

Soukromý kapitál ve výzkumu řízené termojaderné fúze



Akademie věd
České republiky



věda 65

kolem
nás
výzvy
a otázky

Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i. (www.ipp.cas.cz)

Předmětem činnosti ÚFP je výzkum a aplikace čtvrtého skupenství hmoty – plazmatu. Výzkum zahrnuje jak experimentální, tak i teoretické studium vysokoteplotního plazmatu a jaderné fúze, laserového plazmatu, nízkoteplotního plazmatu a plazmové chemie, materiálového inženýrství a optické diagnostiky. Nedílnou součástí tohoto výzkumu je vývoj potřebných diagnostických metod a vyhledávání možností aplikačního využití plazmatu. ÚFP dále získává, zpracovává a rozšiřuje vědecké informace, poskytuje vědecké posudky, stanoviska a doporučení a ve spolupráci s vysokými školami uskutečňuje doktorské studium a vychovává vědecké pracovníky.

ÚFP se zabývá výzkumem v řadě oblastí:

- fyzika vysokoteplotního plazmatu a termojaderná fúze; ústav provozuje velkou výzkumnou infrastrukturu „tokamak COMPASS“; v rámci programu EURATOM koordinuje výzkum řízené termonukleární fúze v ČR;
- impulzní plazmové systémy s možným využitím v medicíně (bezoperační likvidace tělních kamenů a tkání), v ekologii (odstraňování nežádoucích organických nečistot z vody a plynů), v elektronice (např. RTG litografie);
- vývoj světově unikátních plazmatronů s vodní a hybridní (plyn–voda) stabilizací pro plazmové technologie (předchozí verze byly instalovány u několika firem v Japonsku, USA a Belgii): nástřiky, destrukce odpadů a zplynování organických látek s produkcí vysoce kvalitního syntetického plynu;
- materiálové inženýrství využívá termické plazma jako nástroj k tvorbě ochranných povlaků, samonosných keramických prvků nebo funkčně gradovaných materiálů; studuje vliv plazmatu na vlastnosti konstrukčních materiálů;
- velká výzkumná infrastruktura „Laser PALS“ je využívána nejen ke generaci a studiu laserového plazmatu, ale i pro širší oblast témat, která potřebují k realizaci vysoce výkonný laser; současně je školícím pracovištěm pro projekty ELI a HiPER;
- Centrum TOPTEC je zaměřeno na výzkum a vývoj speciální optiky a optických a jemnomechanických systémů; jeho nejmodernější špičkové vybavení umožňuje řešení projektů od návrhů, analýz a simulací po velmi přesnou výrobu a testování.

Všechna oddělení ústavu jsou připravena pro spolupráci na domácí i mezinárodní úrovni jak v oblasti řešení vědeckovýzkumných úkolů, tak při přípravě studentů a mladých vědeckých pracovníků.

Úvod

Alternativním porodem počínaje, přes alternativní typy výchovy a vzdělávání až po alternativní léčbu a stravování... alternativní přístupy jsou zkrátka *in*. Platí to i o termojaderné fúzi? Zdání klame, soukromníci nefinancují jen alternativní přístupy.

Získávání energie pomocí termojaderné fúze je nesmírně lákavé a v posledních 10–15 letech přitahuje i soukromý kapitál. Tokamaky s obrovskými magnety jsou veliké a tím i drahé. Soukromníkův sen je malé, laciné zařízení, nejlépe umístěné na kuchyňském stole, v horším případě na nákladním autě. Tak za pět, nejpozději za deset let. Fantazie? Možná. Na druhé straně je třeba připomenout známé Einsteinovo: „Nevěděl, že to nejde, a tak to udělal!“

Privátní přístupy, o kterých dnes novináři rádi píší v touze po senzaci typu „tokamak ITER za miliardy je podvod,“ jsou často oprášená a různě pospojovaná opuštěná schémata minulosti. Pravdou ovšem je, že nové poznatky a nové technologie mohou opuštěným návrhům vdechnout nový život.

Popsané přístupy soukromých společností mají společný pulzní charakter – jsou na polovině cesty od inerciálního udržení k magnetickému a jako palivo preferují směs vodíku a boru.

Reakce p ¹¹B:



je především bezneutronová, tj. na pravé straně rovnice se nevyskytují neutrony. Tedy žádná sekundární radioaktivita, žádná degradace konstrukčních materiálů, ovšem místo reakční teploty 15 keV směsi deuterium-tritium je třeba palivo ohřát na 300 keV.

Bor najdete v mořské vodě, bohatá ložiska jsou v Mohavské poušti v USA a dosud neodkrytých 75 % světových zásob má Turecko. Á *propos* tritium v DT reakci pro mezinárodní tokamak ITER se na Zemi nevyskytuje prakticky vůbec a bude ho třeba vyrábět dosud neprověřenou technologií ve fúzním reaktoru. Na druhé straně jedna DT reakce poskytuje 17,8 MeV oproti 8,7 MeV reakce p ¹¹B.

Ve většině popsaných metod se setkáte s různými formami plazmoidu – relativně stabilního kompaktního plazmového útvaru bez vnějšího magnetického pole někdy nazývaného plazmový oblak, zhustek, shluk, chomáč, klastr. Plazmoid může obsahovat „zamrzlé“ magnetické pole. Lehner u svého zařízení Focus Fusion-1 hovoří dokonce o efektivitě plazmoidu.

Posledním společným přáním je přímá přeměna fúzní energie na energii elektrickou. Vynecháním parního mezistupně by se měla výroba elektřiny podstatně zlevnit, neboť parogenerátor spotřebuje až 80 % nákladů na stavbu elektrárny.

Existuje nejméně osm významných společností financovaných soukromníky soutěžících v oblasti fúze (General Fusion, Tri Alpha Energy, Tokamak Energy, MIT, Lawrenceville Plasma Physics, EMC2, Skunk Works Lockheed Martin a Helion Energy).

Helion Energy, Inc.

Řízení: Dr. David Kirtley (výkonný ředitel); Dr. John Slough; Chris Pihl; Dr. George Votroubek

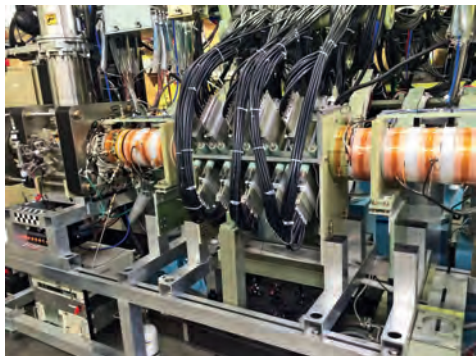
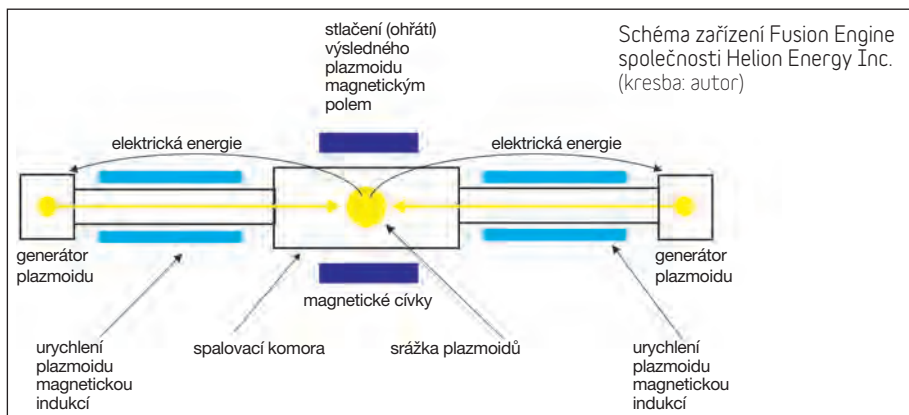
Podpora: Ministerstvo energetiky USA, Ministerstvo obrany USA, startup Y Combinator a Mithril Capital Management Petera Thiela a firma Ajay Royan. Pro pilotní komerční elektrárnu bude třeba 200 milionů \$ (rok 2022?).

Ústředí: MSNW LLC, Redmond, WA, USA

Založeno: 2012; Kirtley, Slough, Pihl, Votroubek

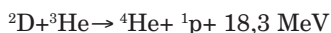
Princip (reakce D^3He)

Technologie Fusion Engine je založena na induktivním urychlovači plazmoidů (Inductive Plasmoid Accelerator, IPA), vyvinutém v MSNW LLC v letech 2005–2012, podobném fúznímu raketovému motoru podle J. Slougha. Při frekvenci 1 Hz (vystřelí každou sekundu) vstříkne proti sobě dva plazmoidy, ty se ve spalovací komoře spojí a stlačením vnějším magnetickým polem dosáhne nový plazmoid fúzních parametrů.



