

Jaderná fúze, quo vadis?

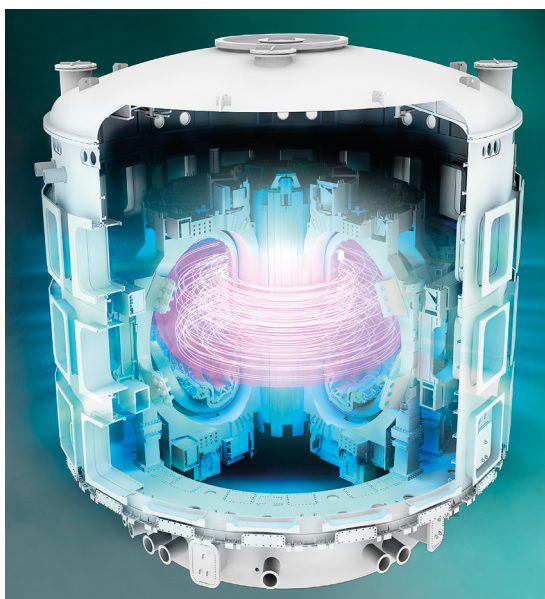
Slavomír Entler

Ústav fyziky plazmatu AV ČR, U Slovanky 2525/1a, 182 00 Praha 8; entler@ipp.cas.cz

Jaderná fúze je jedním z hlavních zdrojů energie vesmíru. Hvězdy včetně našeho Slunce díky jaderné fúzi svítí a hřejí. Bez jaderné fúze by vesmír ani nebyl takový, jaký je, protože jadernou fúzí vznikají chemické prvky od helia až po železo. Vesmír se probíhající jadernou fúzí mění a zvyšuje se jeho komplexita. Jde o zcela přirozený proces, který je limitován pouze podmínkami, za kterých může probíhat.

V roce 1934 se Ernestu Rutherfordovi pomocí urychlovače podařilo poprvé v historii lidstva vyvolat jadernou fúzi. Množství uvolněné energie však bylo zanedbatelné. Až výbuchy termojaderných bomb po druhé světové válce poskytly jasný důkaz, že pozemská fúze může uvolnit velké množství energie. Teoretický základ energetického využití jaderné fúze položil v roce 1955 britský inženýr John David Lawson, když zformuloval požadavky na fúzní palivo, které musejí být splněny, aby fúzní elektrárna mohla vyrábět užitečnou elektřinu. Tyto požadavky platí dodnes a označují se jako Lawsonovo kritérium. Díky Lawsonem jasně stanovenému cíli bylo ve vývoji fúzních zařízení dosaženo velkého pokroku. Na konci století se již dařilo spouštět řízenou fúzní reakci a zařízení se přiblížila ke splnění kritéria.

S rostoucími parametry paliva ale fyzici stále více naráželi na fyzikální a technologická omezení. Pro další pokrok bylo nutné postavit velký a technologicky vyspělý reaktor. Vědecké úvahy přerostly nejprve do mezinárodního projektu INTOR a poté do největšího pozemského vědeckého projektu ITER. Jakmile ITER otestuje vyvinuté fúzní technologie, bude zahájena výstavba prvních fúzních elektráren.



Tokamak ITER. Zdroj: ITER Organization

Motivace

Jaderná fúze představuje čistý průmyslový zdroj energie, který má potenciál vyrábět elektrickou energii a teplo ve velkém objemu bez negativních dopadů na životní prostředí. Fúzní palivo má velmi vysokou energetickou vydatnost a jeho spalováním vzniká helium. Fúzní elektrárna o elektrickém výkonu 1 GW_e (tj. o výkonu bloku Jaderné elektrárny Temelín) spotřebuje každý den pouze 1 kg vodíkových izotopů a vyrobí 0,7 kg helia. Díky tomu vystačí pozemské zásoby fúzního paliva na pokrytí celosvětové spotřeby energie po miliony let.

