

Spoutané slunce



Akademie věd
České republiky



IPP ÚSTAV FYZIKY PLAZMATU
AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY

věda
kolem
nás
výzvy
a otázky

137

Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i. (ÚFP) se zabývá výzkumem vysokoteplotního plazmatu a jaderné fúze, laserového plazmatu, nízkoteplotního plazmatu a plazmové chemie, materiálového inženýrství, optiky a optoelektroniky. Výzkum vlastností plazmatu a využití jeho potenciálu je vysoce aktuální pro vědeckou sféru po celém světě. Aplikace sahají od kosmického výzkumu přes termojadernou fúzi, biomedicínu až po přípravu nových pokročilých materiálů se specifickými vlastnostmi. Vývoj zdroje čisté energie na bázi jaderné fúze představuje jeden z nejdůležitějších globálních společenských úkolů, k jehož plnění ÚFP významně přispívá.

ÚFP má čtyři výzkumné sekce:

- Fúzní plazma
- Laserové plazma
- Plazmochemie a materiály
- TOPTEC

Sekce Fúzní plazma se zabývá výzkumem horkého plazmatu, které je drženo magnetickým polem s cílem dosažení řízené jaderné fúze a její integrace do energetiky. K hlavním tématům výzkumu patří experimentální a teoretické studium procesů v okrajovém plazmatu, interakce plazmatu s materiály, studium provozních režimů s vysokým udržením energie v plazmatu a souvisejících plazmových nestabilit, studium ubíhajících elektronů a disrupcí plazmatu, vývoj pokročilých diagnostických systémů a další. Sekce provozuje velkou výzkumnou infrastrukturu „COMPASS – Tokamak pro výzkum termonukleární fúze“, zařazenou do *Cestovní mapy velkých výzkumných infrastruktur České republiky*. Tato infrastruktura je v současné době v konstrukční fázi budování nového experimentálního zařízení, tokamaku COMPASS Upgrade (COMPASS-U).

Kromě experimentálního výzkumu na vlastních zařízeních zahrnují aktivity sekce také výzkum na evropských fúzních zařízeních v rámci konsorcia EUROfusion (např. tokamaky JET, ASDEX Upgrade, WEST, TCV nebo stelarátor W-7X). Teoretický výzkum se zaměřuje na podporu a interpretaci experimentálních činností, na vývoj a ověřování numerických modelů a přípravu nových provozních režimů pro tokamak COMPASS-U a mezinárodní tokamaky ITER a DEMO. Výzkum a vývoj v oblasti diagnostiky se zaměřuje na návrh a konstrukci diagnostických přístrojů pro COMPASS-U, ITER, DEMO a další tokamaky, jako jsou německý ASDEX-U, italský DTT nebo korejský K-STAR.

Sekce Laserové plazma se zabývá systematickým experimentálním i teoretickým výzkumem interakce intenzivního laserového záření s hmotou, vytvářením hustého plazmatu soustředěnými svazky impulzních laserů o vysokém výkonu a využitím laserového plazmatu jak v základním, tak aplikovaném výzkumu (například inerciální fúze, laboratorní astrofyzika, laserové zdroje nabitých částic a fotonů s vysokou energií atp.). Sekce provozuje velkou výzkumnou infrastrukturu PALS, která je součástí *Cestovní mapy velkých výzkumných infrastruktur ČR*. Tato infrastruktura je součástí Badatelského centra PALS (Prague Asterix Laser System) provozovaného společně s Fyzikálním ústavem AV ČR.

Jaderná fúze je zdrojem energie Slunce a všech ostatních hvězd. Blíží se doba, kdy budeme jadernou fúzí vyrábět elektřinu.

Jaderná fúze je nedílnou součástí kosmu už od jeho vzniku. Bez jaderné fúze by vesmír nebyl takový, jaký je. Jadernou fúzí vznikají chemické prvky od helia až po železo a zároveň je jaderná fúze jedním z hlavních zdrojů energie vesmíru. Hvězdy včetně našeho Slunce díky jaderné fúzi svítí a hřejí. Jaderná fúze je přírodní proces, který nepřetržitě probíhá v celém vesmíru.

V pozemských podmínkách představuje jaderná fúze perspektivní energetický zdroj. Zásoby fúzního paliva na Zemi jsou prakticky nevyčerpatelné a bez ohledu na růst energetické spotřeby v budoucích staletích umožní lidstvu získávat dostatek energie po celou dobu existence Země. Ve vesmíru pak fúzní palivo tvoří převážnou část viditelné hmoty. Při mezihvězdných letech bude fúzní palivo jediným, jehož doplňování bude během letu možné.

Důležitou vlastností využití jaderné fúze je, že při získávání fúzního paliva a uvolňování energie nebude docházet k poškozování životního prostředí. Palivem budou lehké prvky, získávané především z vody, a odpadem bude neškodné a dobře využitelné helium. Fúzní elektrárny nebudou podobně jako obnovitelné zdroje produkovat emise ani trvalý odpad. Na rozdíl od nich ale nebudou narušovat krajinu a přírodní biotopy a vyžadovat pohotovostní náhradní zdroje, když nesvítí slunce nebo nefouká vítr.

Cesta k energetickému využití jaderné fúze je náročná, a ani jiná být nemůže, protože fúzní elektrárny představují velký pokrok v dlouhodobé snaze lidstva o ovládnutí energie zahájené prvním zapálením ohně. Spoutání slunce vyžaduje vývoj špičkových technologií v širokém spektru oborů, které umožní spolehlivou činnost průmyslových zařízení při teplotách v rozmezí od absolutní nuly do stovek milionů stupňů Celsia a při vysokých tocích energie. Odměnou za to bude prakticky nevyčerpatelný energetický zdroj, který poskytne lidstvu dostatek levné a čisté energie po miliony let.

Historie

První pokusy o spuštění jaderné fúze na Zemi probíhaly již před druhou světovou válkou. Po druhé světové válce byl výzkum řízené jaderné fúze zahájen v USA, Velké Británii a v tehdejší Sovětské svazu. Odpálení první termojaderné bomby Ivy Mike v roce 1952 prokázalo, že jaderná fúze na Zemi může probíhat. Teoretický základ pro energetické využití jaderné fúze vytvořil v roce 1955 britský inženýr John David Lawson, když zformuloval podmínku, která musí být splněna, aby mohla fúzní elektrárna vytvářet energetický zisk a vyrábět elektřinu pro elektrizační síť. Tato podmínka platí dodnes a nazývá se Lawsonovo kritérium. Cílem fúzního výzkumu se od té doby stalo dosažení parametrů fúzního paliva splňujících toto kritérium.

V průběhu výzkumu jaderné fúze byla vyvinuta řada různých experimentálních zařízení, z nichž se osvědčilo jen několik. V roce 1951 postavil Lyman Spitzer na Princetonské univerzitě první stelarátor. V roce 1958 byl v Kurčatovově ústavu podle návrhu Igora J. Tamma a Andreje Sacharova zprovozněn první tokamak.

První laserové zařízení pro výzkum jaderné fúze bylo postaveno v roce 1977 v Lawrence Livermore National Laboratory.

Stelarátory měly velký potenciál, ale také nevýhody: bylo obtížné správně vyrobit složité prostorově tvarované cívky magnetického pole a palivo ve stelarátorech bylo studené. Pozdější tokamaky dosahovaly mnohem lepších výsledků, protože jejich konstrukce byla jednodušší, planární cívky bylo možné vyrobit relativně přesně a palivo bylo ohříváno elektrickým proudem. Laserová zařízení byla závislá na vývoji laserové techniky a jejich vývoj byl nejpomalejší. Dnešnímu fúznímu výzkumu proto dominují tokamaky. V provozu je jich 57 a 7 dalších je ve výstavbě. Technologický pokrok mezitím vyřešil slabé stránky stelarátorů a nové výsledky ukáží, zda budou konkurovat tokamakům. Rozvíjí se i laserová fúze, ve které došlo v poslední době k výraznému pokroku.

V průběhu výzkumu bylo dosaženo celé řady úspěchů. Americký tokamak TFTR v roce 1994 dosáhl fúzního výkonu 10,7 MW. Evropský tokamak JET v roce 1997 dosáhl fúzního výkonu 16 MW. V roce 2015 byl spuštěn moderní německý stelarátor Wendelstein 7-X. V roce 2022 americké laserové zařízení NIF uvolnilo více fúzní energie, než kolik jí bylo dodáno do palivového terče, a splnilo tak jako první Lawsonovo kritérium. V roce 2023 se tokamaku JET podařilo při stabilní fúzní reakci uvolnit 69 MJ fúzní energie, zdaleka nejvíce na světě. A na sklonku roku 2023 pak byl ve spolupráci Japonska a Evropské unie spuštěn nový moderní tokamak JT-60SA, v současnosti největší fúzní reaktor.

Technologický náskok tokamaků před ostatními typy fúzních zařízení vedl k rozhodnutí postavit první energetické reaktory na bázi tokamaku. V roce 1985 byl dohodnut mezinárodní projekt výstavby fúzního reaktoru o vysokém výkonu ITER. Následujících třicet let se stal návrh tohoto zařízení hlavním předmětem výzkumu celé fúzní komunity. V současnosti již výstavbu reaktoru zajišťují průmyslové firmy a fúzní komunita se soustřeďuje na přípravu jeho provozu a na vývoj fúzních elektráren.

V Evropě byla vytvořena první pracovní skupina pro koordinaci výzkumu jaderné fúze v roce 1958 v rámci Evropského společenství pro atomovou energii EURATOM. V roce 1984 byl v britském Culhamu nedaleko Oxfordu zprovozněn společný evropský reaktor JET a roku 1987 se Evropské společenství stalo jednou ze čtyř stran projektu ITER. V roce 1999 byla podepsána Evropská dohoda o fúzním výzkumu EFDA (*European Fusion Development Agreement*), v jejímž rámci bylo uzavřeno třicet asociačních dohod včetně smlouvy s Českou republikou reprezentovanou Ústavem fyziky plazmatu AV ČR.

V roce 2012 EFDA představila výzkumný plán zacílený na zahájení výroby elektřiny jadernou fúzí s názvem *Fusion Electricity: A roadmap to the realization of fusion energy*, zkráceně *Fusion Roadmap* (Fúzní cestovní mapa), který popisuje záměr evropských výzkumných organizací vyvinout a postavit fúzní elektrárnu. Dokument ustanovuje označení DEMO pro evropský demonstrační prototyp fúzní elektrárny (*Demonstration Power Plant*) a popisuje strategické úkoly, na které by měl být zaměřen výzkum. Výchozím bodem plánu je reaktor ITER, jenž otestuje jednotlivé fúzní technologie. Cíle projektu DEMO jsou následující:

1. Dokončit vývoj fúzního reaktoru o vysokém energetickém výkonu.
2. Demonstrovat výrobu elektřiny jadernou fúzí o výkonu několika set MW.