Zařízení Fusion Engine společnosti Helion Energy (foto: Helion Energy)

Fúzující rozpínající se plazma přemění svoji kinetickou energii na energii elektrickou. Při experimentech IPA dosahovaly rychlosti 300 km/s a produkovaly neutrony při teplotách deuteriových iontů 2 keV. Relativní stabilita plazmoidů je dána reverzní konfigurací magnetického pole (Field Reversed Configuration, FRC) zamrzlého v plazmoidu. FRC mají uzavřené magnetické siločáry, $\beta = (\text{kinetický tlak plazmatu}) / (\text{tlak magnetického pole}) \approx 1$ a to vše bez vnořených vodičů; β udává efektivitu magnetického udržení. Plazmoid FRC má největší β ze všech magneticky držených fúzních plazmat a vyznačuje se největší hustotou fúzního výkonu dosaženou opakovacím a nedestruktivním režimem. Velké hodnoty β mají také kulové tokamaky a vstřícná pole. Pulzní režim Helionu by měl využít výhod helia 3 jako bezneutronového paliva a přímou přeměnou pohybové energie α -částic na elektřinu eliminovat potřebu parních turbín a chladicích věží (a s nimi spojených ztrát energie)



Fusion Engine je kompaktní (dá se naložit na nákladní auto), škálovatelný, bude vyrábět lacinější elektřinu než současné základní zdroje energie. Společnost Helion zvolila způsob, který eliminuje neefektivní a nákladné lasery, písty nebo techniku používanou jinými přístupy.

Helion plánuje dosáhnout break-even během tří let, za desítky milionů \$ – to je téměř 10× rychleji a 1000× levněji než ITER.

Příběh (z materiálů společnosti)

„Helion Energy je vedlejší produkt společnosti MSNW LLC z Redmondu, která vyvíjí pohony raket a technologie blízké termojaderné fúzi. Když sledujeme monstrozní fúzní program naší vlády, který sype miliardy dolarů do komerčně nesmyslného řešení, jsme čím dál přesvědčenější o tom, že musí existovat smysluplnější cesta. Přicházíme s novým přístupem a za 5 milionů \$ od Ministerstva energetiky USA jsme vyvinuli technologii pro řadu přelomových prototypů. Jejich úspěchy nás posunuly do čela soukromě financovaného výzkumu fúze a s podporou soukromého kapitálu rychle postupujeme ve vylepšování technologií směrem ke komerčnímu využití. To vše by nebylo možné před deseti lety. Nedávné pokroky vysokovýkonné elektroniky vyvíjené pro kosmické pohony a chytré sítě umožnily společnosti Helion Energy stavbu zařízení Fusion Engine.“

Názor odjinud

Je to jednoduché. Vyrobité dva plazmoidy, urychlené v magnetickém poli je vstříknete do spalovací komory, kde spojením vzniklý plazmoid stlačíte silným magnetickým polem a zapálíte fúzi. Energii rozlétajícího se fúzního produktu – alfa částice – přeměníte v elektřinu. Je to jednoduché až příliš. Chybí například zhodnocení případných nestabilit. Palivo, se kterým se počítá – ${}^3\text{He}$ – se na Zemi v potřebném množství nevyskytuje a doprava z Měsíce, kde ho je dost, v současnosti není vůbec laciná. Ovšem při získávání sponzorů je nutné být optimistou. Raději si počkáme, až z bran firmy vyjede nákladní auto naložené fungujícím Fusion Engine.

Milan Řípa

Energy Matter Conversion Corporation, EMC2

Řízení: Jaeyoung Park, Richard Nebel

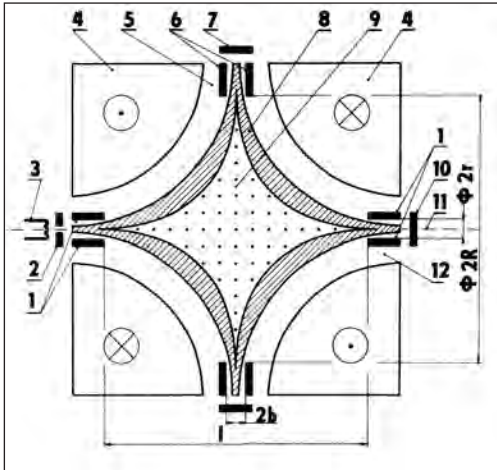
Podpora: Ministerstvo obrany USA, Námořnictvo USA

Ústředí: San Diego

Založeno: 1984; Robert Bussard († 2007)

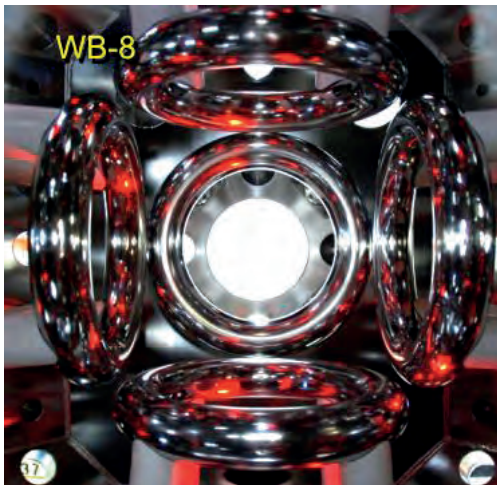
„Komise je přesvědčena, že poslední výsledky při udržení plazmatu ve Wiffelball jsou pravděpodobně jedny z nejvýznamnějších ve fyzice plazmatu a magnetické fúzi za posledních padesát let.“

(Ze závěru nezávislé komise vedené Robertem Hirschem, 2013)



Vstříčná pole - základ polywellu

1, 6 - osové a prstencové brzdící anody;
2, 7, 10 - osové a prstencové brzdící katody;
3 - elektronová tryska,
4 - cívky vstříčného magnetického pole;
12, 5 - osové a prstencové magnetické štěrbiny;
8 - nenulové magnetické pole;
9 - téměř nulové magnetické pole
(kresba: autor, 1979)



Polywell WB-8

(foto: archiv EMC2)

Princip (reakce p ¹¹B)

Polywell vychází z koncepce fúzoru, nejjednoduššího fúzního reaktoru na světě. Fúzor má dvě kulové elektrody z drátěné mřížky, jednu uvnitř druhé. Ve vakuové komoře napětí urychlí ionty k vnitřní mřížce a vyrazí z ní elektrony. Některé ionty proletí skrze okna mřížky a pokračují do středu fúzoru, kde se sráží mezi sebou a fúzí. Ztráty částic po nárazu na mřížky Robert Bussard snížil náhradou vnitřní elektrody virtuální elektrodou prostorového náboje elektronů přitahující kladné ionty, které jsou urychlovány do centra k prostorovému náboji elektronů.

Polywell tvoří prstencové cívky, sestavené ve vakuové komoře do tvaru polyhedronu. V sousedních cívkách má elektrický proud opačný směr. Ztráty částic štěrbinami magnetického pole jsou částečně sníženy recirkulací, která částice vrací do reakčního objemu.

Příběh

Phil Farnsworth, „otec“ televizní obrazovky, pozoroval v padesátých letech minulého století prostorový náboj uprostřed koncentrické kulové diody. Svěřil se Robertu Hirschovi, který se v šedesátých letech intenzivně zabýval studiem Farnsworthova objevu v rámci inerciálního elektrostatického udržení. R. Hirsch se v roce 1968 setkal na legendární novosibiřské konferenci s O. A. Lavrentěvem. Živou výměnu informací ukončilo jmenování R. Hirsche vedoucím fúzní divize Komise pro atomovou energii USA. Jeho náměstkem se stal R. Bussard, kterému nikdy nechyběly vizionářské nápady. Bussardův ramjet je běžný pohonný systém popisovaný v science fiction, když už ne fungující ve skutečných kosmických lodích.

Bussard se osamostatnil a spolu s Brunem Coppim, později profesorem Massachusetts Institute of Technology, MIT, založili společnost Inesco (*innesco* znamená italsky „zažehují“) pro vývoj nového fúzního reaktoru, který nazvali Riggatron podle Riggs National Bank, svého prvního ručitele. Ovšem jejich největším sponzorem byl Bob Guccione, extravagantní vydavatel časopisů pro pány *Penthouse* a *Omni*. Inesco chtěla produkovat kompaktní fúzní reaktory se silným magnetickým polem zaměřené ani ne tak na výrobu energie, jako na výrobu energetických neutronů. Riggatron měl použít mimořádně silné magnetické pole s nesupravodivými cívkami umístěnými uvnitř vakuové komory. Inesco bylo zřejmě prvním případem, kdy soukromý kapitál investoval do výzkumu řízené termojaderné fúze. O to kurióznější, že na výzkum termojaderné fúze vydělávaly nepříliš oblečené krásy na obrázcích *Penthouse*. Společnost Inesco zkrachovala, aniž by postavila jediný Riggatron.