Fúzní elektrárny budou zcela bezpečné, protože fúzní reakce vyžaduje splnění náročných podmínek, které na Zemi přirozeně nejsou, především teplotu paliva v řádu stovek milionů °C. K zastavení reakce proto postačí ochlazení paliva kontaktem s konstrukcí reaktoru. Dalším faktorem bezpečnosti fúzních elektráren bude malé množství paliva. Při probíhající reakci bude v reaktoru elektrárny o výkonu 1 GW_e jen několik gramů paliva. Palivo bude do reaktoru průběžně doplňováno a toto doplňování bude možné kdykoliv zastavit. Ve srovnání se štěpnými jadernými reaktory bude ve fúzním reaktoru při provozu přibližně 10 000 000× méně paliva.

Lawsonovo kritérium

Za desetiletí fúzního výzkumu bylo zkoumáno a vyvíjeno mnoho nejrůznějších zařízení, ale většina z nich byla slepou uličkou. Není problém postavit zařízení, ve kterém bude probíhat jaderná fúze, problém je, aby probíhala s energetickým ziskem. Podle Lawsonova kritéria musí být fúzní palivo dostatečně horké a husté a musí v tomto stavu setrvat tak dlouho, dokud neproběhne dostatečné množství reakcí. Při nejsnáze dosažitelné fúzní reakci izotopů vodíku deuteria a tritia musí mít palivo teplotu okolo 160 milionů °C a součin hustoty n a doby udržení energie v palivu τ_E , charakterizující rychlost chladnutí paliva, musí překročit 10^{20} s/m³:

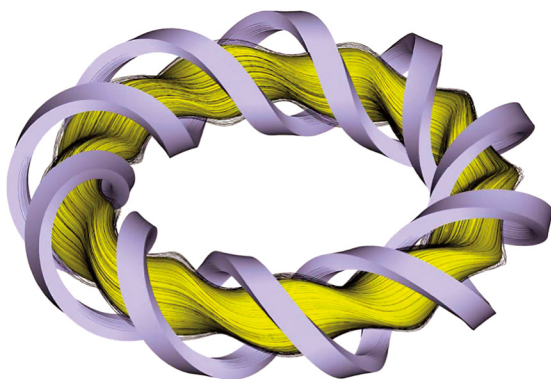
$$n \cdot \tau_E \geq 10^{20} \text{ s/m}^3.$$

Požadavek na hodnotu součinu parametrů $n \cdot \tau_E$, nikoliv na parametry samotné, umožnil navrhovat nejrůznější koncepty fúzních zařízení, které by mohly kritérium splnit. Fúzní výzkum se rozdělil do mnoha proudů, z nichž se vyprofilovaly dva hlavní: výzkum fúze s magnetickým udržením paliva a výzkum fúze s inerciálním udržením paliva. Magnetické udržení

pracuje s nízkou hustotou paliva $\sim 10^{20}$ částic/m³ a s dobou udržení energie několik sekund. Využívá toho, že se při vysokých teplotách každá látka ionizuje a stává se plazmatem, na které lze působit magnetickým polem. Inerciální udržení vychází z charakteristické doby setrvačnosti $\sim 10^{-10}$ s, která zajistí, že palivo setrvá pohromadě, dokud neproběhne dostatek fúzních reakcí. Pro splnění kritéria je ale v takovém případě potřeba dosáhnout velmi vysoké hustoty paliva $\sim 10^{30}$ částic/m³. Pro srovnání, vzduch má za obvyklých podmínek hustotu $\sim 10^{25}$ částic/m³.