3. Dosáhnout soběstačnosti ve výrobě fúzního paliva.

Dohoda EFDA vypršela v roce 2013 a jejím nástupcem se stalo konsorcium evropských výzkumných organizací EUROfusion, které v současnosti sdružuje 31 výzkumných organizací z 29 evropských zemí.

Jednou z hlavních náplní činnosti konsorcia EUROfusion se v souladu s *Fusion Roadmap* stal projekt elektrárny DEMO, který poskytne energetickým firmám a investorům potřebné informace a know-how pro výstavbu a provoz komerčních fúzních elektráren. Práce na projektu byly zahájeny v roce 2012 a aktuálně probíhá výběr fúzních technologií, jež budou při výstavbě elektrárny použité.

V roce 2018 byla *Fusion Roadmap* aktualizována a přizpůsobena postupu projektu ITER. Zprovoznění fúzní elektrárny DEMO se podle plánu předpokládá do 20 let od dosažení plného výkonu reaktoru.

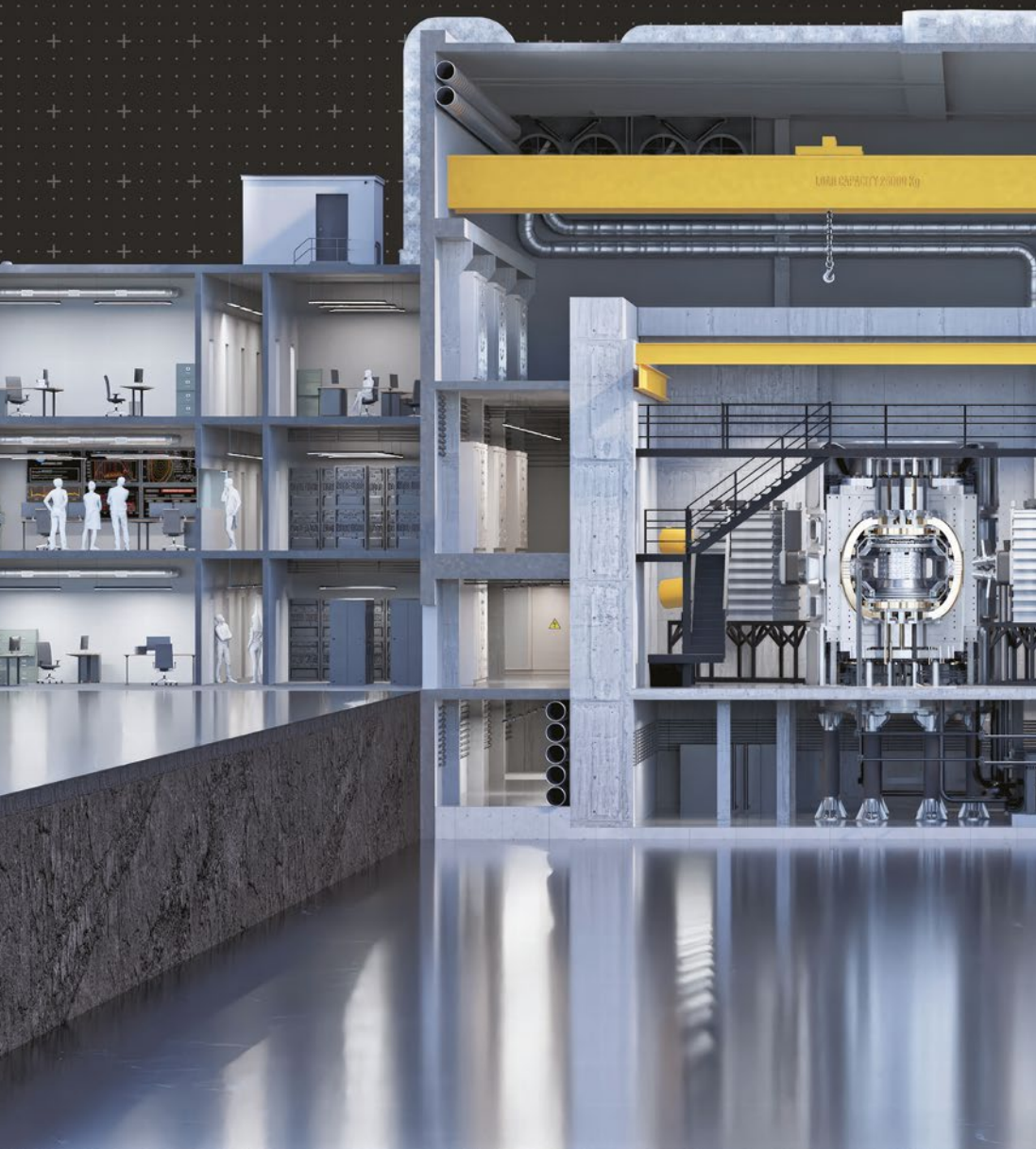
V tuzemsku byl fúzní výzkum zahájen po roce 1959 a soustředil se především na výzkum šíření vln v plazmatu. V roce 1977 byl v Ústavu fyziky plazmatu ČSAV zprovozněn původně sovětský tokamak TM-1-MH (*Tokamak Malýj Microwave Heating*), který byl v roce 1985 modernizován a přejmenován na tokamak CASTOR (*Czechoslovak Academy of Sciences Torus*). V roce 2008 byl CASTOR nahrazen tokamakem COMPASS přivezeným z výzkumného střediska UKAEA v Culhamu ve Velké Británii. CASTOR je dosud v provozu jako výukový tokamak pod názvem GOLEM na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

Výsledky dosažené na tokamaku COMPASS, fyzikálně podobném reaktoru ITER, zařadily Českou republiku mezi země se špičkovým výzkumem termojaderného plazmatu. Výzkumná činnost byla součástí evropského fúzního programu EFDA a poté konsorcia EUROfusion. Naši vědci se také podíleli na využívání evropského tokamaku JET a dalších konsorciálních zařízení, především tokamaků ASDEX-U (Německo), TCV (Švýcarsko) a WEST (Francie) nebo na vývoji diagnostických přístrojů pro reaktory ITER a DEMO.

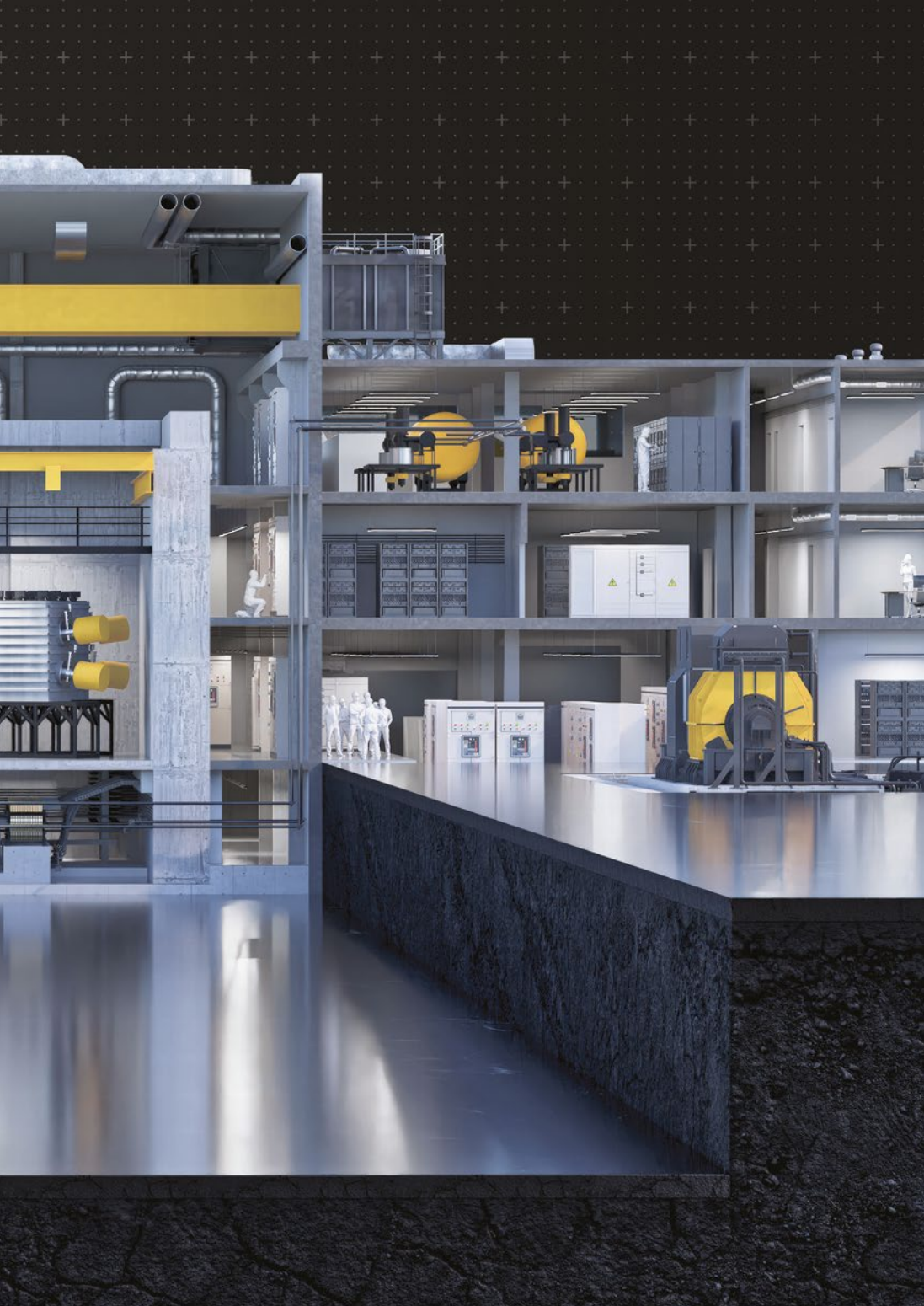
V roce 2017 byl v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR zahájen projekt COMPASS-U (COMPASS Upgrade). Jeho cílem je vybudování nového moderního tokamaku, který za využití stávající vědecké infrastruktury umožní řešit otázky, jež vznikají při přípravě fúzních elektráren. Nový tokamak vytvoří prostředí, jaké bude panovat v energetických reaktorech. Bude jediným tokamakem na světě, který bude mít stejně silné magnetické pole jako reaktor ITER.

Tokamak bude přibližně 7 m vysoký, bude mít průměr 5 m a bude vážit 300 tun. Jeho magnetické pole dosáhne 5 tesla a proud v plazmatu 2 miliony ampér. Magnetické cívky budou měděné a budou chlazeny na teplotu tekutého dusíku. Tepelné toky v tokamaku překročí 100 MW/m² a zařízení bude mimo jiné testovat i aplikaci tekutých kovů pro ochranu tepelně zatížených povrchů. První stěnu tokamaku bude možné provozovat na teplotě 300 až 500 °C, jako tomu bude v energetických reaktorech.