Bussard v roce 1984 založil novou společnost Energy Matter Conversion Corporation (EMC2), ve které se věnoval elektromagnetickým pastem. Pasti byly svou konfigurací vstřícných magnetických polí blízkými příbuznými Lavrentěvových „lovušek“. Zatímco O. A. Lavrentěv při zvětšování reakčního objemu řadil jednotlivá vstřícná pole za sebou, Bussard postupoval jinak. Ze vstřícných polí sestavoval prostorové 3D krychlové útvary, připomínající spíše koule než Lavrentěvovy válce. Podle dětské hry Wiffel Ball pojmenoval řadu svých zařízení WB-1 až WB-6. Cívky generující magnetické pole jsou celé ve vakuové komoře a jejich magnetická pole se ve vakuové komoře uzavírají. Bussard byl asi první, kdo uvažoval o bezneutronové reakci protonu s borem – p ¹¹B.

Bussard získal podporu amerického Ministerstva obrany a později amerického námořnictva. Jaeyoung Park, který nyní vede EMC2, tvrdil, že Bussard byl „konceptně velmi dobrý, ale slabý experimentátor“. V poslední minutě experimentování zařízení WB-6 v roce 2006 shořelo. Vzápětí námořnictvo ukončilo podporu, a přesto Bussard prohlásil: „*Jsmo pravděpodobně jediná lidé na planetě Zemi, kteří vědí, jak uvolnit čistou energii fúze se ziskem!*“

V srpnu 2007 obnovilo námořnictvo podporu sumou 1,8 milionů \$. Byl sestaven nový tým EMC2, jehož členem se stal Richard Nebel a Jaeyoung Park, oba bývalí zaměstnanci LANL (Los Angeles National Laboratory). Když pak v říjnu Bussard ve věku 79 let zemřel na rakovinu buněk krevní plazmy, ujali se Nebel s Parkem vedení společnosti EMC2. V lednu 2008 zapálili první plazma ve WB-7. Na základě posudku velmi dobrých výsledků nezávislou komisí vedenou R. Hirschem bylo výsledkem obnovené podpory programu polywell v polovině roku zařízení WB-7. 1.

Ministerstvo obrany vyčlenilo pro EMC2 dva miliony a vrátilo se i námořnictvo s téměř osmi miliony. V listopadu 2010 zaznamenala WB-8 první plazma. V roce 2012 poskytlo námořnictvo dalších 5 milionů \$. V roce 2014 na WB-8 naměřili poprvé diamagnetický signál ve střední části komory.

Jako z jiného světa zní zpráva z listopadu 2012, kdy Trend News Agency oznámila, že Atomic Energy Organization of Iran uvolnila 8 milionů \$ na výzkum inerciálního elektrostatického udržení a asi polovina již byla utracena.

Profesor Jaeyoung Park 2. května 2016 na thajské Khon Kaen University prohlásil: „*Konečný vědecký důkaz správnosti principů technologie polywell očekávám v letech 2019–2020 a první generace komerčních fúzních reaktorů může být vyvinuta do roku 2030. To je přibližně o 30 let dříve než první komerční reaktor vládou podporovaného projektu International Thermonuclear Energy Reactor (ITER). Navíc reaktor polywell bude také o desítky miliard dolarů lacinější.*“

Názor odjinud

Ač vstřícná pole patří k základním konfiguracím magnetických nádob, tj. zkoumají se od padesátých let minulého století jak v bývalém Sovětském svazu, tak ve Spojených státech, nikdy se nezapojila do „hlavního proudu“. Na ztráty štěrbinami principiálně ve vstřícné geometrii přítomnými upozorňoval Lavrentěva jeho konzultant, M. A. Leontovič. Zatímco Lavrentěv se snažil ztráty redukovat elektrostatickým polem aplikovaným v oblasti štěrbin, R. Bussard uzavřel rozptylové pole vstřícných cívek do vakuové komory. Pod vedením profesora Jaeyounga Parka kladný peer review vedený Robertem Hirschem polil polywell živou vodou, tedy miliony dolarů od námořnictva USA. EMC2 patří vedle společnosti Tokamak Energy k důvěryhodnějším institucím.

Milan Řípa

General Fusion (Linus)

Řízení: Michel Laberge (zakladatel a vedoucí) a Nathan Gilliland (výkonný ředitel)

Podpora: General Fusion obdržela během minulých let celkem 55 milionů \$ jak ze státních, tak ze soukromých zdrojů. Kanada investovala 10 milionů \$ a 27 milionů dorazilo ze strategického investičního fondu malajsijské vlády „Khazanah Nasional Berhad“ (Sic!). V březnu 2016 získala společnost dodatečných 12,75 milionu \$ od kanadské vlády. Mezi soukromými investory je například Chrysalix Venture Capital nebo investiční společnost Amazon se spoluzakladatelem Jeffem Bezosem; 80 % investic pochází z privátních zdrojů.

Ústředí: Burnaby, Britská Kolumbie, Kanada

Založeno: 2002; M. Laberge

Princip (reakce DT)

General Fusion studuje fúzi magnetizovaného terčíku (Magnetised Target Fusion, MTF). Tento koncept je hybridem magnetického (mnohem rychlejší/kratší) a inerciálního (mnohem pomalejší/delší) udržení plazmatu. General Fusion používá kulovou nádobu o průměru ~3 metrů a vychází z konceptu LINUS, což byl návrh fúzní elektrárny v US Naval Research Laboratory sedmdesátých let minulého století. V kulové nádobě vstříknou dvě trysky proti sobě dva plazmoidy/sféromaky do trychtýře vytvořeného vírem rotující směsi lithia a olova. Zvnějšku se do vrstvy tekuté kovové směsi opřou písty poháněné výbušninou, které vystřelí současně a vytvoří tak rázovou vlnu v kovové kapalině, která rychlostí 50 m/s spěchá do středu komory. Čelo vlny roztaveného kovu stlačuje plazmoid vytvořený spojením obou injektovaných plazmoidů až do termojaderných parametrů. Dnes v zařízení T4 pracuje 220 pístů o rychlosti 200 km/hod, ale připravuje se zařízení s větším počtem pístů.

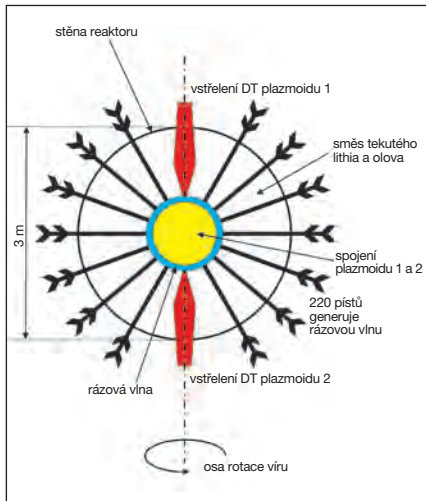
Elektrické proudy tekoucí plazmoidem generují magnetická pole. Plazma žije relativně dlouhou dobu (~500 mikrosekund). Nathan Gilliland z kanceláře ředitele říká: „Elektrický proud ve sféromaku je jako vzduchový vír v cigaretovém dýmu, který udržuje po nějakou dobu kouř ve tvaru prstýnku.“ Víry se ale postupně utlumí a prstýnek dýmu se rozplyne. Ve středu koule plazmatu fúze generuje neutrony, které se rozletí všemi směry, tedy i do roztavené směsi olova a lithia. Neutrony, které narazí na ocelovou stěnu nádoby, mají už tak málo energie, že stěnu poškodí minimálně. Horká směs olova a lithia je přečerpávána primárním chladicím okruhem skrze výměník tepla a posléze chladná pumpována zpět do reakční komory.

Pulzní režim považuje skupina General Fusion za výhodu, neboť druhý fúzní produkt – elektricky nabitě alfa částice – může v principu generovat elektřinu přímo, bez mezistupně parogenerátorů. Tedy laciněji a účinněji. General Fusion evidentně počítá s deuterio-tritiovou reakcí.

Příběh

Při rešerši pro návrh pohonu kosmických raket narazil Michel Laberge v Naval Research Laboratory ve Washingtonu, D. C., na projekt LINUS z roku 1970. LINUS se

pokoušel o tzv. fúzi s magnetizovaným terčičkem (magnetized target fusion). Cílem programu LINUS bylo stlačit váleček o průměru 26–28 cm, dlouhý 7 cm, z hliníku o síle 1–1,5 mm (liner) pomocí magnetického pole silného až 150 T (tesla – jednotka magnetické indukce). V roce 1976 byl navržen systém s tekutým lajnerem ze směsi lithia a olova. Své realizace se návrh dočkal za necelých třicet let. Program LINUS byl ukončen v roce 1980, ale Laberge si řekl, že LINUS je pro fúzní elektrárnu výborný nápad. Prohlásil: „*Oproti LINUSu dnes umíme rychlejší píсты, umíme dodat energii plazmoidům za dobu, která je kratší než jejich doba života!*“



Do trochtyře víru rotujícího tekutého kovu vstříknou svislé trysky magnetizovaná plazmata – plazmoidy ve tvaru sféromaku (obrázek nemá stejné měřítko pro jednotlivé části) (kresba: autor)

Laberge a jeho společníci postavili zařízení T4, které vypadá jako steampunková kulisa (mimočodem celosvětově uznávaným průkopníkem steampunku byl režisér K. Zeman s filmy *Vynález zkázy* či *Ukradená vzducholoď*). Kolem metr široké reakční komory začínali se 14 pneumatickými písty (v roce 2016 jich bylo 220 a cílem je číslo 400) (foto: ITER organization)



Laberge s bývalými kolegy z Creo investoval a s malým grantem kanadské vlády postavil stolní zařízení, které simulovalo účinek pístů elektrickými pulzy. Zařízení vyprodukovalo několik neutronů – „marketing neutrons“, jak je Laberge nazval, protože neutrony mohou být (a nemusí) důkazem fúzní reakce. V roce 2002 Laberge a jeho skupina založili společnost General Fusion, která má nyní 60 zaměstnanců.