Tokamaky a stellarátory

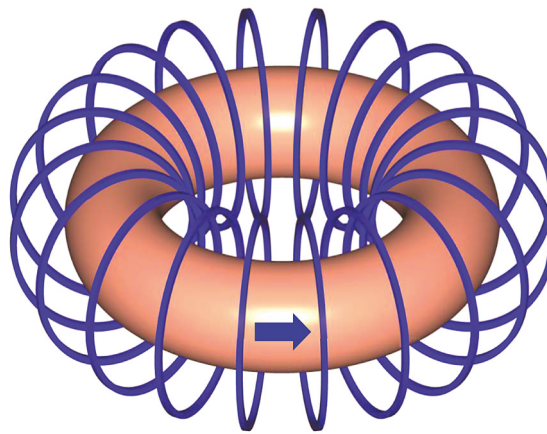
Při magnetickém udržení je palivo umístěno do magnetického pole a ionizováno. Ionty paliva jsou magnetickým polem zachyceny a reagují spolu. Konfigurace magnetického pole přitom mohou být různé a cílem výzkumu bylo nalézt co nejjednodušší konfiguraci, která zajistí trvalé udržení paliva. Dlouhou dobu byla intenzivně zkoumána lineární zařízení, avšak nikdy se nepodařilo zamezit úniku paliva přes konce zařízení. Řešení poskytla toroidální konfigurace, která konce nemá a magnetické siločáry jsou uzavřeny uvnitř zařízení. Toroidální magnetické pole je ale nehomogenní a pro potlačení vlivu nehomogenity na udržení paliva bylo nutné upravit toroidální pole na helikální (šroubovicové). Úprava pole byla provedena dvěma odlišnými způsoby: použitím 3D prostorových cívek, jak je tomu



Obr. 1 Stellarátory vytvářejí helikální magnetické pole pomocí 3D cívek.

u stellarátorů (obr. 1), nebo doplněním poloidální složky magnetického pole, generované elektrickým proudem v plazmatu, jak to dělají tokamaky (obr. 2).

Od počátku měly stellarátory oproti tokamakům dvě nevýhody. Pracovaly se studeným plazmatem, zatímco v tokamacích se plazma ohřívalo protékajícím elektrickým proudem, a bylo obtížné správně navrhnout a vyrobit prostorové cívky, zatímco tokamaky používaly jednoduché planární cívky. Technologický pokrok oba problémy vyřešil. Palivo lze ve stellarátorech ohřát svazky urychlených částic anebo elektromagnetickými vlnami stejně jako v moderních tokamacích a prostorové cívky je možné přesně navrhnout a vyrobit pomocí počítačů. Absence elektrického proudu v plazmatu by naopak mohla být velkou výhodou stellarátorů oproti tokamakům, protože elektrický proud může v tokamacích vyvolávat nestability plazmatu a důsledkem jeho induktivního generování je pulzní provoz tokamaků. Dnešnímu fúznímu výzkumu dominují tokamaky – v provozu je 56 tokamaků a 7 dalších je ve výstavbě. Stellarátory se však vrací do hry a nové výsledky brzy ukážou, zda budou tokamakům konkurovat.

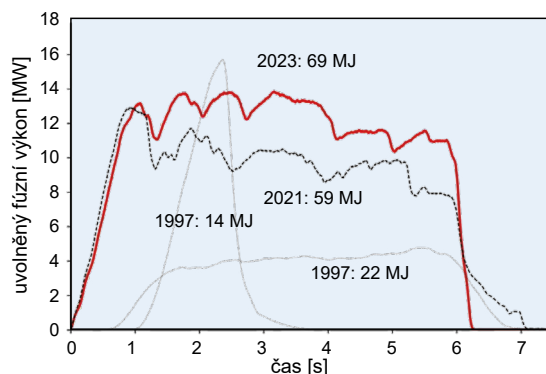


Obr. 2 Tokamaky vytvářejí helikální magnetické pole pomocí planárních cívek a elektrického proudu v plazmatu.