COMPASS-U bude pracovat v režimech v mnoha parametrech blízkých energetickým reaktorům a bude schopen významně přispět k jejich vývoji. Zároveň si však zachová flexibilitu středního experimentálního zařízení a nízké provozní náklady.



Tokamak COMPASS-U (ÚFP AV ČR)



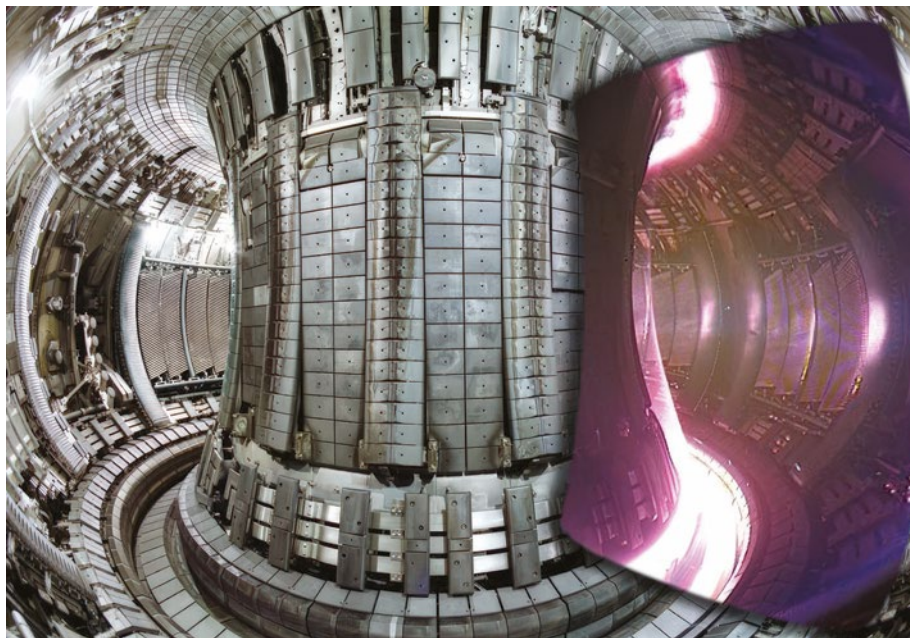
Rekordní výsledky

V uplynulých letech zažil výzkum jaderné fúze dva významné úspěchy: uvolnění rekordního množství energie v tokamaku JET a splnění Lawsonova kritéria vědeckého vyrovnání v laserovém zařízení NIF.

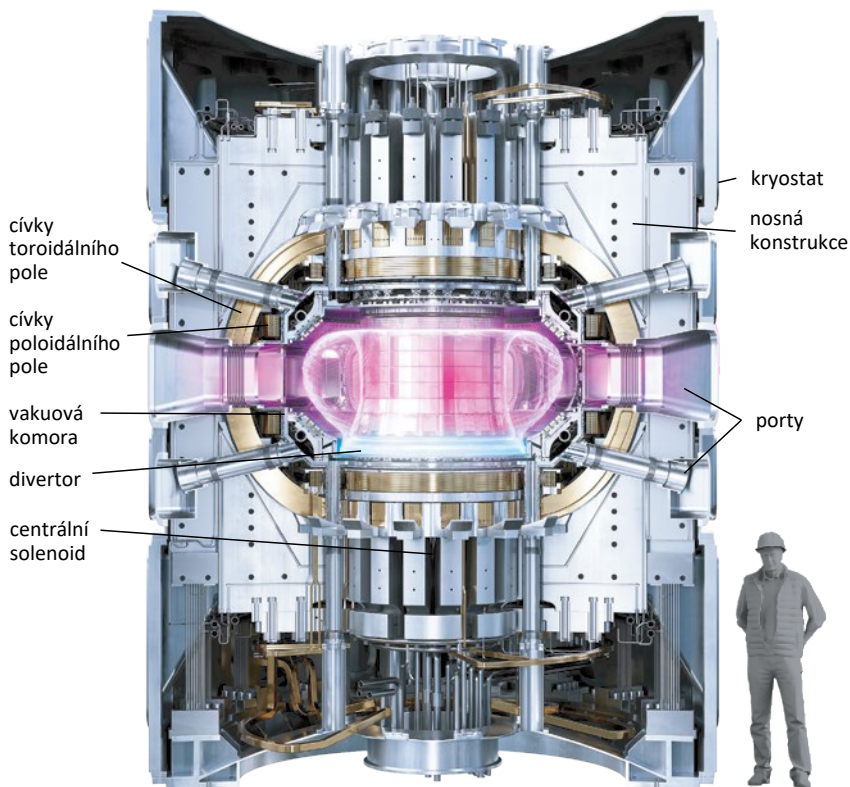
Evropský tokamak JET (*Joint European Torus*) byl po celou dobu svého provozu (1984–2024) největším fúzním reaktorem s magnetickým udržením paliva na světě. V rámci rozsáhlých výzkumných aktivit na tokamaku proběhly tři výzkumné kampaně s vysokým fúzním výkonem a použitím deuterium-tritiového paliva: kampaň DTE1 v roce 1997, kampaň DTE2 v roce 2021 a kampaň DTE3 v roce 2023. V roce 1997 JET uvolnil v jediném výboji 22 MJ fúzní energie, v roce 2021 59 MJ a v roce 2023 ještě o 10 MJ více.

Rekordní experiment roku 2023 č. 104522 měl za hlavní cíl optimalizaci provozního scénáře při vysokém fúzním výkonu. Díky účinné stabilizaci plazmatu se v experimentu, jehož hlavní část s vysokým výkonem trvala 5,3 sekundy, podařilo uvolnit 69 MJ fúzní energie při průměrném výkonu 13 MW.

V reaktoru bylo vytvořeno divertorované plazma ve tvaru písmena „D“ o průměru toroidu 6 m, průměru plazmatu 1,8 m a objemu přibližně 90 m³. Plazma bylo udržováno v ose reaktorové komory helikálním magnetickým polem o velikosti 3,85 T. Palivo tvořily ionty deuteria a tritia v poměru 1 : 4 o hustotě přibližně 9×10^{19} částic/m³. Nezvyklý poměr izotopů paliva umožnil při aplikaci deuteriových ohřevových svazků maximálně využít reakční potenciál injektovaných urychlených iontů



Reaktorová komora tokamaku JET (EUROfusion)



Tokamak COMPASS-U (ÚFP AV ČR)

deuteria s nadteplnou rychlostí při fúzních reakcích vyvolaných jednou složkou paliva o vysoké energii (tzv. *beam-target* reakce). V současných nedostatečně velkých reaktorech může být taková palivová směs výhodnější než mix 1 : 1 vyžadující vyšší teplotu, při kterém jaderná fúze probíhá především na základě termálního rozdělení energie iontů plazmatu.

Plazma bylo nejprve ohřáto elektrickým proudem o velikosti 2,5 MA, svazky urychlených neutrálních atomů deuteria o energii 130 keV a výkonu 30 MW a elektromagnetickými vlnami na iontové cyklotronové rezonanční frekvenci deuteria 25 MHz o výkonu 5 MW. Sekundu po spuštění dosáhl reaktor provozní elektronové teploty plazmatu 10 keV a fúzní výkon překročil 12 MW. Reaktor pak 5 sekund udržoval fúzní výkon mezi 11 a 14 MW. Neutronový tok se pohyboval v rozsahu od 4×10^{18} do 5×10^{18} n/s.

Konstrukce reaktoru byla před horkým plazmatem chráněna první stěnou vyrobenou z beryllia a divertorové terče, na které kontinuálně dopadá plazma, byly

Tabulka vybraných parametrů rekordních experimentů JET

Experiment	42976	42982	99971	104522
	1997	1997	2021	2023
Délka fáze pulzu s vysokým výkonem	0,5 s	5 s	5 s	5 s
Výkon ohřevu	26 MW	25 MW	31 MW	35 MW
Průměrná teplota plazmatu	150 mil. °C	50 mil. °C	80 mil. °C	90 mil. °C
Uvolněná fúzní energie	14 MJ	22 MJ	59 MJ	69 MJ
Fúzní výkon	16 MW*	5 MW	10 MW	13 MW
Zesílení Q	0,62	0,2	0,33	0,36
Tepelný výkon reaktoru	42 MW*	30 MW	41 MW	48 MW

(* v krátkém maximu)

wolframové. Fúzní reakce spotřebovala 0,2 mg paliva. Po dobu experimentu se tepelný výkon reaktoru pohyboval okolo 48 MW.

Reaktor JET s úspěchem zopakoval a zdokonalil pokusy s vysokým fúzním výkonem z předchozích kampaní. Za celou kampaň JET uvolnil více než 500 MJ fúzní energie. Tím prokázal spolehlivost a vyspělost vyvinutých provozních scénářů. Tyto scénáře budou základem pro sestavení provozních scénářů reaktoru ITER a prototypu fúzní elektrárny DEMO.

Laserové zařízení NIF (*National Ignition Facility*) v americké Kalifornii je největším zařízením na světě, ve kterém probíhá výzkum jaderné fúze s inerciálním udržením paliva. Zařízení disponuje 192 lasery o celkovém výkonu až 500 TW, jež dokáží do palivového terče dopravit více než 2 MJ energie. V roce 2021 NIF dosáhl významného úspěchu, když se při experimentu N210808 uvolnilo 1,3 MJ fúzní energie. O rok později, v prosinci 2022, následoval rekordní pokus N221204, při kterém se podařilo uvolnit 3,15 MJ fúzní energie, což bylo více než množství energie dopravené do palivového terče. Poprvé v historii tak bylo splněno Lawsonovo kritérium vědeckého vyrovnání.

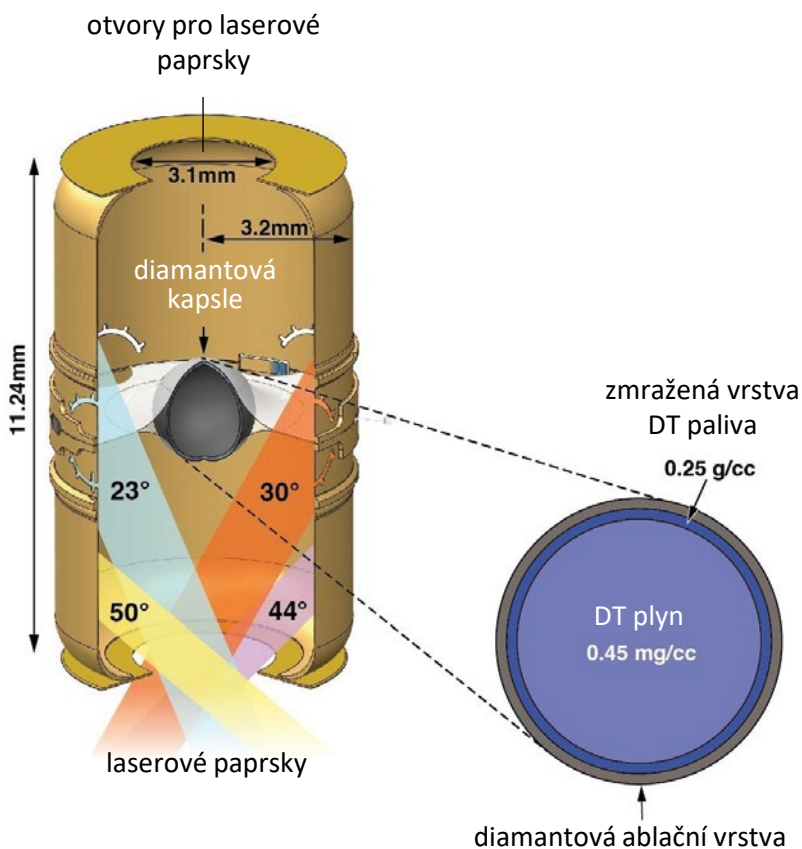
Při experimentu byla palivová kapsle ve tvaru kuličky o průměru 2,1 mm a hmotnosti 4,25 mg umístěna do tzv. hohlraumu, malého válečku o průměru 6,4 mm a výšce 11,24 mm vyrobeného z ochuzeného uranu a pokrytého tenkou vrstvou zlata. Palivová kapsle byla v hohlraumu zavěšena pomocí dvou polymerových formvarových membrán o tloušťce 45 nm.

