Jestliže má dnes největší tokamak JET (obr. 5) dobu udržení rovnou nejvýše jedné sekundě a potřebujeme dosáhnout 6 sekund, musíme postavit reaktor  $\sqrt{6} \doteq 2,5$  krát větší, než je

JET<sup>7)</sup>. ITER bude dvakrát větší než JET a jeho projektovaná doba udržení se podle uvedeného pravidla má blížit 4 sekundám<sup>8)</sup>.



Obr. 5. Pohled do nitra společného evropského toru JET, který je dosud největším tokamakem světa

### Vize do budoucna

Faktor zesílení  $Q = 10$  bohužel neznamena, že by už ITER mohl být užitečným zdrojem energie. Tepelný výkon fúzních reakcí se v tomto reaktoru má pohybovat kolem 500 MW, ale odpovídající ohřev (50 MW) bude zajišťován zdroji neutrálních svazků a elektromagnetických vln,

<sup>7)</sup> Celková velikost je asi 15 metrů, objem plazmatu kolem 80 metrů krychlových, vzdálenost horkého středu plazmatu od stěny přibližně jeden metr. Rekord v celkové uvolněné fúzní energii je 16 MW (při vnějším ohřevu asi 25 MW) [10].

<sup>8)</sup> V poslední době se opět mluví i o alternativě tokamaku s velmi silným, ale krátce trvajícím magnetickým polem. Tokamak Ignitor [16], který snad bude vybudován v Rusku podle italského projektu, má krátkodobě dosahovat pole 13 T, tedy zhruba dvaapůlkrát více nežli ITER. Kombinací vyšší hustoty a kratší střední volné dráhy částic by proto mohl dosáhnout z hlediska Lawsonova kritéria stejně daleko jako ITER, ač je šestkrát menší. Jeho plazma je ovšem příliš malé a krátce žijící, než aby mohlo absorbovat významnější fúzní výkon k udržování vlastní teploty.

jejichž energetická účinnost je pouze v řádu desítek procent. Spolu s velkou spotřebou zejména chladících jednotek (zajišťujících kapalně hélium pro supravodiče a pro vakuové čerpání) se předpokládá, že ITER bude potřebovat elektrický příkon také kolem 500 MW. Nelze ovšem samozřejmě klást rovnítko mezi elektrický příkon a tepelný výkon. Je známo, že účinnost výroby elektřiny z tepla je (v závislosti na teplotě) zhruba jedna třetina, čili termojaderný reaktor by měl mít faktor zesílení  $Q$  alespoň třicet, aby začal vyrábět více energie, než kolik sám spotřebovuje (tomu se říká „inženýrský breakeven“). ITER ještě nemá ambici vyrábět elektřinu, bude v první řadě klíčovým technickým experimentem. Jeho hlavním úkolem je otestovat řadu navrhovaných technických řešení a z nich zvolit ta, která vyjdou jako nejvhodnější pro budoucí reaktory. Klasickým příkladem základního úkolu pro ITER je testování výroby tritia z lithia [18]. Zatímco podle učebnic fyziky se může už desítky let zdát, že jde o banální záležitost, z hlediska techniky je třeba vyřešit řadu praktických otázek – zda má být lithium v pevném či kapalném stavu, jakým způsobem se má odvádět vznikající tritium atd. ITER bude samozřejmě mít i fascinující fyzikální program (např. studium vlivu rychlých nabitých fúzních produktů na plazma, nebo fyzikální řízení kontinuálního provozu plazmatu), nicméně fyzika tu poprvé v historii výzkumu fúze nebude hrát první roli.

Zároveň se již začíná projektovat první termojaderná elektrárna, zvaná DEMO [19], která má především prakticky prokázat konkurenceschopnost fúze ve vztahu k dalším energetickým zdrojům. Odtud zásadní rozdíl koncepce ITER a DEMO: zatímco ITER jako experiment musí být zařízením flexibilním, s relativně snadnou výměnou komponent a s velkou škálou dostupných fyzikálních měření, DEMO musí být především zařízením spolehlivým a pokud možno fungujícím neustále a s co nejnižšími náklady. Jeho technické řešení proto musí být co nejjednodušší, robustní a co nejméně náročné na údržbu. Detaily technických řešení mají vyplynout právě z provozu ITER. Pokud se ITER spustí do deseti let a jeho výsledky budou povzbudivé, můžeme se spuštění elektrárny DEMO dočkat zhruba v horizontu 30–40 let.

Magnetické udržení plazmatu přitom není jedinou možností, jak termojadernou fúzi zvládnout. V záloze jsou další myšlenky, z nichž nejbližší k cíli má tzv. inerciální fúze, která řeší řízené uvolňování fúzní energie pomocí série mikrovýbuchů malých kuliček (pelet) paliva, zapalovaných mohutnými lasery. Už v nejbližších měsících očekáváme úspěšnou demonstraci prvního takového mikrovýbuchu v zařízení NIF v USA (shodou

okolností také s fúzním ziskem  $Q = 10$ ) [20] a o něco později v obdobném francouzském zařízení Laser Mégajoule. Ani jedno z těchto center převážně vojenského výzkumu ale zatím není určeno k řešení technických otázek konstrukce budoucích reaktorů tak, jako je tomu u ITER.