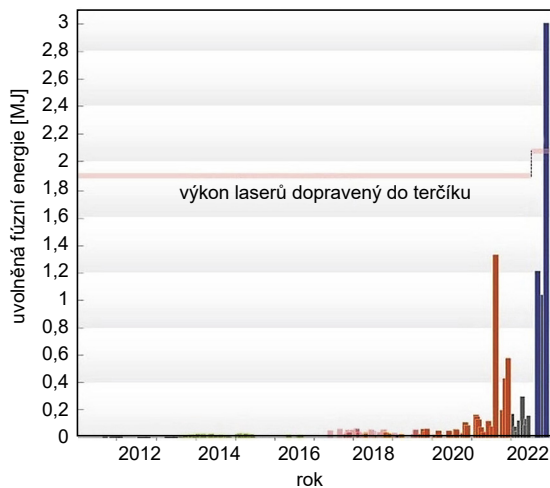
V roce 1994 dosáhl americký tokamak TFTR fúzního výkonu 10,7 MW a následně v roce 1997 evropský tokamak JET dosáhl fúzního výkonu 16 MW. V roce 2021 pak reaktor JET dokázal v 5 sekundách uvolnit 59 MJ fúzní energie a v roce 2023 dokonce 69 MJ, nejvíce ze všech fúzních zařízení na světě (obr. 3). V průběhu kampaně přitom JET uvolnil více než 0,5 GJ energie. Mezi další rekordmany patří například tokamak JT-60, který v roce 1996 ohřál palivo na 522 milionů °C, supravodivý tokamak KSTAR, který v roce 2021 udržel palivo o teplotě 100 milionů °C po dobu 30 sekund, anebo tokamak EAST, který ve stejném roce nejprve udržel palivo o teplotě 160 milionů °C po dobu 20 sekund a poté palivo o teplotě 70 milionů °C po dobu 17,6 minuty.

Lasery

Výzkum inerciálního udržení se soustředil na využití silných laserů. Snahy o využití rentgenového záření z vnějších zdrojů nebo svazků nabitých částic byly neúspěšné a lasery se naopak rychle rozvíjely a zvyšovala se jejich energie. Postupně rostl počet paprsků soustředěných na terč a hledala se vhodná metoda, jak palivo stlačit. Nejjednodušší metodou bylo přímé zapálení, při kterém výstřel laserů na palivový terč explozivně odpařil povrchovou vrstvu terče. Reakční rázovou vlnou pak došlo ke stlačení palivové náplně. Nerovnoměrný profil laserových paprsků a omezený počet laserů ale podpořovaly rozvoj nestabilit v terči a stlačení paliva nebylo nedostatečné. Vyšší homogenita ohřevu terče byla dosažena nepřímým zapálením. Lasery nebyly zaměřeny na terč, ale na vnitřní stěnu malé komůrky označované jako hohlraum, s palivovým terčem uprostřed. Impulzem laserů došlo k vypaření hohlraumu dopro-



Obr. 3 Dosažený fúzní výkon a uvolněná energie v reaktoru JET. Zdroj: EUROfusion



Obr. 4 Uvolněná fúzní energie při experimentech na zařízení NIF (LLNL).

váženému intenzivním rentgenovým zářením. Záření vyplnilo hohlraum a homogenně ze všech stran ohřálo povrchovou ablační vrstvu terče. Stejně jako u přímého zapálení se vrstva explozivně odpařila a reakční rázová vlna stlačila palivo. Další zkoumané metody, označované jako šokové nebo rychlé zapálení, spočívaly v použití dvou laserových impulzů. První impulz stlačil palivo a druhý měl ve stlačeném palivu vytvořit horké místo, hot-spot, s parametry vhodnými pro průběh reakce.

Úspěšnou byla dosud pouze metoda nepřímého zapálení, jejíž pomocí dokázaly lasery amerického zařízení National Ignition Facility (NIF) v roce 2022 uvolnit z paliva více fúzní energie, než kolik jí bylo dopraveno do terče. Optimalizace laserů a terče vedly k vytvoření tlaku v palivu 608 miliard atmosfér, zahřátí paliva na 150 milionů °C a uvolnění fúzní energie 3,1 MJ při absorbované energii laserů 2,05 MJ (obr. 4). Laserová fúze se však stále nachází ve fázi fyzikálního výzkumu a vyžaduje další čas na hlubší pochopení probíhajících procesů. Souběžně s fyzikálním výzkumem musejí být

také vyřešeny důležité technologické výzvy, především vývoj silných laserů s vysokou opakovací frekvencí.