Terčem laserů byl hohlraum. Všech 192 ultrafialových laserových paprsků o vlnové délce 351 nm bylo nasměrováno na vnitřní povrch hohlraumu ve čtyřech laserových kuzelech v úhlech 23°, 30°, 44° a 50° vzhledem k jeho svislé ose. Při výstřelu lasery předaly hohlraumu energii 2,05 MJ s výkonem 440 TW. Při ozáření emitovala zlatá vrstva intenzivní rentgenové záření, které vyplnilo vnitřek hohlraumu dříve, než se hohlraum vypařil. Rentgenové záření šokové s vysokou homogenitou ohřálo a odpařilo ablační vrstvu palivové kapsle.

Ablační vrstva o tloušťce 86 μm byla vyrobena z nanokrystalického diamantu o vysoké hustotě HDC (*high-density carbon*). V blízkosti vnitřního povrchu byla vrstva dopována wolframem zabraňujícím předčasnému ohřátí paliva uvnitř

kapsle, které by ztížilo jeho stlačení. Palivem byla směs deuteria a tritia v poměru 1 : 1 o hmotnosti 220 μg . Pod ablační vrstvou se nacházela vrstva zmraženého paliva o tloušťce 64,5 μm a vnitřek kuličky byl vyplněn palivem v plynném stavu. Při rentgenovém záblesku došlo k odpaření většiny ablační vrstvy a její zbytky stlačily palivo rychlostí 380–400 km/s na přibližně 2000krát vyšší hustotu. Tlak v palivu při stlačování překročil 600 miliard atmosfér. Časově proměnný výkon každého z laserů přitom umožnil optimalizovat kompresi paliva a symetrii imploze kapsle.

Kompresi se palivo ohřálo na teplotu 50–70 milionů $^{\circ}\text{C}$. Vysoká hustota a teplota odstartovaly fúzní reakci, která následně ohřála palivo až na 150 milionů $^{\circ}\text{C}$. Při fúzní reakci se spotřebovalo 4,3 % paliva, což bylo trojnásobné množství oproti předchozímu experimentu.



Hohlraum a palivový terč (LLNL)

Tabulka vybraných parametrů rekordních experimentů NIF
(detailní údaje o pokusech z roku 2023 a 2024 nebyly k datu vydání publikovány)

Experiment	N210808	N221204	N230730	N231008	N231030	N240212
	2021	2022	2023	2023	2023	2024
Výkon laserů	441 TW	440 TW				
Délka pulzu	9 ns	9 ns				
Energie do terče	1,89 MJ	2,05 MJ	2,05 MJ	1,9 MJ	2,2 MJ	2,2 MJ
Tlak v palivu	561 Gbar	608 Gbar				
Dosažená teplota	130 mil. °C	150 mil. °C				
Délka hoření	89 ps	75 ps				
Vyhoření paliva	1,7 %	4,3 %				
Uvolněná energie	1,3 MJ	3,15 MJ	3,88 MJ	2,4 MJ	3,4 MJ	5,2 MJ
Zesílení G	0,7	1,5	1,9	1,3	1,5	2,4

V roce 2023 vědci pokračovali v experimentech s optimalizovanými lasery a terči a výsledek se podařilo překonat. V červenci 2023 se při pokusu N230730 uvolnilo 3,88 MJ při energii dopravené do terče 2,05 MJ. V říjnu pak bylo ověřeno, že nižší energie dopravená do terče o velikosti 1,9 MJ také vede k překročení Lawsonova kritéria díky optimalizovanému terči, i když s menším výtěžkem energie. V závěru října se podařilo zvýšit energii dopravenou do terče na 2,2 MJ a uvolnit 3,4 MJ energie. V únoru 2024 se při pokusu N240212 uvolnilo 5,2 MJ, dosud nejvíce fúzní energie při inerciálním udržení. Experimenty potvrdily zásadní důležitost vysokého výkonu laserů a současně sofistikované konstrukce hohlraumu a palivové kapsle.

Dosažené výsledky ukazují, že fúzní výzkum magnetického i inerciálního udržení paliva jde správným směrem. V současnosti dále pokračuje studium fyziky plazmatu s cílem hlubšího porozumění probíhajícím procesům a vývoj technologií fúzních zařízení. Jaderná fúze s inerciálním udržením paliva je zatím ve fázi fyzikálního výzkumu, avšak jaderná fúze s magnetickým udržením paliva již řeší technologické otázky a je připravena na transfer do energetiky.

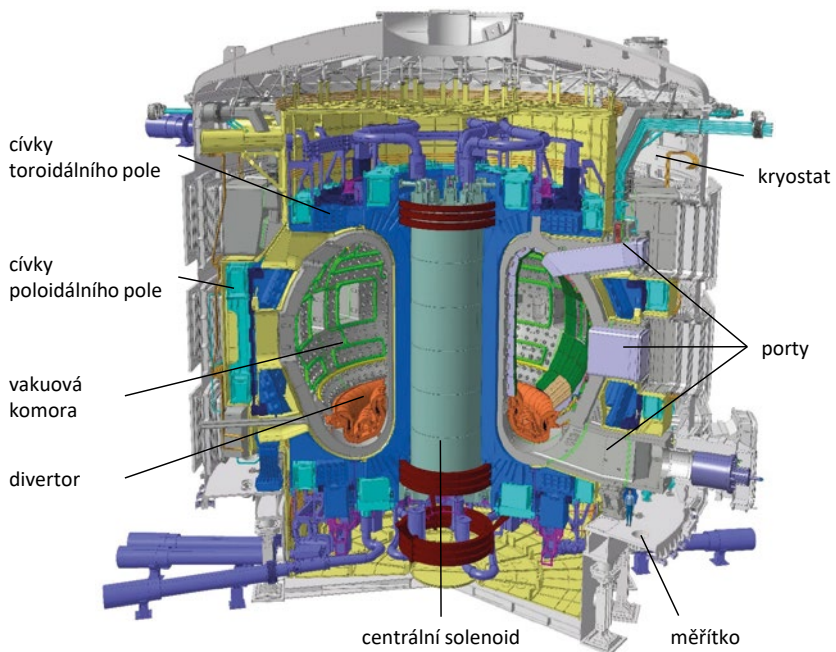
Projekt ITER

V roce 1985 se Ronald Reagan a Michail Gorbačov na summitu v Ženevě shodli na společném zájmu vyvinout nevyčerpatelný zdroj fúzní energie. Následující smlouvu o projektu mezinárodního termojaderného experimentálního reaktoru ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) podepsaly v roce 1987 USA, tehdejší SSSR, Evropské společenství a Japonsko. Přistoupení dalších zemí bylo možné prostřednictvím signatářů smlouvy. Československo se k projektu připojilo v roce 1989 prostřednictvím SSSR. V současnosti na projektu spolupracuje sedm partnerů: EU, Rusko, Indie, Čína, Jižní Korea, Japonsko a USA, kteří reprezentují více než 50 % populace Země a produkují více než 80 % celosvětového HDP. Celkově se projektu účastní 38 států.

Protože měl projekt od počátku politický charakter, hledala se obtížně shoda, jak jej financovat. Výsledkem byla dohoda, že hostitelská Evropská unie uhradí 5/11 nákladů (přibližně 45,5 %) a ostatní partneři uhradí každý 1/11 nákladů. Účastníci se přitom domluvili, že se na výstavbě nebudou podílet penězi, nýbrž vyrobenými komponentami v rámci tzv. in-kind financování. Cílem dohody bylo, aby každý partner projektu získal znalosti a zkušenosti potřebné k výstavbě fúzních elektráren a finanční prostředky vkládal do vlastního průmyslu. Nepříjemným důsledkem ale je, že jsou reaktor a ostatní technologie vyráběny po částech v různých zemích celého světa. Globální dodavatelská infrastruktura od počátku stavbu komplikovala a úkol zajistit kompatibilitu jednotlivých částí reaktoru byl náročný. Při zahájení stavby bylo nutné nejprve překonat množství administrativních, normativních a zvykových rozdílů mezi jednotlivými zeměmi a vytvořit na každý detail reaktoru vlastní výrobní předpis. Projekt ITER se stal jedinečným příkladem globální spolupráce.

Cílem projektu je postavit termojaderný reaktor o výkonu 500 MW a prokázat technickou realizovatelnost fúzního zdroje energie. Po zprovoznění bude mít reaktor ITER tři hlavní úkoly:

- dosáhnout fúzního výkonu 500 MW,
- otestovat reaktorové scénáře a technologie pro fúzní elektrárny,
- uvolňovat vysoký fúzní výkon nepřetržitě po dobu až 50 minut.