Současné uspořádání fúze zatím nedosáhlo; nyní se zkouší kompresní systém. „*Testujeme utěsnění, čerpání, vytváření rázové vlny – hledáme vhodnou technologii,*“ říká Laberge.

Bude třeba mnohem větší verze současného uspořádání, s reakční komorou třikrát větší, se 400 písty. Ovšem to znamená novou úroveň podpory. V dubnu 2015 vypsala General Fusion „crowdsourcing“. Výkonná výpočetní technika umožňuje nejen kvalitnější zpracování obrovského množství naměřených dat, lepší plánování a navrhování nových zařízení, simulací a experimentů, ale také způsob řešení technických problémů, o jakém se průkopníkům fúze ani nesnilo. (Crowdsourcing je proces získání potřebné služby od velké skupiny lidí na základě zadání nebo výzvy na internetu; dobrovolníci mohou přispět nápady, časem, odbornými znalostmi, financemi atd. Crowdsourcing je také nazýván kolektivní mobilizací.)

General Fusion prostřednictvím služby InnoCentive oslovila svět techniky se žádostí o vyřešení tématu „Metoda utěsnění dna namáhaného opakujícími se dopady roztaveného kovu“. Z 350 000 registrací z 200 států vybrala General Fusion 60 uchazečů ze 17 států, aby nakonec oslovila Kirbyho Meachama z Clevelandu, inženýra toho času „na zkušene“ v Massachusetts Institute of Technology, MIT.

Fúze měla být zažehnuta v roce 2014. Nesplnění proklamace autoři omlouvají nedostatkem financí. Pokud prý seženou 20 milionů \$, tak fúzi uskuteční v roce 2020... V listopadu 2016 navštívil M. Laberge staveniště tokamaku ITER a na přednášce seznámil se svou ideou odborníky ITER organization.

Názor odjinud

Pokusy General Fusion jsou transparentní a jsou široce popularizovány skrze fúzní komunitu účastí na mezinárodních konferencích a publikováním článků v seriózních časopisech. Kolegové z General Fusion jsou v diskuzích zcela otevření. Jejich koncept stlačení sféromaku má vědecký základ a zdá se proveditelný. Nicméně představuje velkou výzvu. Například General Fusion potřebuje při urychlení a stlačování stabilní plazma; potřebuje vír velmi hladký, bez zvlnění. Také materiál použitý na písty musí odolat velmi náročným podmínkám. Práce General Fusion je vědecky velmi zajímavá a mohlo by být dobré, kdyby nějaká část činnosti General Fusion našla cestu k EUROfusion. Nicméně sám koncept musí překonat mnoho překážek. Jsem přesvědčen, že doba pro stavbu fungujícího reaktoru je mnohem delší než dnes General Fusion předpokládá.

Tony Donné, vedoucí divize výzkumu fúze v Dutch Institute for Fundamental Energy Research (DIFFER); v roce 2015 navštívil společnost General Fusion

Řízení: Eric Lerner (výkonný ředitel), Hamid Yousefi (Írán; ředitel pro řízení rizik)

Podpora: Laboratoř tryskových pohonů NASA (NASA's Jet Propulsion Laboratory) a dalších 60 sponzorů

Ústředí: Middlesex, New Jersey, USA

Založeno: 1994; E. Lerner

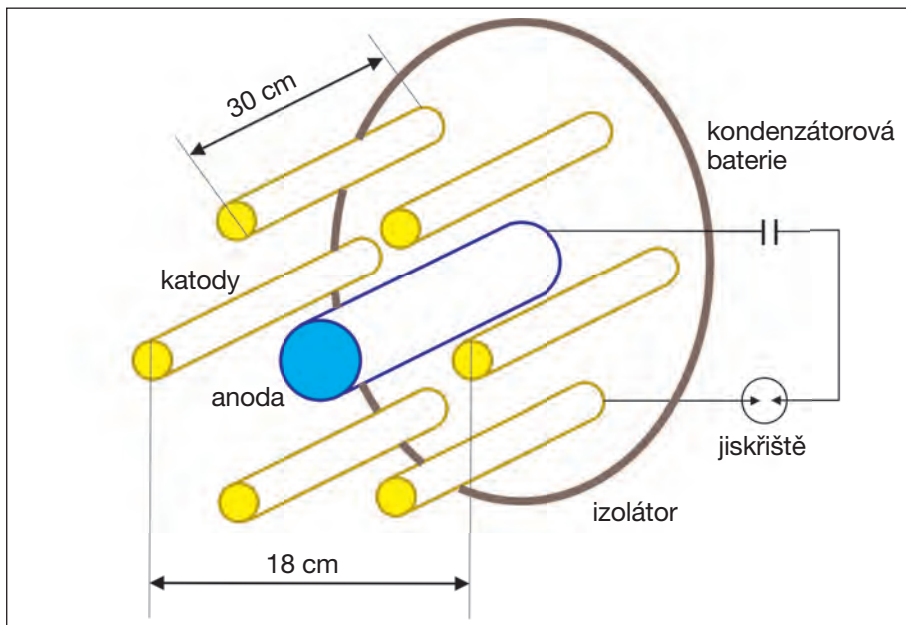


Schéma elektrodového systému zařízení Focus Fusion 1
(kresba: autor)

Princip (reakce p ^{11}B)

Cílem zařízení pinčového charakteru „dense plasma focus“ (DPF) je návrh reaktoru pro fúzi jader vodíku a boru. Srdcem experimentu jsou dvě koaxiální válcové elektrody. Vnější elektroda je soustava rovnoběžných tyčinek uspořádaných do kruhu o průměru 18 cm, celé zařízení je vloženo do nádoby naplněné zředěným plynem. Kondenzátorová baterie může dodat megaampér za miliontinu sekundy. Silný napěťový pulz mezi elektrodami zapálí výboj, který vytvoří prstencovou vrstvu plazmatu a ta unikne do nádoby. Magnetické pole $\approx 100\text{ T}$ plazma stlačí (pinčuje) do malého hustého klubička – plazmoidu.

Kolabující magnetické pole indukuje pole elektrické, které prožene svazek elektronů plazmatem, ohřeje ho na teplotu miliardy stupňů. V plazmoidu, který žije pouze 10 ns (10 miliardtin sekundy) by měla hustota a teplota kulového plazmatu stačit na to, aby se zapálila proton-borová fúze.

Příběh

Eric Lerner je úspěšným autorem písčím o vědě. V roce 1991 vydal kontroverzní knihu *The Big Bang Never Happened* [Velký třesk nikdy nebyl], která popisuje vesmír ovládaný ne gravitací a kvantovou mechanikou, nýbrž fyzikou plazmatu – modelem, který navrhl v šedesátých letech Hannes Alfvén a který většina kosmologů považuje za nemožný.

Eric Lerner zahájil výzkum fúzním zařízením, které je verzí hustého plazmového fokusu DPF objeveného v padesátých letech v Rusku, kde N. V. Filipov na plazmovém fokusu v moskevském LIPAN registroval 4. července 1952 „termojaderné“ neutrony, L. A. Arcimovičem odhalené jako falešné. Po sedmi letech a po zaplacení 300 000 \$ NASA podporu zastavila a Lerner začal hledat soukromé investory.

Po dalších sedmi letech získal 1,2 milionu \$, dost na to, aby postavil svou vlastní budovu v Middlesexu v New Jersey a nazval ji Lawrenceville Plasma Physics (LPP). Že by inspirace LLPL (Lawrence Livermore Plasma Laboratory) – sídlem největšího laserového systému na světě National Ignition Facility, NIF?

Existence výzkumu typu „z ruky do úst“ (*hand-to-mouth*) pokračovala: během pěti let Lerner navýšil konto dalšími 2 miliony \$ od 60 různých investorů, aby mohl pokračovat v práci. „*Ve srovnání s jinými snahami (privátní fúze) jsme byli nejlépe technologicky vybaveni, ale s penězi jsme na tom byli nejhůř,*“ říká Lerner. Faktem je, že Lerner doslova počítal, na kolik výstřelů mu zbývají peníze.

