

Jak dostat hvězdu na Zemi

Díky ní existuje vesmír, jak jej známe: Jaderná fúze probíhající ve hvězdách zásobuje celý kosmický prostor energií a životodárnými prvky. Bez ní by i Země tvořila jen chladný mrtvý svět. Dokážeme fúzi napodobit v našich podmínkách, a získat tak téměř nevyčerpatelný energetický zdroj?

Ptala se Jana Žďárská

Víc než polovina vyrobené energie v současnosti pochází z fosilních paliv. Přitom v roce 2035 budeme podle odborníků potřebovat až o 40 % elektřiny víc než dnes, abychom zajistili obrovský výkon pro průmysl a dopravu. **V budoucnosti by nám mohla pomoci jaderná fúze coby základní energetický zdroj ve vesmíru** (viz Jak získat energii vesmíru). Je ekologická, udržitelná a na rozdíl od jaderných elektráren neprodukuje radioaktivní odpad. Technologicky je však velmi náročná a zatím se nepodařilo zkonstruovat reaktor, který by dokázal generovat víc energie, než pro fúzi sám spotřebuje. K dosažení návratnosti je třeba vyřešit dva problémy: iniciovat fúzní reakci a následně ji dlouhodobě udržet.

Nejdřív se musí z plynu vytvořit plazma a po zahájení fúzní reakce se musí hořící plazma udržovat, jinak se stane nestabilním a reakce se zhroutí.

Mezi nejnadějnější **cesty k uskutečnění řízené jaderné fúze v pozemských podmínkách dnes patří reaktor fungující na principu tzv. tokamaku** (viz Slovníček). Jedno takové zařízení, pojmenované GOLEM, mají i na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze. Slouží tam k provádění četných experimentů a pomáhá budoucím vědcům pochopit základní principy fúzní technologie. Jak hrdě říká hlavní inženýr GOLEMa **Vojtěch Svoboda**, s nímž jsme si na dané téma povídali: „*Recept na energii budoucnosti už máme.*“

Ted' ještě potřebujeme zhotovit nádoby a vychovat si dobré kuchaře.“

? Můžete nám tokamak GOLEM nejprve představit?

Jedná se o nejstarší funkční tokamak na světě, vznikl již v padesátých letech v Moskvě v Kurčatovském výzkumném ústavu. Jeho duchovními otci se stali Igor Tamm a Andrej Sacharov, kteří se inspirovali myšlenkou ruského vojáka Olega Lavrenťeva. Tenkrát se však přístroj nazýval TM-1.

? Jak přišel ke svému novému pojmenování?

Je v tom samozřejmě určitá symbolika. Naše fakulta se nachází v Břehové ulici

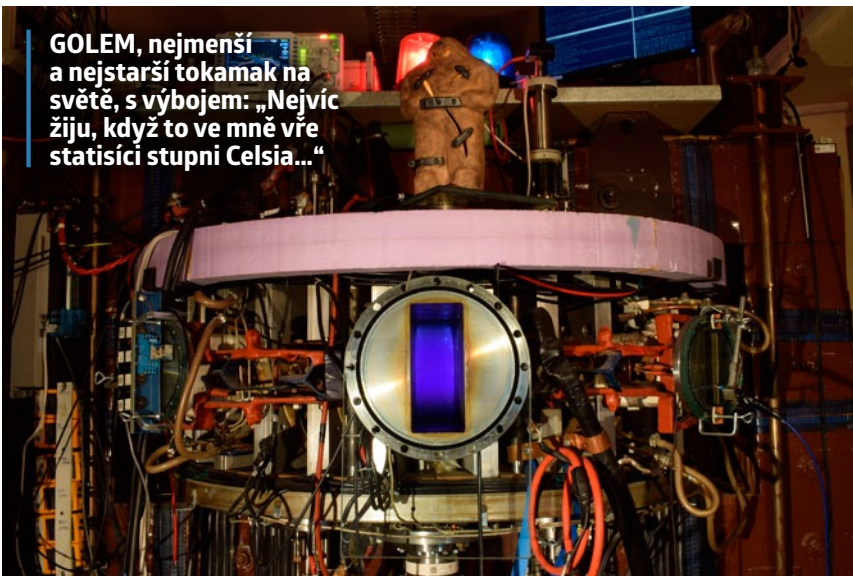
Kdo je...