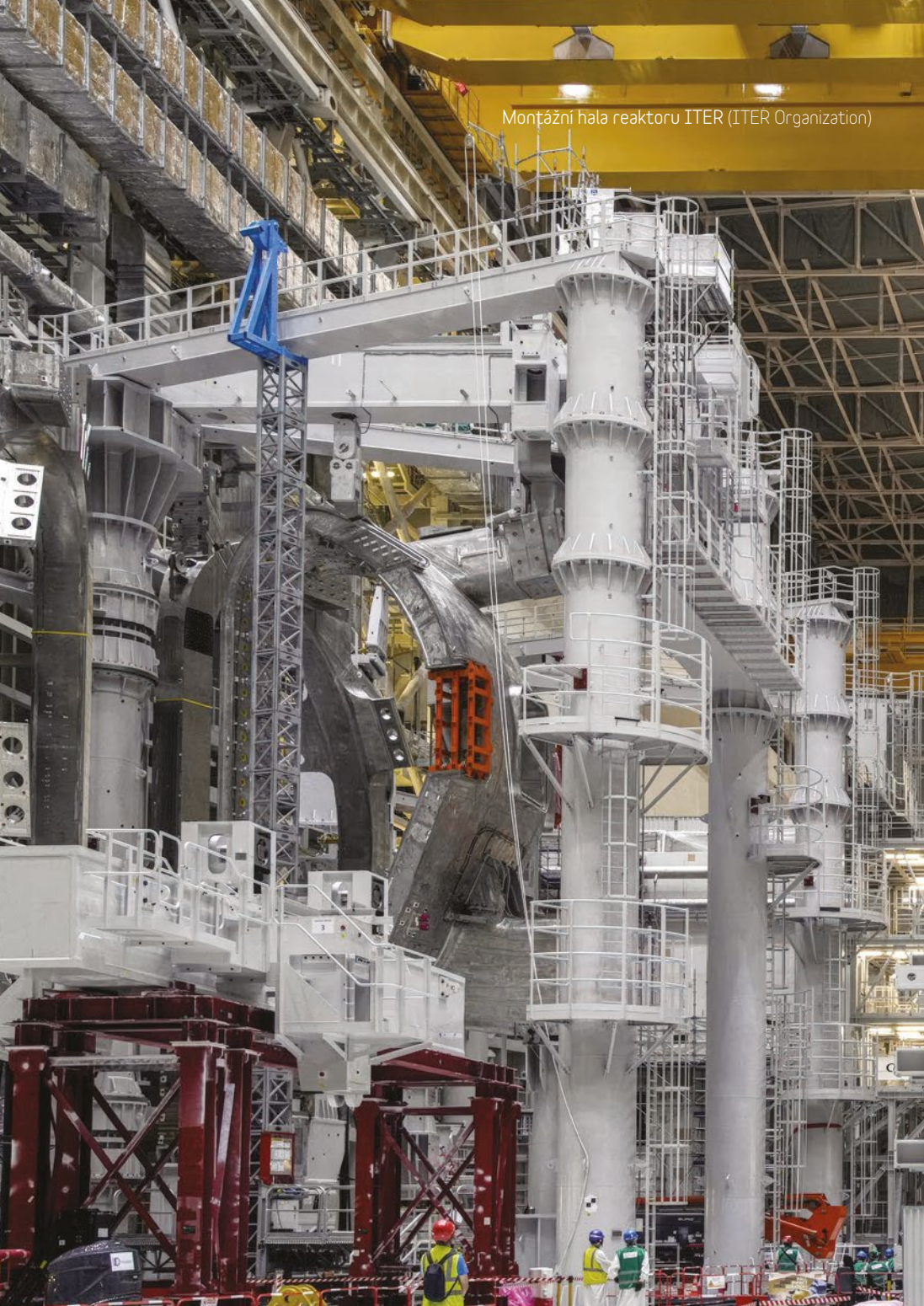
Fúzní reaktor ITER. Výška reaktoru bude přibližně 30 m, průměr 30 m a váha 23 000 t (ITER Organization)

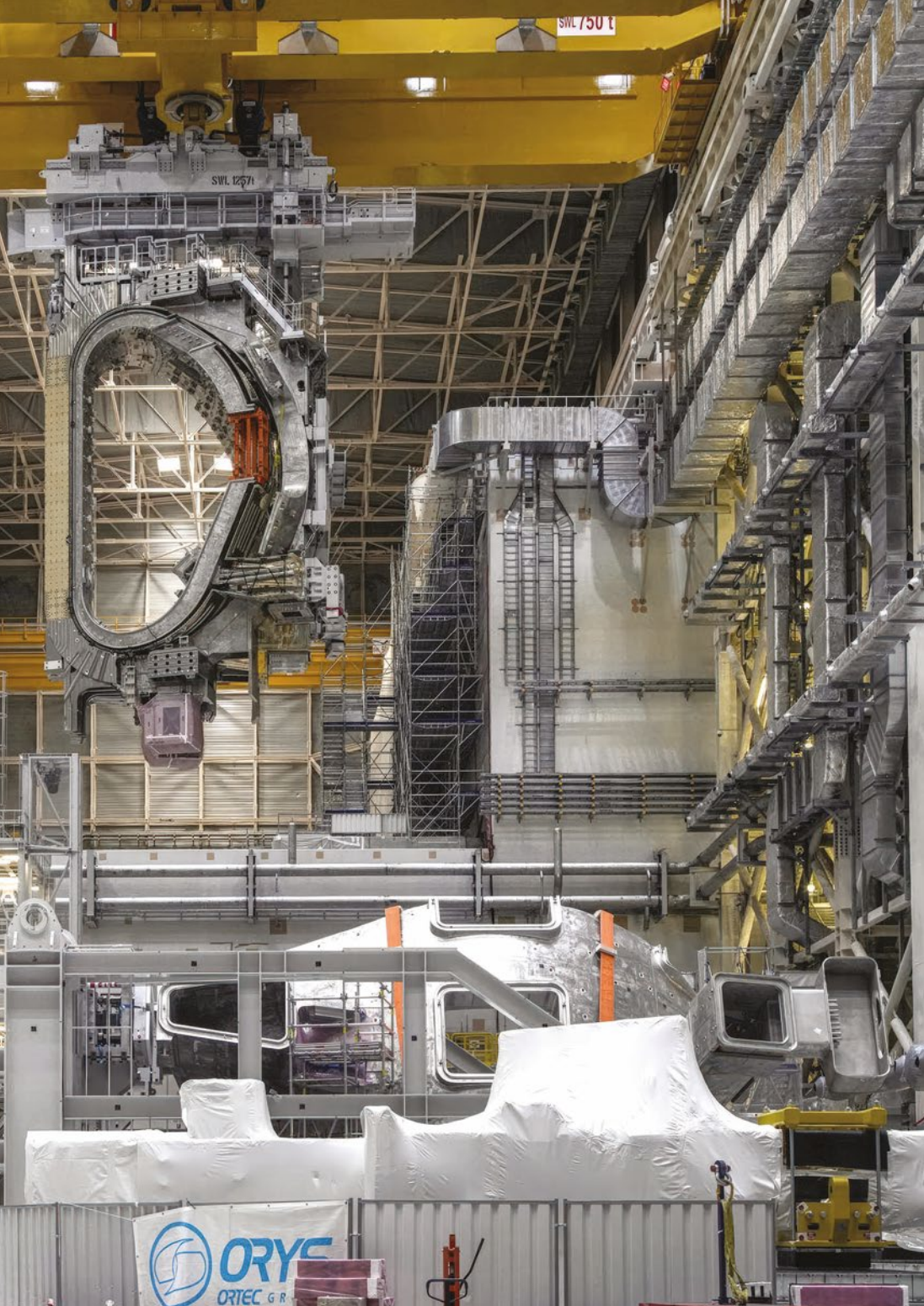


Areál ITER, říjen 2024 (ITER Organization)



Montážní hala reaktoru ITER (ITER Organization)





SWL 750 t

SWL 125 t

 **ORYC**
ORTEC GR

Reaktor bude demonstrovat řízení plazmatu a funkčnost reaktorových technologií potřebných pro fúzní elektrárny, jako jsou supravodivé magnety, systém ohřevu plazmatu, vakuový systém, palivový systém a tritiové hospodářství. Bude přibližně 30 m vysoký, 30 m široký a bude vážit 23 tisíc tun. Plazma bude mít v řezu tvar písmena „D“ o šířce 4 m a výšce 7,4 m. Průměr toroidu plazmatu bude 12,4 m a objem plazmatu bude 840 m³, zhruba 8krát více, než měl tokamak JET.

V plazmatu poteče proud 15 MA a v ose plazmatu bude magnetické pole 5,3 T při maximálním poli v reaktoru 13 T. Teplota plazmatu dosáhne 150 milionů °C. Ohřev na tuto teplotu zajistí vstřikování urychlených atomů paliva o výkonu 33 MW a elektromagnetické záření o výkonu 87 MW.

Výstavba reaktoru ITER byla zahájena v roce 2007 u výzkumného střediska CEA Cadarache nedaleko města Aix-en-Provence na jihu Francie. Vědecký program reaktoru bude zahájen v roce 2034, cílové magnetické pole reaktor vytvoří v roce 2036 a experimenty s DT palivem budou zahájeny v roce 2039.

Provoz reaktoru bude rozdělen do třech fází. V první fázi označované jako AFP (*Augmented First Plasma*) budou v období 2034–2039 postupně spouštěny jednotlivé technologie reaktoru a prováděny testy s deuteriovým palivem. V druhé fázi DT-1 v období 2039–2049 budou probíhat experimenty s deuterium-tritiovým palivem a reaktor dosáhne plného fúzního výkonu 500 MW při výkonu ohřevu 50 MW, tj. se zesílením 10. Délka experimentů bude 5 až 8 minut. V této fázi budou jaderné komponenty v reaktoru zatěžovány nejvyšším neutronovým a tepelným tokem. V poslední fázi DT-2, která bude zahájena v roce 2049, budou zprovozněny systémy neinduktivního vlečení elektrického proudu v plazmatu, zesílení poklesne na polovinu, avšak délka experimentů se postupně prodlouží až na 50 minut. V této fázi bude prověřována dlouhodobá funkčnost vyvinutých technologií v ustáleném provozním režimu.

Reaktor nebude vyrábět tritium, avšak umožní jeho výrobu otestovat. Produkce tritia je nový proces, který dosud nebyl vyzkoušen v praxi. Proto ITER poskytne 3 porty reaktoru, technologický prostor a horké komory pro testovací moduly blanketu TBM (*Test Blanket Module*), které umožní vyzkoušet a optimalizovat navržená zařízení pro výrobu tritia. Ve fázi DT-1 bude testována konstrukce TBM, ve fázi DT-2 pak vlastní výroba. Množství získaného tritia bude ale zanedbatelné a pro vlastní potřebu bude ITER nakupovat tritium vyrobené v těžkovodních štěpných reaktorech CANDU, které provozuje Kanada a další země.

ITER nebude vyrábět ani elektřinu, protože jde o výzkumné zařízení. Uvolněná energie bude vodním chlazením odváděna z reaktoru do chladicích věží.

Celkové náklady na výstavbu reaktoru dosáhnou 22 miliard eur. Významnou část těchto výdajů tvoří výzkum, vývoj a testování nových výrobních postupů, komponent a technologií. Náklady zvýšilo i politické rozdělení in-kind dodávek mezi partnery projektu, přičemž stejné komponenty a způsob jejich výroby vždy souběžně vyvíjelo několik firem v různých částech světa.