„*Zařízení Focus Fusion-1, FF-1, je ve fázi pokročilého výzkumu,*“ prohlásil prezident LPP a vědecký ředitel Eric Lerner. Lerner oznámil, že experiment dosáhl nezbytné teploty 400 keV, ale doposud zklamal, co se týče potřebné hustoty částic. Problém spočívá ve znečištění plazmatu odpařenou mědí z elektrod. V době psaní článku LPP údajně obdrželo nový soubor wolframových elektrod a dokončilo kampaň crowdsourcing, aby mohlo zaplatit 200 000 \$. „*Jsem přesvědčen, že wolframové elektrody radikálně sníží množství nečistot a zvýší hustotu plazmatu 100x,*“ prohlásil Lerner. Nejen wolframová katoda, ale také berylium z Kazachstánu na anodě mělo zmenšit energetické ztráty způsobené vyžarováním nečistot.

LPP bude zkoušet nové elektrody až do konce tohoto roku a pak vymění deuteriové palivo za směs vodíku a boru 11. Lerner věřil, že pokud bude moci navýšit finanční polštář o další 1 milion \$, předvede čistý zisk energie v polovině roku 2015.

Mezi popisovanými alternativami je Focus Fusion-1 bezkonkurenčně nejmenší, a tudíž nejlacinější. Zatímco zařízení typu tokamak se nestabilit bojí jako čert kříže, FF-1 proti nestabilitám nic nepodniká, ale využívá je ke generaci co nejeftivnějšího plazmoidu. Z dosavadních měření plyne, po přepočítání vstupní energie na odpovídající parametr laserového systému NIF, že FF-1 poskytuje čtyřikrát více neutronů – svědků fúzní reakce – než NIF. Pokud by se výsledky FF-1 s palivem DD přepočítaly na palivo NIF, tedy na DT, pak by FF-1 dalo neutronů dokonce šedesátkrát více.



Elektrodový systém zařízení Focus Fusion 1
Erica Lerner
(foto: Lawrenceville Plasma Physics)

Názor odjinud

E. Lerner rád provokuje. Moje pochybnosti se týkají ve stručnosti: zajištění symetrie elektrodového systému, odolnosti systému vůči tepelnému namáhání, hypotézy kvantového magnetizmu a dosažitelnosti zápalné teploty směsi $p^{11}B$.

Ch. J. Armentrout, fyzik, komentátor The Last Tech Age, Anne Arbor

Focus Fusion-1 je zařízení, které produkuje neutrony i při velmi malých vstupních energiích (0,1 J). Některé studie ukazují, že neutronový výtěžek je úměrný 4. mocnině výbojového proudu - a to až do velikosti cca 1 MA; nad tuto hodnotu se neutronový výtěžek začíná saturovat (je úměrný jen druhé mocnině proudu nebo ještě méně). Existuje více názorů na příčinu této saturace, a tedy i více přístupů, jak tuto saturaci odstranit. Jedním z nadšenců, kteří se o to pokoušejí, je i Eric Lerner: v roce 2007 vyložil svůj ideový záměr, v roce 2008 dostal financování a v roce 2011 publikoval první experimentální výstřely s neutronovým výtěžkem větším, než je historický trend. V roce 2012 dosáhl rekordní teploty v plazma fokusu a v roce 2016 oznámil fúzní výtěžek 0,25 J. Na další vývoj si musíme počkat.

*Karel Kolářček, bývalý dlouholetý vedoucí Oddělení impulzního plazmatu
Ústavu fyziky plazmatu AV ČR*

Tri Alpha Energy

Řízení: Dr. Dale A. Prouty (výkonný ředitel), Dr. Michl W. Binderbauer (technický ředitel), Dr. Toshiki Tajima (vědecký ředitel)

Podpora: Tri Alpha Energy (TAE) je největší soukromá společnost zabývající se fúzí financovaná v režimu investorů včetně New Enterprise Associates, Venrock (společnost patřící rodině Rockefellerů), Wellcome Trust, Art Samberg, Buchanan Investments, společnosti rizikového kapitálu Vulcan Capital Paula Allena, Goldmana Sachse a dalších. Příspěvky dosáhly do současné doby téměř 500 milionů \$. Dále jsou tu příznivci Arno Allan Penzias (držitel Nobelovy ceny), Buzz Aldrin (astronaut).

Ústředí: Foothill Ranch, Kalifornie, USA

Založeno: 1998; Norman Rostoker († 2014), Hendrik Monkhorst, Michl W. Binderbauer

Princip (reakce p ¹¹B)

Společnost Tri Alpha Energy (TAE) hodlá pracovat se směsí vodíku a boru. Tato aneutronická reakce produkuje tři alfa částice – odtud název společnosti „Tri Alpha“. Podle TAE je na Zemi víc než dostatečné množství boru, zásoby jsou odhadované na 100 000 let.

Směs vodíku a boru potřebuje k hoření teplotu 3 miliardy °C. Společnost TAE používá konfiguraci s reverzním magnetickým polem FRC v kombinaci se vstříkem intenzivního svazku neutrálních částic (Neutral Beam Injection, NBI), aby vytvořila dobře udržené, horké plazma.

Příběh

„Tri Alpha Energy je singularita v historii fúze, neboť to je poprvé, kdy takto obrovská suma peněz (stovky milionů dolarů) byla investována privátním sektorem,“ říká Stewart Prager, ředitel Princeton Plasma Physics Laboratory, PPPL, v New Jersey, patřící k předním ústavům ve světě zabývajícím se výzkumem řízené fúze za státní peníze.

Společnost je zahalena tajemstvím. Nemá stránky ani žádná veřejná prohlášení. Podrobnosti, které jsou o její práci známy, pochází z náhodných článků v časopisech nebo nečekaných návštěv jejích členů na konferencích. Vedoucí společnosti se vyhýbali rozhovorům, což vysvětlovali tak, že v tento okamžik nepotřebují pro svoje úsilí žádnou publicitu.

Tri Alpha je duchovní dítě kanadského fyzika Normana Rostokera, který pracoval v Cornell University a ve společnosti General Atomics. V srpnu 2014 mu bylo 89 let (zemřel téhož roku v prosinci). Myšlenka vznikla v roce 1977, když dva kolegové publikovali v *Science* článek popisující „Colliding Beam Fusion Reactor“ (*Science* 21, listopad 1997, s. 1419). Následujícího roku pak založili Tri Alpha Energy, TAE, ve Foothill Ranch v Kalifornii.

Rostokerův reaktor se srážejícími se plazmoidy pracuje tak, že vytvoří dva kompaktní plazmové toroidy – sféromaky/FRC – a pak je urychlí na nadzvuko-

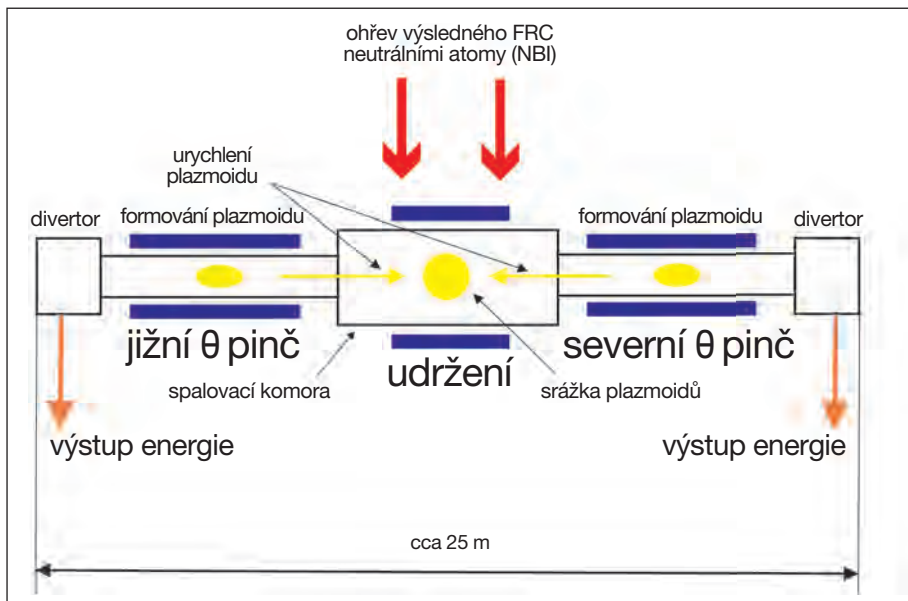
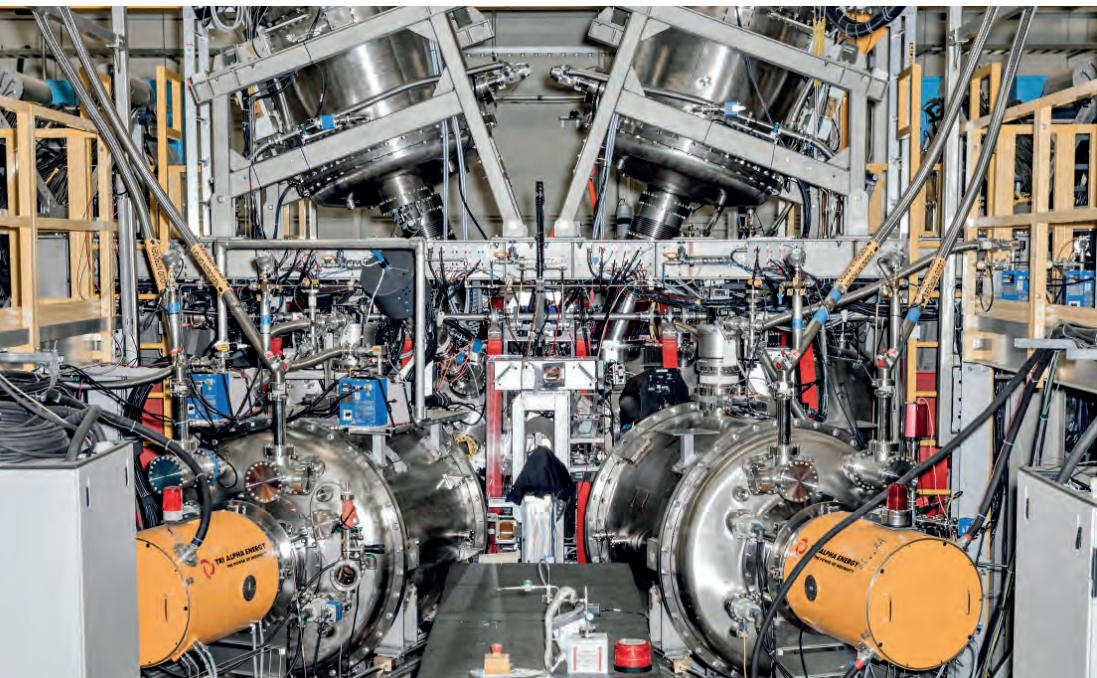