Ing. Vojtěch Svoboda, CSc., (*1967)

vystudoval Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze, v roce 2001 získal titul kandidáta fyzikálně-matematických věd na Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. V letech 2006–2009 se zásadně podílel na reinstalaci tokamaku GOLEM jako evropského vzdělávacího centra experimentální výuky v oblasti termojaderné fúze na půdě FJFI ČVUT, od roku 2009 je jeho hlavním inženýrem. V letech 2014–2015 získal čtyřikrát diplom Zlatá křídla za výuku na „rodné“ fakultě a v roce 2017 obdržel medaili 3. stupně za přínos k jejímu rozvoji. Mimo vědeckou práci se intenzivně věnuje popularizaci vědy (Noc vědců, Týden vědy FJFI).



GOLEM, nejmenší a nejstarší tokamak na světě, s výbojem: „Nejvíc žiju, když to ve mně vře statisíci stupni Celsia...“



na Starém Městě a otvírá se z ní půvabný výhled na Starý židovský hřbitov, kde je podle pověsti pochován i rabín Jehuda Löw ben Becalel. Ten prý roku 1580 vytvořil pro ochranu svého lidu nevidaného bojovníka Golema s nadpřirozenou silou, která pocházela z koncentrované vesmírné energie.

? Cesta přístroje na fakultu nebyla úplně jednoduchá. Jak se tam nakonec dostal?

GOLEM se do Československa přesunul z tehdejšího Sovětského svazu v roce 1977 a následujících třicet let fungoval pod názvem CASTOR jako špičkové zařízení v Ústavu fyziky plazmatu na Akademii věd. V roce 2007 však Akademie získala z Británie větší tokamak Compact Assembly neboli COMPASS, takže GOLEM dostal možnost fungovat na jiné úrovni – mezi studenty. Přibližně v době, kdy putoval k nám na fakultu, se u nás rozjžděl nový studijní obor „Fyzika a technika termojaderné fúze“. A tak mohl po krátkém zapracování začít úspěšně sloužit při testovacích experimentech studentům. Tedy těm, z nichž vychováme odborníky pro budoucnost jaderné energetiky.

? Jaké procesy se snaží jaderná energetika napodobit?

Uvnitř hvězd probíhá jedinečný proces, který plní kromě jiných dvě důležité funkce: Hvězdy obohacují spektrum prvků ve vesmíru o těžké varianty a také produkují životodárnou energii. Po Velkém třesku se v kosmu vyskytoval jen vodík, shlukoval se a nabíral na sebe další a další hmotu. Jakmile už byl shluk příliš velký a vnější slupky příliš tlačily na jeho

nitro, začal se gravitačně hrotit. Tlak a teplota uvnitř přitom rostly k hodnotám, kdy mohou částice díky své velké kinetické energii překonat elektrostatické odpuzování kladně nabitých jader vodíku. Takto se nastartovala fúze, tedy jaderné slučování, během níž se lehčí prvky v konečném důsledku slučují na těžší, přičemž se podle základních fyzikálních principů s použitím známého Einsteinova vzorce $E = mc^2$ uvolňuje energie.

? Jak lze takovou „vesmírnou energii“ vyrobit na Zemi?