Česká republika se na projektu podílí jako člen Evropské unie. Naším nejvýznamnějším příspěvkem byly práce provedené na tokamaku COMPASS, jehož plazma velikostí a tvarem odpovídalo jedné desetině plazmatu ITER. Díky fyzikální podobnosti plazmatu hrál COMPASS důležitou roli v predikci procesů, které budou v reaktoru ITER probíhat. Dalším významným příspěvkem našich vědců bylo

vyvinutí teplotně a radiačně odolných senzorů magnetického pole na bázi Hallova jevu pro měření ustáleného magnetického pole reaktoru. V oblasti fúzních technologií probíhaly výzkumné aktivity v Řeži u Prahy a v Plzni. Nejvýznamnějšími z nich byly testy odolnosti první stěny reaktoru ITER v jaderném reaktoru LVR-15 a v moderním testovacím komplexu HELCZA (*High Energy Load Czech Assembly*) umožňujícím zkoušky modulů první stěny a divertorových terčů ITER vysokým teplem tokem.

Fúzní reakce

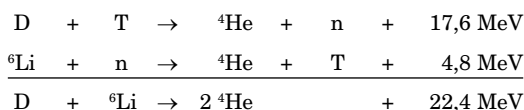
Nejvíce fúzní energie se uvolňuje při slučování jader izotopů nejjednoduššího chemického prvku, vodíku. Ten má tři důležité izotopy: izotop s jádrem tvořeným jediným protonem, označovaný jako vodík (H), izotop s jádrem tvořeným protonem a neutronem, označovaný jako deuterium (D), a izotop s jádrem tvořeným protonem a dvěma neutrony, označovaný jako tritium (T). Ostatní izotopy se za zlomek sekundy rozpadají. Izotopy vodík a deuterium jsou přírodní látky, které se na Zemi hojně vyskytují ve formě sloučenin. Nejvíce vodíku a deuteria se nachází ve světových oceánech jako součást vody. V průměru připadá na 6 240 atomů vodíku 1 atom deuteria. Tritium se na Zemi prakticky nevyskytuje, protože není stabilní a β -rozpadem s poločasem rozpadu 12,3 roku se mění na izotop helia ^3He . Nejčastěji vzniká vlivem ionizujícího kosmického záření ve vrchních vrstvách atmosféry nebo vlivem neutronového záření v těžkovodních jaderných reaktorech. Fúzní elektrárny si budou tritium vyrábět samy.

Aby fúzní reakce proběhla, musejí mít jádra dostatečnou energii na překonání odpudivé elektrostatické potenciálové bariéry. Podle současných poznatků je možné jako zdroj užitečné energie použít pouze termojadernou fúzi, při které je energie atomovým jádřem dodávána formou tepla. Jiné mechanismy vyvolání jaderné fúze, například pomocí urychlovačů, spotřebují více energie, než kolik se při fúzní reakci uvolní.

Ve fúzních energetických reaktorech první generace bude probíhat termojaderná reakce jader deuteria a tritia (tzv. DT reakce). Tato reakce probíhá při nejnižších parametrech paliva ze všech známých fúzních reakcí a umožňuje nejsnáze vytvořit energetický zisk. Optimální teplota pro průběh DT reakce je při magnetickém udržení paliva přibližně 160 milionů $^{\circ}\text{C}$.

Deuterium se bude získávat z vody. Tritium se bude vyrábět přímo v reaktoru jadernou reakcí lithia a fúzních neutronů. Neutrony uvolněné při fúzní reakci budou reagovat s lithiem rozmístěným okolo plazmatu a palivový systém zajistí odvod vzniklého tritia z reaktoru a jeho zpracování.

Celkový proces lze zjednodušeně zapsat jako souhrnnou reakci deuteria a lithia za vzniku helia a uvolnění 22,4 MeV energie:



Druhá generace fúzních reaktorů bude využívat slučování jader deuteria (DD reakce) a lithium již nebude nutné. Většina současných fúzních reaktorů pracuje s DD palivem, avšak dosažení energetického zisku je při DD reakci obtížnější než u DT reakce. V budoucnosti budou využívány také tzv. bezneutronové fúzní reakce, například fúze jader vodíku a boru. Při bezneutronové fúzi nevznikají neutrony, proto se sníží aktivace konstrukce reaktoru a otevře se cesta pro přímé generování elektrické energie bez použití tepelného oběhu. Energetický zisk bezneutronových reakcí je ale obtížně dosažitelný a jejich využití bude vyžadovat výrazný technologický pokrok.

Lawsonovo kritérium

Lawsonovo kritérium zahrnuje tři rovnice energetické rovnováhy stanovující parametry fúzního paliva, které musejí být dosaženy, aby mohla být příslušná energetická rovnováha překročena a byl vytvořen energetický zisk.

Vyrovnaní fúzního výkonu a externího výkonu dodaného do paliva se označuje jako vědecké vyrovnaní (*scientific breakeven*). Vyrovnaní fúzního výkonu absorbovaného v palivu a energetických ztrát paliva se označuje jako zapálení (*ignition*). Vyrovnaní hrubého výkonu fúzní elektrárny a její vlastní spotřeby se označuje jako inženýrské vyrovnaní (*engineering breakeven*).

Lawsonovo kritérium stanoví jako podmínku dosažení každého z energetických vyrovnaní minimální hodnotu součinu hustoty paliva n o teplotě T a doby udržení energie τ_E , která vyjadřuje odolnost paliva vůči tepelným ztrátám:

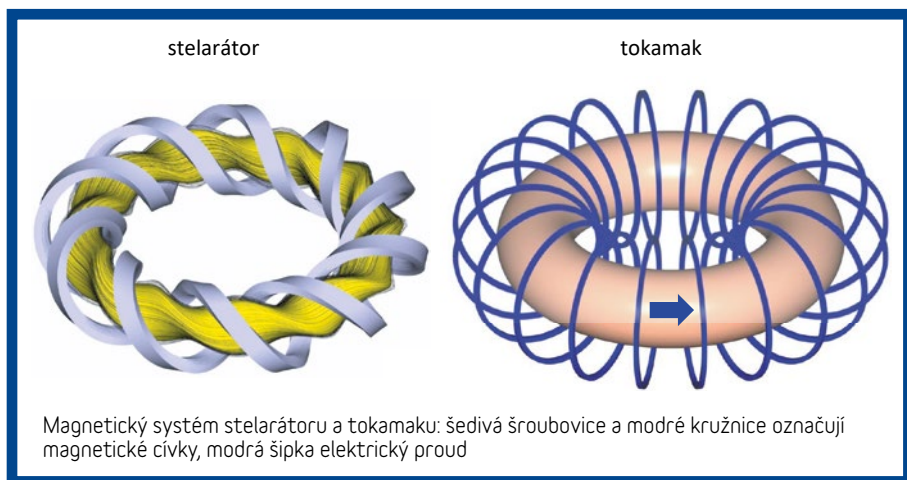
$$n \tau_E \geq f(T)$$

Kritérium je splnitelné až při velmi vysokých teplotách paliva vyšších než 100 milionů °C, protože slučovaná jádra musejí mít dostatek energie, aby při vzájemných srážkách ve velkém počtu překonávala elektrostatickou potenciálovou bariéru bránící slučování jader.

Fúzní reaktory

Součin hustoty a doby udržení energie na levé straně rovnice Lawsonova kritéria otevírá možnost splnit kritérium různými způsoby, např. udržet energii paliva o nízké hustotě po dlouhou dobu nebo paliva o vysoké hustotě po krátkou dobu. Ve všech kombinacích ale vyvstává úkol udržet pohromadě palivo o teplotě stovek milionů °C. Řešením je využití nějakého vhodného fyzikálního jevu. Například magnetického pole nebo setrvačnosti.

Jaderná fúze s palivem zachyceným v magnetickém poli se nazývá fúze s magnetickým udržením (*magnetic confinement fusion*) nebo zjednodušeně magnetická fúze. Při velmi vysokých teplotách je každá látka ve skupenství plazmatu, které je tvořeno samostatnými atomovými jádry a elektrony. Jádra i elektrony jsou elektricky nabitě částice, na něž působí magnetické pole. Bohužel neumíme v reaktoru vytvořit dostatečně silné magnetické pole, a hustota paliva proto musí být relativně



nížká na úrovni 10^{19} – 10^{20} částic/ m^3 , což je přibližně o pět řádů méně, než je hustota vzduchu. Podle Lawsonova kritéria si v takovém případě musí palivo udržet svoji energii několik sekund. Prakticky to znamená, že umístíme palivo do magnetického pole, ionizujeme jej, ohřejeme jej a snažíme se omezit jeho energetické ztráty. Snížit ztráty můžeme například vhodnou konfigurací magnetického pole anebo zvětšením objemu plazmatu.

Nejlépších výsledků dosáhla toroidální magnetická zařízení, ve kterých se siločáry magnetického pole uzavírají uvnitř plazmatu. Pro potlačení vlivu nehomogenity toroidální geometrie je v zařízeních vytvořeno šroubovicové (helikální) magnetické pole, jež lze generovat dvěma různými způsoby: ve stelarátorech použitím 3D prostorových cívek a v tokamacích kombinací planárních cívek a elektrického proudu v plazmatu.

Jinou cestou je využití setrvačnosti částic paliva, která zabrání okamžité změně jejich polohy. Jaderná fúze, při níž je palivo zachyceno vlastní setrvačností, se označuje jako fúze s inerciálním udržením (*inertial confinement fusion*), inerciální nebo laserová fúze. Charakteristický čas setrvačnosti částic je ale pouze 10^{-10} sekundy. Za tuto dobu musí proběhnout dostatečné množství fúzních reakcí, aby se vytvořil energetický zisk. Z Lawsonova kritéria vyplývá, že v takovém případě musí mít palivo hustotu nejméně 10^{30} částic/ m^3 . To je zhruba 100krát vyšší hustota než hustota olova. Podle posledních experimentů je k dosažení této hustoty potřeba vyvinout tlak v řádu stovek miliard atmosfér. Palivo je pak stlačeno na potřebnou hustotu a fúzní reakce proběhnou dříve, než se rozletí.

V poslední době vznikla řada soukromých firem, které slibují různá neobvyklá řešení a zkoumají alternativní koncepty magnetických nebo inerciálních reaktorů. Technicky je také realizovatelná fúze s elektrostatickým udržením, kde je magnetické pole nahrazeno polem elektrickým. Žádný z alternativních přístupů se ale dosud ani zdaleka nepřiblížil ke splnění Lawsonova kritéria.

Tokamak

Tokamak je reaktor s magnetickým udržením paliva, charakteristický silným toroidálním polem a indukčně generovaným elektrickým proudem v plazmatu.

Hlavní součástí tokamaku je prstencová (toroidální) vakuová nádoba, umístěná na transformátorovém jádru. Současné tokamaky používají vzduchové transformátory s centrálním solenoidem. Ten indukuje v plazmatu uvnitř nádoby vysoký elektrický proud, který vytváří poloidální magnetické pole. Okolo vakuové nádoby jsou navinuty magnetické cívky, jež vytvářejí toroidální magnetické pole. Součtem obou polí vzniká šroubovicové magnetické pole, které spoutává plazma. Indukovaný proud současně plazma ohřívá. Podél nádoby jsou ještě navinuty vnější cívky poloidálního pole, které udržují plazma v silové rovnováze a formují ho do požadovaného tvaru.