Alternativy

Stále více vynálezců zkouší splnit Lawsonovo kritérium jinak. Pro splnění kritéria musejí být tokamaky i lasery velké a tím i nákladné. Alternativní zařízení by proto měla být menší a levnější. Obvykle jsou pulzní a využívají magnetické pole pro krátkodobé udržení paliva. Hustota paliva má být vyšší než v tokamacích a doba udržení paliva delší než u fúze s inerciálním udržením. Pro stlačení paliva využívají i nejrůznější exotické způsoby, jako jsou srážky plazmoidů, elektromagnetická děla nebo hydraulické, případně parní písty. Souhrnně se tyto metody označují jako magneto-inerciální udržení. Mezi další alternativní směry fúzního výzkumu patří inerciálně-elektrostatické udržení, tzv. fúzory, a řada obtížně zařaditelných originálních zařízení.

Některé alternativní přístupy soukromých start-upů však vzbuzují pochybnosti. Tyto pochybnosti vycházejí jak z jednoduchých fyzikálních úvah, tak z absence recenzovaných vědeckých článků dokládajících fyzikální smysluplnost prezentovaných záměrů.

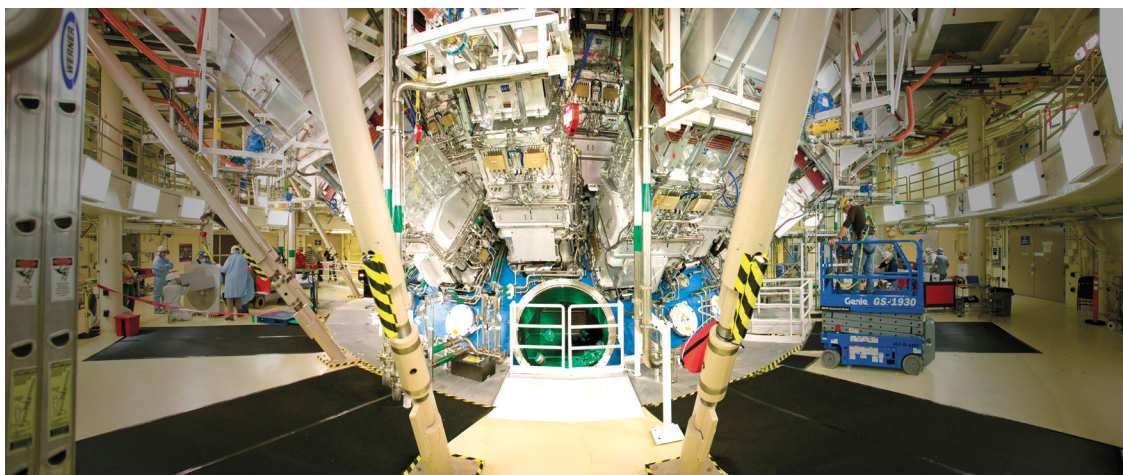
Blízká budoucnost

V roce 2022 byl v německém Greifswaldu uveden do vědeckého provozu moderní stellarátor Wendelstein 7-X. Stellarátor využívá pro generování magnetického pole supravodivé 3D cívky navržené na základě simulace trajektorií částic plazmatu a pro ohřev plazmatu používá stejný systém ohřevu jako tokamaky. Wendelstein 7-X představuje technologicky vyspělé zařízení, které umožní posoudit roli stellarátorů v budoucí fúzní energetice.

V roce 2023 byl v japonském Naka zprovozněn v současnosti největší fúzní reaktor na světě JT-60SA. Jde o moderní supravodivý tokamak s rozsáhlým systémem ohřevu paliva, který je společným projektem Japonska a Evropské unie. Tokamak nahradí reaktor



Kompletace ITER. Zdroj: ITER Organization



Laserové zařízení NIF. Zdroj: LLNL

JET a bude spolu s reaktorem ITER testovat technologie pro první fúzní elektrárny.