Velmi zjednodušeně řečeno přivedeme do vakua izotopy vodíku, deuterium a tritium,

Energii budoucnosti by mohla zajišťovat jaderná fúze, tedy základní energetický zdroj ve vesmíru

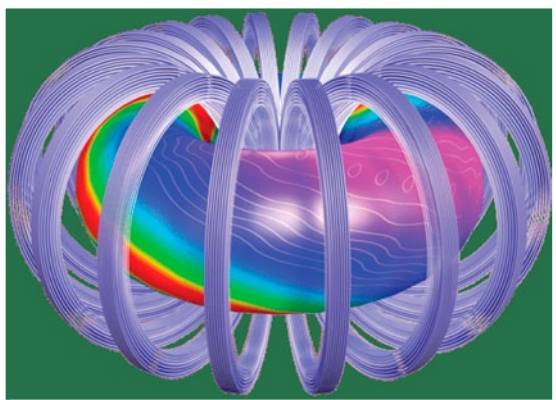
načež je zahřejeme na extrémní teplotu, zhruba sto milionů stupňů. Částice tak získávají zmiňovanou kinetickou energii, jejíž pomocí překonají elektrostatické síly odpuzování jader atomů. Nastartuje se proces fúze a začne se uvolňovat energie.

? A jak to vypadá v útrobách GOLEMa?

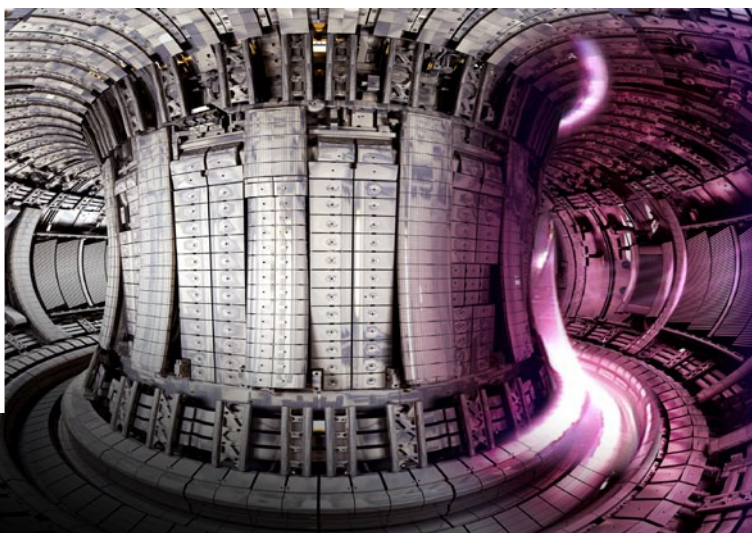
Jeho srdce tvoří vakuová komora v toroidální geometrii, připomínající obrovskou duši pneumatiky či záchranný kruh. V ní

se snažíme dosáhnout plazmatického stavu hmoty se zmíněnými extrémními teplotami. Těm ovšem neodolá žádný dosud známý materiál, z něž bychom mohli komoru či reaktor postavit. Proto plazma spoutá a v toroidální komoře ho bezpečně uvězní magnetické pole šroubovicového charakteru, které žhavou hmotu donutí „levitovat“, aby se pokud možno co nejméně dotýkala vnitřního povrchu komory.

Nesmírně důležité je udržet v nádobě tokamaku velmi vysoké vakuum. Vznik



Nitro jednoho z tokamaků. Plazma v toroidální komoře bezpečně uvězní magnetické pole



Magnetické pole žhavé plazma spoutá a donutí jej „levitovat“, aby se co nejméně dotýkalo povrchu komory

a ohřev plazmatu se zajišťují výbojem v plynném vodíku, který se do vakuové komory vstříkne předem, podobně jako je tomu ve výbojových trubiciích u doutnavého výboje, s pomocí elektrického pole. K tomu je třeba být jen na kratičký okamžik, v řádu jednotek až desítek milisekund, dosáhnout jeho velmi vysokého výkonu. K nezbytnému zkoncentrování energie slouží kondenzátorová baterie, přičemž se použité kondenzátory nabíjejí na napětí ve stovkách voltů. Lze tak na krátký čas získat značně vysoké proudy plazmatu v řádu kiloampér.

? Dokážeme-li v budoucnu vyrábět elektrickou energii „z vody“ a lithia, kolik takového paliva by zabezpečilo spotřebu běžného člověka po celý jeho život?