Tokamaky jsou sestaveny z řady technologických systémů. Mezi hlavní systémy každého moderního tokamaku patří:

- vakuový systém,
- magnetický systém,
- kryogenní systém,
- palivový systém,
- systém ohřevu paliva,
- chladicí systém,
- řídicí systém.

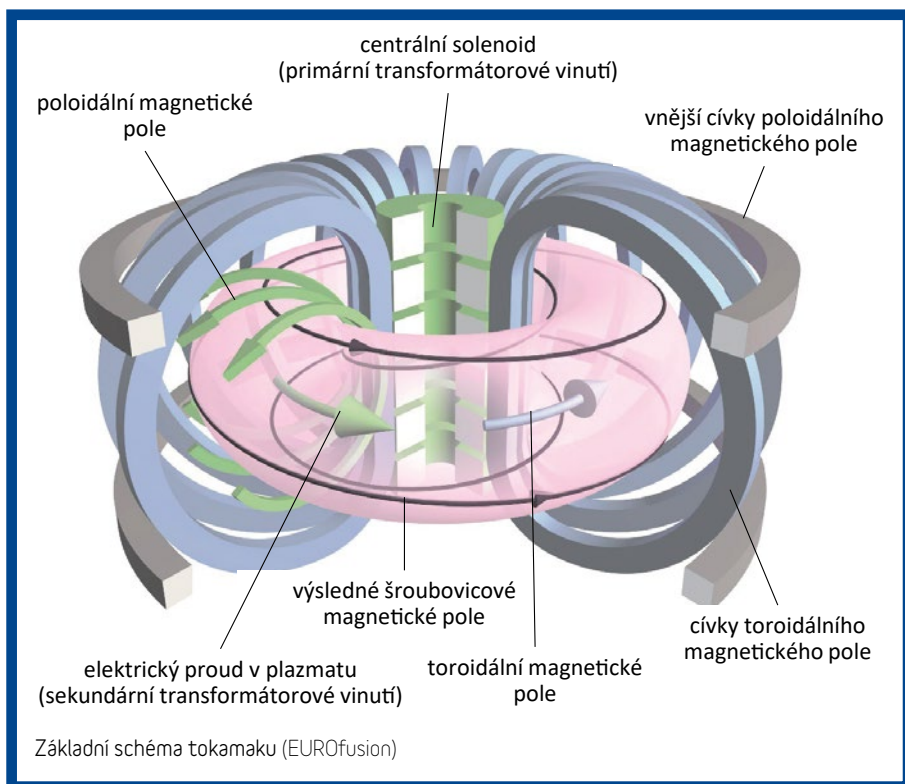
Vakuová nádoba vytváří čistý prostor pro průběh fúzních reakcí. Před spuštěním reaktoru musí být vyčerpána pomocí vývěv na velmi vysoké vakuum, protože nečistoty v palivu vyzařují energii a tím snižují jeho teplotu. Nádobu obklopují magnetické cívky, které vytvářejí magnetické pole a tvarují plazma. Cívky menších tokamaků jsou obvykle měděné, u nových velkých tokamaků jsou supravodivé. Kryogenní systém má za úkol chlazení supravodivých nebo podchlazených měděných magnetických cívek, kryogenních vývěv a dalších zařízení na kryogenní teploty.

Palivový systém zajišťuje přípravu a doplňování paliva do tokamaku. Při spouštění je palivo do tokamaku vstřikováno v plynné formě, při provozu jsou do plazmatu vstřelovány pelety zmrazeného paliva. Znečištěné palivo je z reaktoru odváděno pomocí divertoru, který umožňuje odčerpávat povrchovou vrstvu plazmatu.

Pro dosažení teplot potřebných pro průběh termojaderné reakce na úrovni stovek milionů °C nejprve plazma ohřívá vysoký elektrický proud v řádu tisíců až desítek milionů ampér. Se vzrůstající teplotou ale klesá elektrický odpor plazmatu a tento ohřev se stává neúčinným. Pro další ohřev slouží svazky urychlených neutrálních atomů paliva a elektromagnetické vlny, které svoji energii předávají plazmatu. Zařízení systému ohřevu budou využita také pro neinduktivní generování elektrického proudu.

Chladicí systém chladí konstrukci reaktoru a odvádí uvolněnou energii z reaktoru. V reaktorech s měděnými magnetickými cívkami zajišťuje chlazení cívek.

Reaktor a všechny technologie jsou v reálném čase ovládány systémem řízení obvykle označovaným jako CODAC (*control, data acquisition and communication*). Systém zajišťuje dosažení a udržování nastavených provozních parametrů plazmatu. Důležitou funkcí systému řízení je ochrana personálu a reaktoru před stavu,



keré by ho mohly poškodit. Údaje o probíhajících procesech v plazmatu získává řídicí systém pomocí diagnostických senzorů. Diagnostika plazmatu je postavena především na analýze magnetického pole a záření. Pasivní metody sledují lokální magnetická pole a záření emitované plazmatem. Aktivní metody analyzují záření, které je vydáváno při interakci plazmatu s externími laserovými, mikrovlnnými nebo částicovými paprsky.

Jaderná zóna

Při DT reakci se fúzní energie uvolňuje ve formě kinetické energie jader helia a neutronů, které vznikají při fúzní reakci. Heliová jádra jsou kladně nabitá, a proto zůstávají zachycena magnetickým polem v plazmatu. Neutrony bez elektrického náboje plazma opouštějí a pronikají do konstrukce reaktoru, kde srážkami předávají svou energii a pak jsou pohlceny.

Jaderná zóna je oblast reaktoru bezprostředně obklopující plazma. Hlavními komponentami jaderné zóny jsou první stěna, blanket a divertor. První stěna (*first wall*) je bezprostředně vystavená plazmatu. Jejím úkolem je chránit konstrukci reaktoru.

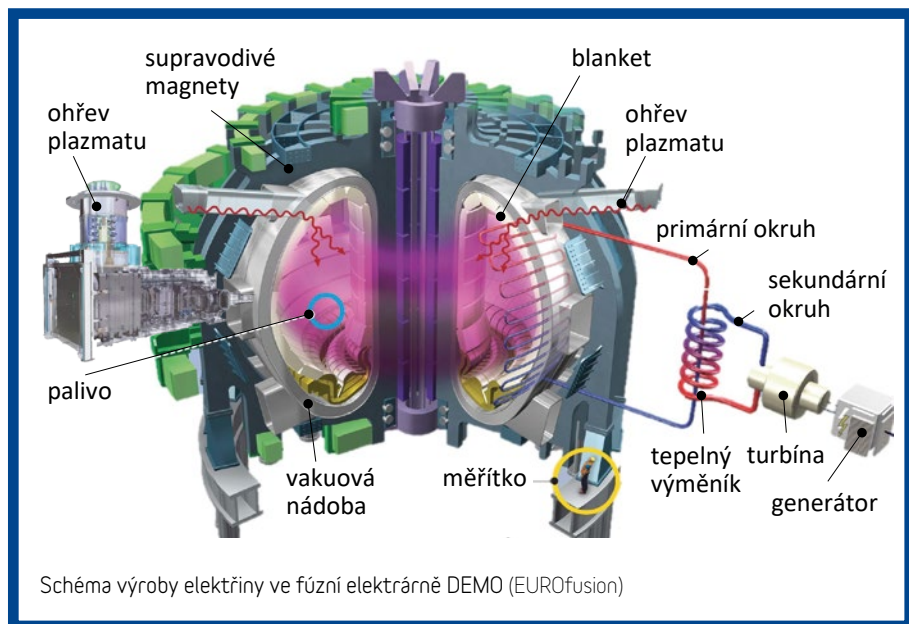
Blanket označuje vnitřní obklad vakuové nádoby, který má za úkol absorbovat fúzní neutrony. V blanketu energetických reaktorů bude probíhat také výroba tritia. Neutrony a výroba tritia budou blanket intenzivně ohřívat. Chlazením blanketu bude energie odváděna ven z reaktoru a použita k výrobě elektřiny.

Třetí důležitou částí jaderné zóny je divertor. Jeho hlavním úkolem je čištění plazmatu a odvod helia, vznikajícího při fúzní reakci. Divertor pomocí magnetických cívek odklání (divertuje) okrajové magnetické siločáry. Okrajová vrstva plazmatu proudí podél odkloněných siločar na divertorové terče. Kontaktem s terči se plazma ochlazuje a poté je odčerpáváno vývěvami.

Výroba elektrické energie

Zdrojem tepelné energie pro výrobu elektřiny bude fúzní reaktor, jehož chlazením bude uvolněná energie odváděna k výrobě elektřiny jako v jaderných elektrárnách. Fúzní elektrárny se budou jaderným elektrárnám podobat. Budou mít jaderný a turbínový ostrov, palivové hospodářství a další obvyklé elektrárenské technologie. Reaktor bude umístěn v ochranném kontejnmentu, k němuž bude přiléhat palivové hospodářství a turbínová hala.

Fúzní elektrárny budou dvouokruhové, aby byla vytvořena bariéra přenosu materiálů aktivovaných v reaktoru do turbínové části. Sekundární okruh bude pracovat na bázi Rankin-Clausiova parního nebo Braytonova plynového termodynamického cyklu.



Bezpečnost fúzních reaktorů

Základním rysem fúzních reaktorů je, že termojaderná fúzní reakce probíhá pouze za podmínek, které na Zemi přirozeně nejsou a je obtížné je vytvořit. Především vyžaduje velmi vysokou teplotu paliva. Proto je pro průběh reakce nezbytná rozsáhlá technická podpora, jež potřebné podmínky vytvoří. Pro zastavení fúzní reakce stačí vypnout kterýkoliv z hlavních podpůrných systémů. Pokud například uvolníme magnetické pole, dojde kontaktem s první stěnou k ochlazení paliva a žádná fúzní reakce již neproběhne. Nebo můžeme do reaktoru napustit trochu plynu, který palivo rychle ochladí.

Ochlazením paliva se jaderná fúze vždy okamžitě přeruší. Fúzní reakce je v tomto smyslu mnohem bezpečnější než oheň, protože ji lze kdykoliv ihned zastavit a při technické poruše se automaticky ukončí sama. Fúzní reaktor je inherentně bezpečný zdroj energie.

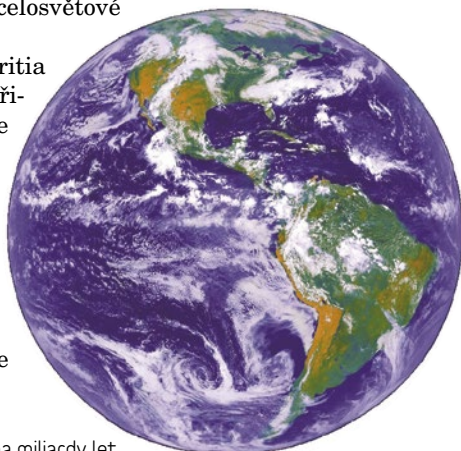
Reaktor bude navíc obsahovat pouze minimální množství paliva, řádově gramy vodíkových izotopů. Zastavení přívodu paliva přirozeně zastaví fúzní reakci. Ani havarijní únik paliva do ovzduší nijak neohrozí životní prostředí, protože lehké vodíkové atomy budou stoupat do vyšších vrstev atmosféry, kde se díky mizivému množství neškodně rozptýlí.