Schéma zařízení C-2U společnosti Tri Alpha Energy. Není zcela jasné, co se sráží: sféromaky, či FRC? Výsledek je určitě FRC (kresba: autor)

Zařízení C-2U společnosti Tri Alpha Energy. V popředí generátory svazků neutrálních částic (foto: Tri Alpha Energy)



vou rychlost 250 km/s a nechá čelně srazit. Plazmoidy se spojí do konfigurace FRC, konvertují svou kinetickou energii na teplo a vznikne konfigurace reverzního magnetického pole. Plasma dále přihřeje svazky neutrálních částic. V TAE vyvinuli metodu, jak prodloužit dobu života FRC až na 5 ms při teplotě 10 milionů stupňů. Na rozdíl od rivalů z Helion Energy či General Fusion, ve společnosti TAE zařízení nestlačuje plazma, ale místo toho se spoléhá na vysokou teplotu získanou ohřevem svazky neutrální NBI a dlouhou dobu udržení vedoucí k jiskrové fúzi (*spark fusion*).

V srpnu 2015 společnost ohlásila stálý ustálený výkon plazmatu trvající až 11 ms na zařízení C-2U o rozměrech používaných v národních laboratořích. Dalším krokem je větší zařízení a instalace výkonnějších svazků neutrálních částic pro ohřev plazmatu a dosažení výkonu při vyšších teplotách. TAE nyní staví nový stroj zvaný C-2 W a očekává, že během tří let zvládne další milník.

Společnost má nyní více než 150 zaměstnanců a peníze plynou z Goldman Sachs, od spoluzakladatele Microsoftu Paula Allena a dalších odvážných kapitalistů. Tri Alpha má také silné vazby na ruské vědecké pracovníky a prominentní ruské politiky a obchodník Anatolij Čubajs je členem představenstva. O mnohých nemalých podporách Tri Alpha Energy se říká, že pocházejí od ruských oligarchů.

Glen Wurden, vedoucí skupiny plazmatu v Plasma Physics Group v Los Alamos National Laboratory (LANL) v Novém Mexiku, který ústav navštívil, o zařízení dělky tenisového kurtu prohlásil: „Je to nádherná mašina!“

Názor odjinud

Koncept Tri Alpha vyhlíží přitažlivě: použití proton-boru (p-B) jako paliva neprodukuje žádné neutrony a lineární zařízení je vhodné pro jednoduché zvětšení dokonce i na rozměry reaktoru. Také nedávno oznámený zlom, který udržuje plazma asi 10 ms, je velmi slibný. Musíme ale naše nadšení poněkud tlumit, poněvadž dosažená teplota (~1 keV) a doba udržení je několik řádů od požadovaných hodnot pro produkci čisté energie. Navíc, je třeba si uvědomit, že přechod od paliva deuterium-tritium (DT) k palivu p-B znamená snížení fúzního výkonu více než 100x. Naskytá se otázka, proč nejprve nezkusit koncept na palivo D-T? Konečnou výzvou je nutnost vyrobit vysokoenergetickou, netepelnou populaci iontů energeticky přijatelným způsobem. Tri Alpha si brzy uvědomí, že se s těmito problémy bude muset vypořádat. Těším se, že se jim to podaří.

Roger Jaspers, vedoucí FuseNet, koordinátor Fusion Master Programme na University of Technology v Eindhovenu v Nizozemsku a zakladatel Fusion Academy

Skunk Works Lockheed Martin

Řízení: Charles Chase (vedoucí), Thomas J. McGuire (hlavní konstruktér a vedoucí technické skupiny)

Podpora: Lockheed Martin

Ústředí: Palmdale, Kalifornie

Založeno: Revolutionary Technology Programs – projekt fúzního reaktoru s vysokým beta, CFR, 2014; samotná skupina Skunk Works pracující na jiných projektech 1943

Princip (reakce DT)

Základní verzi magnetické nádoby CFR společnosti Lockheed Martin tvoří kombinace vstřicných a klasických zrcadel, tvořená dvěma vnitřními suprařivými cívkami a sedmi vnějšími cívkami (cívkou uvnitř a vně vakuové nádoby). Vnitřními cívkami teče proud v opačném směru než v cívkách vnějších, jinými slovy jsou tu tři prstencové a dvě osové štěrbinové – tři vstřicná a dvě klasická zrcadla (viz obr.). Deuterium-tritiové plazma bude ohříváno mikrovlnami a dvěma svazky neutrálních atomů. Plánované zvětšení objemu plazmatu vyřeší dodání dalších prstencových štěrbin. Ve vstřicném magnetickém

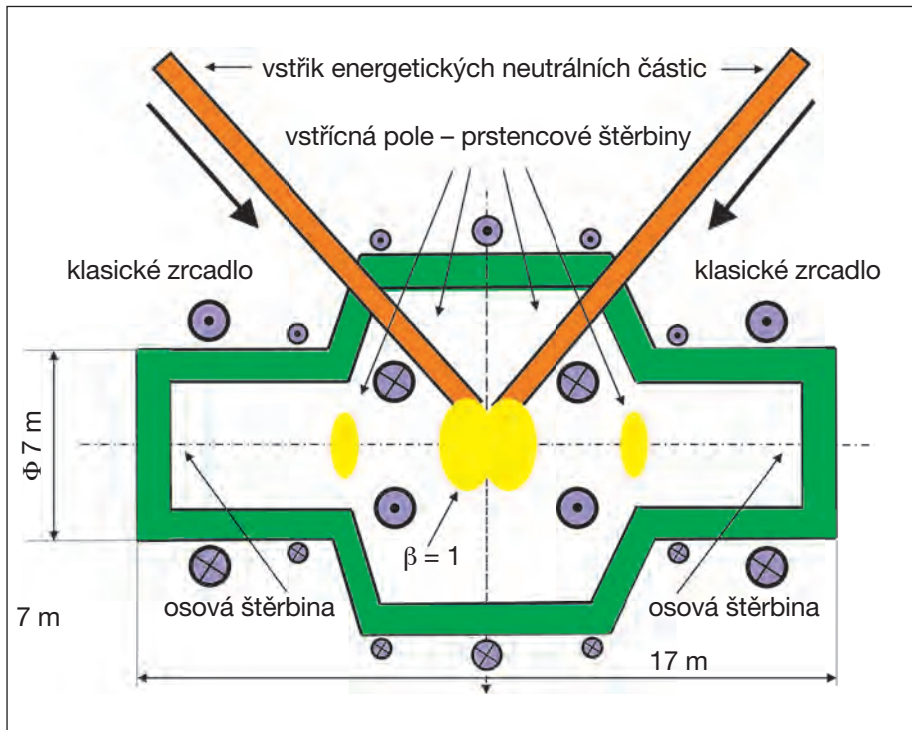


Schéma experimentálního zařízení CFR T4: modře magnetické cívkové, žluté magnetické jámy (minima B) vyplněné plazmatem. Orientace elektrického proudu obou vnitřních cívek je totožná, zatímco ve vnějších cívkách je opačná. Krajní cívkové tvoří klasické zrcadlo. Zelené vakuová komora a červené trysky energetických neutrálních částic (kresba: autor)

poli jednak intenzita roste ve směru od podélné osy nádoby k jejím stěnám (minimum B), jednak siločáry jsou vyduťté do plazmatu. Taková konfigurace je MHD stabilní, ovšem osově a prstencově štěrbiny způsobují ztráty plazmatu. Ve středu nádoby je magnetické pole nulové, čímž naopak klesají ztráty energie cyklotronním vyzařováním. Podle představ autorů by tlak magnetického pole rostoucí směrem ke stěnám nádoby měl určit polohu hranice plazmatu podle jeho kinetického tlaku. Systém je tak řízený zpětnovazebním mechanismem, tj. čím víc se plazma pohybuje od středu nádoby, tím silnější magnetické pole je tlačí zpět. Ztráty plazmatu podél osy částečně zmenšují klasická magnetická zrcadla na obou koncích a ztráty radiální částečně zmenšuje recirkulace známá z konceptu polywell. U CFR se očekává, že beta se na hranici plazmatu bude rovnat jedné.