Mohu odpovědět zhruba následujícím příkladem: Je spočítáno, že v klasické lithiové baterii, kterou známe z mobilů či notebooků, a ve sto litrech vody je dohromady dost energie, aby pokryla spotřebu jednoho člověka po celý jeho život. Jde o celkovou globální spotřebu západní společnosti v přepočtu na hlavu.

? Jakých nejlepších výkonů se zatím při termonukleární fúzi podařilo dosáhnout?

Do současných tokamaků se stále musí dodávat víc energie, než se následně vyprodukuje. Poměr by se měl zlepšovat s rostoucími rozměry zařízení. S tím však narůstají i finanční náklady a další technologické problémy. Dnes se staví největší experimentální tokamak světa ITER: Jeho cílem je ukázat, že lze nalézt vhodnou bezpečnou technologii, jak produkovat fúzní energii o výkonu pěti set megawattů nepřetržitě po deset až dvacet minut s fúzním ziskem za výhledově rozumnou cenou (viz *Správná cesta?*).

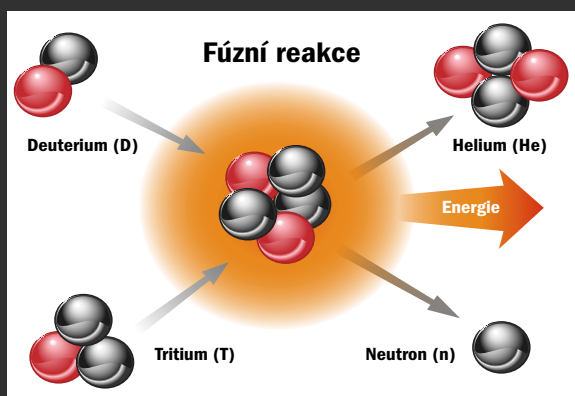
Zatím nejlepšího výkonu se podařilo dosáhnout ve společném evropském fúzním reaktoru JET neboli Joint European Torus. Jeho rekord činí pětadesát procent z celkové spotřebované energie. Poskytl tak nezvratný důkaz, že je získávání energie pomocí jaderné fúze vědecky realizovatelné.

? Na vývoji poznání termonukleární syntézy se nepodílí mnoho států,

Jak získat energii vesmíru

Jaderná fúze představuje základní zdroj energie ve vesmíru. Dochází k ní v nitrech hvězd za vysokých teplot a ohromného tlaku. Během budoucí jaderné reakce v pozemských podmínkách se budou slučovat dva atomy lehkých prvků do jednoho těžšího a uvolňuje se obrovské množství energie. **Vědci používají**

pro syntézu nejčastěji jádra izotopů vodíku deuteria a tritia – první zmíněný obsahuje voda, druhý lze získat z lithia. Simulace podmínek v nitrech hvězd je však na Zemi složitá, zejména pokud jde o dostatečný tlak. **Proto se využívá další navyšování teplot:** Vyvolání fúzní reakce vyžaduje zhruba 100 miliónů stupňů.



ale Česko mezi ně patří. Jaké podmínky platí pro zajištění bezpečnosti takového zařízení?

Bezpochyby se jedná o nejbezpečnější formu výroby energie z jádra. Nejde o ten typ případně nekontrolovatelné řetězové reakce a v okamžiku ostrého provozu bude v reaktoru nanejvýš pár gramů paliva. Daný potenciál by tak v mimořádné situaci nanejvýš částečně poškodil reaktor, ale určitě se zcela minimálními možnými ekologickými dopady. Tritium je samozřejmě radioaktivní a principiálně se může uvolnit do prostředí, jeho záření však zastaví malá vrstva vzduchu, takže by určitě nebezpečí znamenalo pouze požití či vdechnutí.

? Tvrdíte, že je GOLEM sice nejmenší a zároveň nejstarší tokamak na světě, ale s největším velínem. Mohl byste nám tuto kuriozitu vysvětlit?