Při provozu bude působením fúzních neutronů docházet k aktivaci konstrukce reaktoru a bude vznikat aktivovaný odpad. Výběrem vhodných konstrukčních materiálů lze zamezit vzniku radionuklidů s dlouhým poločasem rozpadu. Pro komponenty jaderné zóny se volí takové konstrukční materiály, které umožní odpad recyklovat nejpозději do 50 až 100 let od jeho vzniku.

Zásoby fúzního paliva

Zásoby fúzního paliva na Zemi jsou prakticky nevyčerpatelné. Ve světových oceánech se nachází až $4,76 \times 10^{16}$ kg deuteria. Toto množství je při použití DD reakce dostatečné pro úplné pokrytí stoupající celosvětové spotřeby energie po miliardy let.

Pozemské zásoby lithia pro výrobu tritia v první generaci fúzních elektráren jsou přibližně $1,83 \times 10^{13}$ kg izotopu ${}^6\text{Li}$. Jestliže bude fúzní DT reakce používána delší dobu, pak zásoby lithia v oceánech vystačí na pokrytí celosvětové spotřeby energie až milion let. Všechny stávající fúzní reaktory ale používají především DD palivo a je jen otázkou času, kdy bude díky vývoji možné i v energetických reaktorech DD reakci využívat a lithium nebude potřeba.



Ve světových oceánech je zásoba fúzního paliva na miliardy let

Z antropogenního hlediska je fúzní palivo nevyčerpatelný zdroj energie. Jeho zásoby jsou ve vodě v antropogenním prostoru dostupné všem obyvatelům Země. Využití jaderné fúze odstraní energetickou nadvládu zemí disponujících zásobami paliv a poskytne všem zemím energetickou nezávislost.

Fúzní palivo také splňuje nejprísnejší kritéria kladená na udržiteľné i obnoviteľné zdroje energie. Fúzní energetický tok bude kontinuálny a zcela prirodzený. Díky vysoké energetické vydatnosti bude čerpání paliva probíhat v malých množstvích. Přitom dojde ke snížení lokální koncentrace paliva. Přírodní procesy, difúze a proudění vody, budou přirozeně a nepřetržitě tuto koncentraci vyrovnávat s okolní vodou bez zásahu člověka.

Fúzní elektrárna o elektrickém výkonu 1 GW spotřebuje přibližně 1 kg paliva denně. Pro získání tohoto množství postačí přefiltrovat 30 m³ vody denně, z nichž se 29,999 m³ zase vrátí zpět do vodního zdroje. Pro měsíční provoz fúzní elektrárny o velikosti temelínské jaderné elektrárny bude stačit přefiltrovat vodu z plaveckého bazénu. Odpadem fúzní reakce bude přibližně 0,7 kg helia denně.

Ekonomika

Rychlost vstupu fúzních reaktorů do energetiky bude záviset na ekonomických faktorech a politických rozhodnutích. V ekonomické rovině bude počáteční nevýhodou fúzní energetiky nová technologie, první svého druhu, která je vždy dražší než pozdější sériové výrobky, protože její dodávka s sebou nese rizika, chybí potřebné zkušenosti s výrobou a provozem, stejně jako optimalizace výrobních postupů. Očekává se proto, že první fúzní elektrárny budou dražší než současné jaderné elektrárny. Vývoj a zdokonalování fúzních technologií na základě získaných zkušeností ale jejich cenu postupně sníží.

Důležitým rysem výroby elektřiny ve fúzních elektrárnách bude minimální cena paliva, která bude tvořit méně než 1 % provozních nákladů. Dominantní bude naopak cena technologií. To vytvoří široký prostor pro snižování ceny vyráběné elektřiny technologickým vývojem, zdokonalováním reaktorových systémů a použitím nových pokročilých odolných materiálů, které prodlouží životnost komponent reaktoru. Díky tomu se v budoucnu elektřina z fúzních elektráren stane jednou z nejlevnějších na trhu.

Z politického hlediska je jaderná fúze jediný známý energetický zdroj, který má potenciál účinně snížit vliv naší civilizace na životní prostředí. Na rozdíl od jaderných elektráren budou fúzní elektrárny vyrábět elektřinu bez rizika jaderných havárií a jejich odpad bude recyklovatelný. Na rozdíl od obnovitelných zdrojů budou mít konstantní elektrický výkon. Je ovšem na rozhodnutí politiků, jakou sumu investují do vývoje nového energetického zdroje, který je prakticky nevyčerpatelný a umožní vyrábět dostatek elektřiny bez negativních dopadů na přírodu.

*doc. Ing. Slavomír Entler, Ph.D.,
Ing. Ondřej Ficker, Ph.D.*

Centrum PALS je vybavené jodovým fotodisociačním laserovým systémem poskytujícím subnanosekundové impulzy s energií až 1 kJ a titan-safírovým femtosekundovým laserovým systémem s impulzy o energii až 1 J. Centrum je základnou pro experimentální výzkum v oboru laserů o vysokém výkonu a fyziky laserového plazmatu. V rámci evropského konsorcia LASERLAB-EUROPE, jehož je ÚFP členem, zajišťuje PALS otevřený mezinárodní přístup vybraným uživatelům z Evropské unie. Výzkumná infrastruktura PALS poskytuje rovněž experimentální čas domácím uživatelům, jako jsou například Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, Fakulta elektrotechnická ČVUT, Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR, a vychovává mladé vědecké pracovníky pro budoucí potřeby například projektu ELI Beamlines či dalších mezinárodních laserových infrastruktur.

Sekce Plazmochemie a materiály se zabývá nerovnovážným plazmatem a různými možnostmi jeho využití. Studují se zde elementární fyzikální a chemické procesy v plazmatu, které jsou pak cíleně řízeny k dosahování specifických účinků pro různé aplikace v oblasti ekologie, biologie, lékařství či povrchových úprav materiálů. Probíhá zde výzkum výbojů včetně jejich diagnostiky a modelování. Vědci se věnují také výzkumu využití plazmové pyrolýzy organických látek, jako jsou zemní plyn nebo odpadní plasty, pro výrobu syntetického plynu a uhlíkových nanočástic. Díky využití vlastností plazmatu lze například produkovat čistý „tyrkysový“ vodík z uhlovodíků, bezpečně a ekologicky likvidovat nebezpečný odpad, pomáhat při terapii zhoubných nádorů nebo vytvořit ochranné nástrčky různých komponent, které chrání před destruktivními vlivy agresivního prostředí. V oblasti materiálového inženýrství je výzkum zaměřen na zkoumání interakce materiálů s plazmatem a přípravu materiálů vystavených působení plazmatu ve fúzních reaktorech. Výzkum je prováděn v rámci široké mezinárodní a domácí spolupráce.

Sekce TOPTEC, patřící mezi aplikační centra Akademie věd ČR, se věnuje výzkumu optiky, optoelektroniky a vývoji aplikací spojených s touto tematikou. Dlouhodobá strategie je zaměřena na excelenci v klíčových oblastech, zahrnujících rozvoj technologie opracování komplexních optických povrchů, posun od jednoduchých optických prvků ke komplexním optickým systémům, hyperdimenzionální analýzu, pokročilou spektroskopii a inovace v oblasti infračervené optiky. Mezi stěžejní výzkumné aktivity patří konstrukce moderních optických systémů, které využívají optoelektronické prvky řízené a monitorované počítači, výzkum a vývoj procesů opracování optických skelných, keramických a kovových materiálů, výzkum a vývoj tenkých vrstev pro antireflexní a superreflexní účely, výzkum měřicích a analytických metod jak pro použití při měření tvaru optických ploch, tak například pro přesnou spektroskopii, a materiálový výzkum zaměřený především na feroelektrické a další nelineární optoelektronické materiály či použití nových materiálů pro realizaci tenkých vrstev s unikátními vlastnostmi. Díky tomu se výzkumný tým podílí na řešení řady mezinárodních projektů, například v oblasti metrologie a vývoje optických systémů pro výzkum kosmu (družicový i pozemní) či pro vývoj supervýkonných laserů.

Jaderná fúze je zdrojem energie Slunce a všech ostatních hvězd. Blíží se ale doba, kdy budeme jadernou fúzí vyrábět elektřinu. Důvodem je především to, že zásoby fúzního paliva jsou reálně nevyčerpatelné. Při nárůstu celosvětové spotřeby energie podle odhadů OSN jsou pozemské zásoby fúzního paliva dostatečné až do doby vyhasnutí Slunce a zániku Země, ve vesmíru pak fúzní palivo tvoří převážnou část viditelné hmoty.

Jaderná fúze představuje nízkouhlíkový, nízkemisní a nízkoodpadový energetický zdroj, v současnosti jediný známý, který umožní vyrábět elektřinu s vysokým výkonem nezávislým na počasí bez negativních dopadů na životní prostředí.

Cesta k energetickému využití jaderné fúze je náročná. Spoutání slunce vyžaduje vývoj nových hi-tech vymožeností v širokém spektru oborů, které umožní spolehlivou činnost průmyslového zařízení při teplotách v rozmezí od absolutní nuly do stovek milionů stupňů Celsia a při vysokých energetických tocích. Odměnou za to bude energetický zdroj, který poskytne lidstvu dostatek levné a čisté energie po příštích miliony let.

V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:

Reysa Alenzuela: **Knihovna Orientálního ústavu** (překlad do ČJ)

Pavlna Kellarová: **Digital Humanities a knižní kultura**

Karel Segeth: **Ivo Babuška, nápaditý numerický matematik**

DOSUD VYŠLO:

Václav Cílek: **Adaptace města na klimatickou změnu**

Petr Halas, Eva Kallabová, Jan Lacina: **Ve stopách malíře Josefa Jambora**

Kateřina Chládková, Lucie Jarůšková, Michaela Svoboda: **Děti a bilingvismus**



Spolufinancováno
Evropskou unií



Akademie věd
České republiky

STRATEGIE AV21

Edice Věda kolem nás | Výzvy a otázky
Spoutané slunce | Slavomír Entler, Ondřej Ficker

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., Nakladatelství Academia. Grafická úprava dle osnovy Jakuba Krče a sazba Serifa. Odpovědný redaktor Vojtěch Němec. Vydání 1., 2025. Ediční číslo 13183. Tisk **SERIFA**®, s. r. o., Jinonická 80, 158 00 Praha 5.

ISSN 2464-6245

Evidováno MK ČR pod e. č. E 22344

Další svazky získáte na:
www.vedakolemna.cz | www.academia.cz