Příběh

V umírněném utajení pracovala skupina Skunk Works společnosti Lockheed Martin, což je obecný název pro skupinu uvnitř větší firmy, která požívá privilegia vysokého stupně autonomie netísňená byrokratickými hranicemi, pracující obvykle na vysoce moderním či tajném projektu, kterým bylo v šedesátých letech v Lockheed Martin například nesestřelitelné špionážní letadlo U2, které Rusové sestřelili (v rámci májových oslav?) 1. května 1960 nad Sverdlovskem.

Ve společnosti Lockheed Martin nyní skupina Skunk Works pracuje na konceptu uvolnění jaderné energie pomocí fúze.

Lockheed věří, že jeho kompaktní škálovatelný koncept Compact Fusion Reactor (CFR) bude vhodný pro různá využití, počínaje pohonem meziplanetárních či námořních lodí a příměstskými elektrárnami konče. Mohl by dokonce obnovit koncept velkého jaderného letadla, které nikdy nebude muset tankovat palivo – tato myšlenka byla před padesáti lety kvůli složitosti opuštěna.

Společnost uvolnila omezené informace o CFR T4 v roce 2013. Tvrzení, že do deseti let Lockheed Martin představí 100MW fúzní zdroj, nejlépe transportovatelný na podvozku za tahačem, se dobře poslouchá, ale již hůře uskutečňuje. Lockheed Martin hledá dotace a navíc hovoří o potřebě dalších výzkumníků.

Thomas McGuire, vědecký vedoucí projektu, který obhájil titul PhD na Massachusetts Institute of Technology, MIT, studoval možnosti dopravy na Mars. Zaujala ho idea fúzního pohonu raket. Zvolil koncept CFR, který místo spoutání plazmatu do toroidálního tvaru používá unikátní lineární kombinaci vstříčných a zrcadlových polí. *„Zásadní rozdíl od tokamaku spočívá v tom, že při stejných rozměrech CFR bude generovat desetkrát (Sic!) větší výkon. To na druhou stranu znamená, že pro stejný výstupní výkon může být CFR 10× menší,“* vysvětluje McGuire.

Suma sumárum, McGuire o projektu CFR říká, že „vybírám ty nejlepší z několika starších návrhů“. Skupina zdůrazňuje, že projekt je v počáteční fázi a stojí před ním mnoho klíčových rozhodnutí, než bude postaven spolehlivý stroj. Cílová verze s pulzem 10 s má následovat po pěti generacích trvajících 5 let. Cílem v roce 2019 bude prototyp reaktoru ověřující fyziku konceptu. První reaktory budou navrženy pro výkon 100 MW a jejich nákladním autem transportovatelné rozměry budou průměrně 7 × 13 metrů. Koncept počítá s existující energetickou infrastrukturou.



Zařízení CFR T4 - první fáze vývoje kompaktního fúzního reaktoru, CFR
(foto: Lockheed Martin)

Názor odjinud

Jako kluk jsem shromažďoval obrázky letadel do lístkovnice časopisu *Křídla vlasti*. První dopravní letadlo bylo Tupolev TU-104 a druhé Lockheed Electra. Po 55 letech se setkávám s firmou Lockheed ve zcela jiné souvislosti. Lockheed od čtyřicátých let minulého století vyrábí vojenská letadla - a ne leďajaká. Namátkou Black Bird SR-71, ER-2, ale také špiónážní letadlo U-2... a najednou prostřednictvím skupiny Skunk Works financuje stavbu kompaktního fúzního reaktoru CFR v projektu Revolutionary Technology Programs. Jejich zařízení mi připomíná pohádku *Jak si pejsek s kočičkou dělali k svátku dort*: vstřícná pole (Lavrentěv) + klasické zrcadlo (Post, Budker) + supravodivé cívky (tokamak T-7) + recirkulace nabitých částic (Bussard) + energetické svazky částic (tokamak Ormak) + cívky vně i uvnitř vakuové komory (Bussard, Coppi)... Klasická zrcadla byla před mnoha lety opuštěna, neboť ztráty otevřenými konci se ukázaly být nepřekonatelnou překážkou. Proklamace Thomase J. McGuira: „...vzali jsme si ze známých projektů to nejlepší, za pět let budeme mít fúzní reaktor s režimem zapálení o výkonu 100 MW, transportovatelný na návěsu, připojitelný do stávající elektrické sítě...“ jen svědčí, zdá se, o poněkud odvážných představách týmu o řízení termojaderné fúzi. Rád bych se mýlil, ale nepřesvědčili mě. Taková maličkost: na žádném ze schémat CFR jsem nenašel vyznačenou orientaci elektrického proudu v cívkách, a to ani v US Patent 20140301519, chránícím nápad CFR à la Lockheed Martin, i když použití vstřícných polí evidentně opačnou orientaci proudu v sousedních cívkách vyžaduje. Další obrázek CFR, který se často objevuje v prezentacích Lockheed, má zaměněné označení cívek a plazmatu.

Milan Řípa

Tokamak energy (solution)

Řízení: Dr. David Kingham (výkonný ředitel), Dr. Mikhail Gryaznevich (vědecký ředitel), Paul Noonan (ředitel výzkumu a vývoje), Dr. Melanie Windridgeová (obchodní a patentová vedoucí)

Místo: Milton Park, Oxfordshire

Podpora: Do Tokamak Solutions investovali Sir Martin a Lady Audrey Woodovi prostřednictvím Rainbow Seed Fund, Oxford Instruments plc., Institution of Mechanical Engineers a další privátní investoři včetně členů Oxford Investment Opportunity Network.