Při stěhování na fakultu v Břehové ulici bylo třeba pro něj vybudovat zcela novou infrastrukturu. Díky tomu je nyní napojen na nejmodernější informační technologie, servery a také na internet – tudíž si na něm může iniciovat a vyzkoušet výboj prakticky kdokoliv a odkudkoliv pomocí počítače, notebooku nebo třeba jen chytrého telefonu s internetovým připojením. Žádný jiný tokamak na světě takto rutinně nefunguje. Zmíněnou možnost nabížíme evropským i světovým univerzitám, jež vychovávají novou generaci fyziků a technologů, kteří mohou v budoucnu naši snahu o efektivnější výrobu energie dotáhnout do úspěšného konce. Jediná nepsaná a nepovinná podmínka zní, aby nám ti, kdo si výboj vyzkoušejí, poslali pohlednici z místa, odkud jej provedli. A jak vidíte, máme jich na této stěně už skutečně spoustu. Dokonce jsme napočítali, že se zhruba

Slovníček

Tokamak je jedním ze dvou druhů reaktorů pro jadernou fúzi v tzv. nádobách s magnetickým udržením. Druhý typ představuje tzv. stelarátor, přičemž rozdíl mezi nimi spočívá ve způsobu vytváření magnetického pole. To se využívá k oddělení horkého plazmatu od stěn reaktoru, aby se neroztavily.

Plazma tvoří čtvrté skupenství hmoty. Jedná se o ionizovaný plyn, reprezentující až 99 % pozorované atomární látky vesmíru, a to v různých, často velmi odlišných formách. Můžeme se s ním setkat například v podobě blesku, polární záře, uvnitř zářivek či v elektrickém oblouku. Plazma utváří také hvězdy, mlhoviny či sluneční vítr.

patnáct set výbojů iniciovalo zpoza hranic naší republiky.

? A jaké máte plány do budoucna?

Chystáme se prodloužit výboj ze současných pětadvaceti milisekund na ideálních padesát, a dosáhnout tím teploty plazmatu blízko magického milionu stupňů Celsia. Rádi bychom dobudovali infrastrukturu GOLEMa tak, aby byla vhodná pro nácvič nápadů budoucích výzkumníků. Svými rozměry se totiž hodí právě pro pokusy v malých měřítkách, které lze potom testovat na velkých vědeckých zařízeních typu COMPASS či ITER. Chceme se stát centrem vzdělávání v oblasti tokamakové fyziky a plazmatu pro věhlasné evropské univerzity.

Zároveň cítíme, že naplnění našich velkých cílů vyžaduje značnou podporu široké světové veřejnosti. Proto se chystáme jednou za čtvrt roku nabídnout naše zařízení v nejprostší podobě do internetové sítě tak, aby si mohl vlastní výboj v Břehové vyzkoušet kdokoliv a kdekoliv na Zemi. Prostě bych nerad, aby tu GOLEM jen tak nečinně stál – nejvíc žije, když to v něm vše statisíce stupňů Celsia. ✍

Mgr. Jana Žďárská působí jako místopředsedkyně Kosmologické sekce České astronomické společnosti, pracuje na Fyzikálním ústavu AV ČR. K astronomii ji v dětství přivedl otec, v rámci její popularizace se věnuje nejen rozhovorům s vědeckými osobnostmi a reportážím z astronomických akcí

Správná cesta?

Pro získání dostatečného množství energie a dosažení rentability jaderné fúze je třeba, aby energie pro ohřev plazmatu vznikala ze samotné fúzní reakce a nemusela se dodávat zvenčí. Hlavní důvod, proč se fúzi zatím nepodařilo udržet, spočívá podle předpokladu vědců ve velikosti reaktoru. Ve Francii tak v současnosti vzniká nejrozměrnější zařízení tohoto typu, nazvané

- ITER alias International Thermonuclear Experimental Reactor.
- Funguje na principu tokamaku a je osmkrát větší než jeho dosud testovaní předchůdci: Konstruuje se na 840 m³ plazmatu, jež má dosáhnout teploty 150 milionů stupňů.
- Předpokládaný výkon reaktoru činí 500 MW při dodávce 50 MW, tudíž by měl vyrobit desetkrát víc energie, než spotřebuje.

Reaktor ITER by měl být poprvé spuštěn v prosinci 2025