## Závěr

ITER fakticky představuje historický mezník výzkumu termojaderné fúze – jde mimo jiné o první fúzní zařízení, které potřebuje pro stavební povolení jadernou licenci. Osobně věřím, že jeho úspěšný provoz může znamenat stejný impuls pro další výzkum, jakým byl třeba první vzlet letadla pro rozvoj letectví. Budoucí termojaderné reaktory mohou vedle výroby elektřiny nabídnout třeba výrobu vodíku, který možná brzo nahradí benzín, nebo zpracování odpadu (hovoří se i o bezpečném přepracování jaderného odpadu s energetickým ziskem v tzv. hybridních reaktorech). Je evidentní, že bychom zvládnutí fúzních reakcí potřebovali i k meziplanetárnímu transportu.

Pro naše prapředky bylo kdysi zvládnutí ohně tou výzvou, která byla na samé hranici jejich technických a kulturních schopností. Zajisté jim také trvalo mnoho generací, kdy investovali z tehdejšího pohledu velké prostředky (včetně značného množství energie) do toho, aby se naučili dosahovat podmínek nutných k zapálení ohně a k jeho udržování. Určitě mezi sebou také vedli vášnivé spory, zda by své omezené síly neměli napřít někam jinam. Nakonec ale zvítězila jejich představivost, správné předvídaní těch nejzákladnějších výhod, které jim zvládnutí ohně přinese. Spektrum možností, kterému svým úsilím otevřeli dveře, nakonec naprosto neuvěřitelným způsobem předčilo jejich primitivní představivost. Vítejte v pravěku termojaderné fúze.

## Literatura

- [1] <http://www.iter.org/>
- [2] Eddington, A. S.: “The Internal Constitution of the Stars”, Presidential Address to Section A of the British Association at Cardiff, on 24th August 1920. In: *The Observatory*, vol. 43, no. 557, October 1920, <http://articles.adsabs.harvard.edu/>.
- [3] Lawson, J. D.: *Some Criteria for a Useful Thermonuclear Reactor*. A.E.R.E. report GP/R 1807, prosinec 1955, odtajněno v dubnu 1957, <http://www.jet.efda.org/>.

- [4] Kulhánek, P., Rozehnal, J.: *Hvězdy, planety, magnety*. Mladá Fronta, edice Kolumbus, Praha, 2007.
- [5] Mlynář, J.: O symetrii tokamaku. *Čs. časopis pro fyziku* **59** (2009), str. 207.\*
- [6] McCracken, G., Stott, P.: *Fúze – energie vesmíru*. Mladá Fronta, edice Kolumbus, Praha, 2006, kapitola 9.5.
- [7] Kikuchi, M., Inoue, N.: Role of fusion energy for the 21 century energy market and development strategy with international thermonuclear experimental reactor. In: *Proceedings of the 18th World Energy Congress*, Buenos Aires, 2001, [http://fire.pppl.gov/energy\\_ja\\_wec01.pdf](http://fire.pppl.gov/energy_ja_wec01.pdf).
- [8] Mlynář, J.: *Focus On: JET, the European centre of Fusion Research*. Kapitola 2.3, <http://www.jet.efda.org/wp-content/uploads/Focus.on.pdf>.
- [9] <http://www.iter.org/mach/vacuumcryo>.
- [10] Řípa M., Pánek, R., Mlynář, J.: Instalace tokamaku COMPASS v Praze. *Čs. časopis pro fyziku* **58** (2008), str. 200.\*
- [11] <http://www.jet.efda.org/>.
- [12] Řípa M.: Historie tokamaku ve světě a u nás. *Čs. časopis pro fyziku* **58** (2008), str. 209.\*
- [13] <http://cms.web.cern.ch/cms/>.
- [14] <http://fttf.fjfi.cvut.cz/>.
- [15] [http://en.wikipedia.org/wiki/Random\\_walk](http://en.wikipedia.org/wiki/Random_walk).
- [16] <http://www.frascati.enea.it/ignitor/>.
- [17] <http://www.iter.org/mach/blanket>.
- [18] Cismondi, F.: Basics of breeding blanket technology. In: *3rd Karlsruhe International School on Fusion Technologies*, Karlsruhe, Germany, 2009, <http://iwrwww1.fzk.de/summerschool-fusion/pres2009/T7-1.pdf>.
- [19] Maisonnier, D. et al.: DEMO and fusion power plant conceptual studies in Europe. In: *Proceedings 7th International Symposium on Fusion Nuclear Technology – ISFNT-7*, Fus. Eng. Design, Vol. 81, 2006, str. 1123, [http://fire.pppl.gov/isfnt7\\_maisonnier.pdf](http://fire.pppl.gov/isfnt7_maisonnier.pdf).
- [20] <https://lasers.llnl.gov/>.

Pozn.: Články označené \* lze stáhnout pod položkou Popularizace na <http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/cz>.