Nejdůležitějším projektem fúzního výzkumu je ITER, mezinárodní projekt výstavby a provozu velkého tokamaku o fúzním výkonu 500 MW. Reaktor se staví na jihu Francie nedaleko Aix-en-Provence, ve spolupráci Evropské unie, Spojených států, Japonska, Korejské republiky, Číny, Indie a Ruska, a jeho cílem je otestovat fúzní technologie a zařízení vyvinutá pro fúzní elektrárny. Slavnostní spuštění reaktoru mělo proběhnout v roce 2025, avšak omezení výroby a montážních prací při pandemii covidu, dopady války na Ukrajině na globální trhy s materiály a výrobní komplikace způsobily zpoždění stavby. Přesto stále platí termín dosažení plného výkonu reaktoru 500 MW v roce 2035. Aktuálně je již postavena většina budov v areálu včetně reaktorového komplexu a v plném proudu je instalace technologií i samotného reaktoru.

V Praze probíhá výstavba unikátního kompaktního tokamaku COMPASS-U. Nový tokamak bude středně velký, avšak s vysokým magnetickým polem 5 T. Bude jediným tokamakem na světě s magnetickým polem o stejné velikosti, jako bude mít ITER a energetické reaktory prvních fúzních elektráren. Tepelná zátěž v tokamaku bude dosahovat až 100 MW/m^2 a pro ochranu konstrukce budou použity tekuté kovy. Cílem projektu COMPASS-U je vyvinout a otestovat některé klíčové technologie pro budoucí fúzní elektrárny.

Fúzní elektrárny

Expandující fúzní výzkum a výstavba nových pokročilých tokamaků jsou předvojem výstavby prvních fúzních elektráren. Fúzní výzkum natolik pokročil, že se stal zajímavým i pro soukromé investory. V roce 2023 bylo registrováno 43 malých výzkumných firem financovaných ze soukromých zdrojů a plánujících v krátké době zprovoznit vlastní fúzní elektrárny.

V Evropské unii byla příprava výstavby fúzních elektráren zahájena v roce 2012 na základě tzv. Cestovní mapy k fúzní energetice „Fusion Electricity: A roadmap to the realization of fusion energy“. Realizací bylo pověřeno konsorcium evropských fúzních laboratoří EUROfusion, jehož členy je 31 výzkumných organizací z 26 zemí Evropské unie, Velké Británie, Švýcarska a Norska. Cestovní mapa představuje plán evropského fúzního výzkumu na výstavbu a zprovoznění demonstrační fúzní elektrárny, zkráceně označované DEMO.

Cílem projektu DEMO je demonstrovat výrobu elektřiny pomocí jaderné fúze a umožnit výrobním a energetickým firmám získat know-how potřebné pro výstavbu a provoz komerčních fúzních elektráren. Projekt bude financovat Evropská unie a koordinovat evropská agentura Fusion for Energy. Realizace projektu bude prioritně zajišťována evropskými firmami. Výstavba elektrárny DEMO by měla být zahájena v roce 2040 a dokončena okolo roku 2050. V blízké budoucnosti se bude rozhodovat, kde bude elektrárna postavena, a zvažuje se kandidatura na umístění elektrárny v České republice.

Čistá energetika

Výstavba elektrárny DEMO a dalších podobných projektů po celém světě otevře dveře k výstavbě první vlny komerčních fúzních elektráren. Po jejich spuštění budou následovat další vlny, které postupně vytvoří novou čistou energetiku. Prohlubování našich znalostí o termojaderném plazmatu a zdokonalování fúzních technologií budou klíčem ke snížení ceny vyráběné elektřiny. Centralizovaná výroba levné elektřiny ve fúzních elektrárnách o vysokém výkonu bez dopadů na životní prostředí umožní úplnou elektrifikaci průmyslu, dopravy a bydlení. Lidstvo se tím přiblíží k řešení, které si zvolil samotný vesmír. Jaderná fúze směřuje k tomu, být rozhodujícím energetickým zdrojem lidstva, avšak záleží jen na nás, jak rychle její potenciál využijeme.

Článek je věnován prof. RNDr. Janu Mlynářovi, Ph.D., který jadernou fúzi žil a věnoval jí celý život.