Založeno: 2010

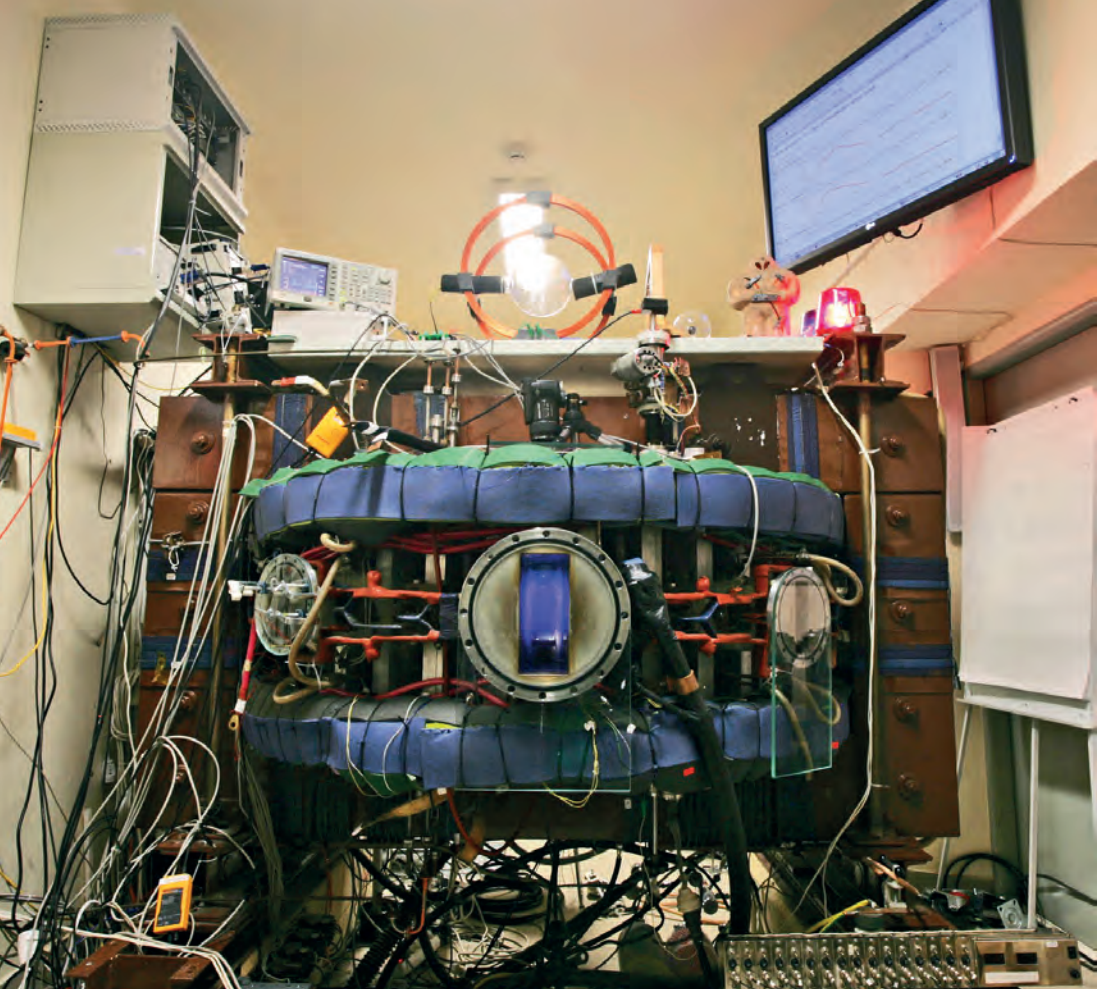
Princip

Bylo zjištěno, že druh tokamaku, který se vyznačuje mimořádně malým poměrem vedlejšího a hlavního poloměru (*aspect ratio*), tzv. kulový tokamak, oproti standardním tokamakům má stabilnější plazma, což vede k vyššímu tlaku udržovaného plazmatu při stejném magnetickém poli (větším beta), a tím i k vyššímu fúznímu výkonu. Kulové tokamakky jsou tedy ve srovnání s klasickými tokamakky mnohem účinnější. Teoretické výpočty ukazují, že kulový tokamak používající silné magnetické pole vyrobené vysokoteplotními supravodiči (High Temperature Superconductors, HTS), by mohl být podstatně menší než velké tokamakky. Například elektrárna s kompaktním ST by měla objem reaktoru až 100× menší než s tokamakem ITER, v současné době stavěným ve Francii za cenu 15 miliard €. Jinými slovy by byl reaktor přibližně velikosti obyčejného pokoje, spíše než hangáru, jak je tomu nyní. Tento předpoklad nabízí významné komerční možnosti, a proto má Tokamak Energy v úmyslu zaměřit svoje úsilí tímto směrem a hledá další finance na vývoj kompaktního kulového tokamaku – zdroje fúzní energie, který by předvedl čistý energetický zisk.

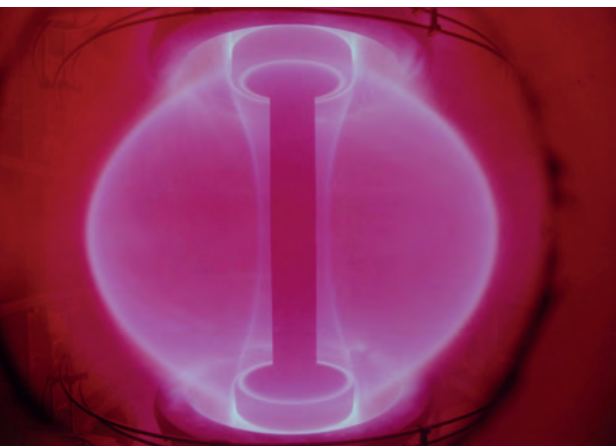
Příběh

Společnost Tokamak Energy byla původně založena v roce 2009 pod názvem Tokamak Solution, aby navrhovala a vyvíjela malé kulové tokamakky (Spherical Tokamaks) a kompaktní fúzní reaktory pro celou řadu použití. Od roku 2012 našla tato strategie nový cíl – stavbu pilotního zařízení, které by překročilo fúzní energetický zlom/vyrovnání (*fusion energy break-even*). Tokamak Energy se odštěpil od Culham Science Centre, což je světové středisko bádání v oblasti magnetického fúzního výzkumu a domov největšího tokamaku na světě, tokamaku JET. Tokamak Energy těží z toho, že se nachází uprostřed Culham campus.

Fúze se pomalu, ale jistě stává problémem inženýrským, spíše než fyzikálním. Řízená fúze (v řádu 10 MW) byla na krátkou dobu poprvé zapálena v devadesátých letech na dvou tokamacích: na zmíněném evropském tokamaku JET a americkém tokamaku TFTR, který je již demontovaný. Nyní je ale třeba postavit stroj schopný trvale generovat čistý energetický zisk. Je třeba navrhnout stroj, který lze postavit, který lze ekonomicky provozovat a později bezpečně zlikvidovat.



Tokamak Golem na FJFI ČVUT
v Praze zkušel HTS pro ST40 pro
Tokamak Energy
(archiv autora)



Výboj/plazma v kulovém tokamaku
Start, Culham
(foto: Culham Science Center)

Tokamak Energy chce vyřešit popsany problém v několika inženýrských etapách:

1. postavit malý prototyp tokamaku pro předvedení konceptu;
2. postavit tokamak se všemi magnety navinutými z vysokoteplotních supravodičů (dokončeno v roce 2015);
3. 2017 – 15 milionů stupňů (teplota jádra Slunce);
4. dosáhnout fúzní teploty v kompaktním tokamaku;
5. 2020–2021 – dosáhnout energetického vyrovnání (vědeckého zlomu, break-even) – tj. s takovým výstupním výkonem, jaký je vkládán do udržení fúzních reakcí;
6. 2025 – poprvé vyrobit elektřinu;
7. 2030 – poslat elektřinu do sítě.

Od toho okamžiku je možné pokračovat ve stavbě spolehlivé, ekonomické fúzní elektrárny. Je to sama o sobě inženýrská výzva – uzavřít neuvěřitelně nepřátelské prostředí do zařízení o navržené době životnosti trvající desetiletí.

Dnes se Tokamak Energy nachází v bodě 3. V budově v Milton Park v Oxfordshiru je postaven nový tokamak, ST40. Měl by ukázat, zda jsou v malém tokamaku dosažitelné fúzní teploty. Bod 4 (energetické vyrovnání) by pak byl okamžikem připomínajícím start letadla bratrů Wrightových (*Wright Brothers Moment*) – typickým důležitým technologickým milníkem. V roce 2017 bylo zapáleno první plazma. Tokamak ST40 nemá supravodiče, ale chce dosáhnout fúze v tokamaku mnohem menším než je JET.

Přístup Tokamak Energy se liší od přístupu podporovaného z veřejných peněz: *„Pokračujeme v generování výsledků, a tak ve vytváření účinné šroubovice – pokud splníme cíl, pak dostaneme více peněz, abychom dosáhli dalšího cíle – na šroubovici o patro výše.“*

Program Tokamak Energy sleduje poradní sbor složený z významných odborníků a vedený Lordem Huntem z Chestertonu (FRS; Oxford Instrument, University Oxford, Imperial College a Committee on Radioactive Waste Management).

Názor odjinud

Je mi velmi sympatické, že se to na TE snaží vzít za konec malých tokamaků a jít tímto způsobem proti současnému ITER mainstreamu a proti všem realistickým odhadům o průchodnosti technologie řízené fúzní reakce v pozemských podmínkách. Kdyby se to podařilo, tak by takovéto decentralizované řešení bylo pro světovou produkci energie asi nejideálnější.

Vojtěch Svoboda, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská,
ČVUT v Praze



Dennis Whyte a Brandon Sorbom třímají ekvivalentní vodiče elektrického proudu – tlustý z mědi a tenký z nového supravodiče REBCO (foto: MIT)

Plasma Science and Fusion Center, Massachusetts Institute of Technology, MIT

Řízení: Dennis Whyte

Podpora: Ministerstvo energetiky a Národní nadace pro vědu (National Science Foundation)

Založeno: (1970) 2015; D. Whyte

Princip (Reakce DT)

Je známo, že ztráty energie plazmatu v tokamaku lze snížit buď zvětšováním objemu, kdy ztráty klesají s druhou mocninou lineárního rozměru, nebo použít silnější magnetické pole, kdy naopak výkon reaktoru roste se čtvrtou mocninou intenzity magnetického pole. Velké nové tokamaky generují magnetické pole výlučně supravodivými magnety.

MIT se opírá o razantní skok ve vývoji supravodičů, které chce využít v navrhovaném tokamaku. Výkon magnetů vychází z druhé generace supravodičů vyrobených ze vzácné zeminy z baryum-měděného oxidu. Nazývá se REBCO (*Rare Earth Baryum Copper Oxide*) a může fungovat při vyšších teplotách a intenzitách magnetického pole než většina běžných supravodičů. Ve srovnání s ITER projektovaný „cenově dostupný, robustní, kompaktní“ tokamak ARC (*Affordable Robust Compact*) téměř zdvojnásobuje intenzitu magnetického pole, od špičkové hodnoty ITER 13 T k magnetickému poli ARC 23 T (!).

Příběh

MIT měl k tokamakům s mimořádně silnými magnetickými poli blízko již v minulosti. Počátek můžeme hledat ve společnosti Inesco pánů R. Bussarda a B. Coppiho, kteří uvažovali o Riggatronu, jehož cívky by byly umístěny ve vakuové komoře. Bruno Coppi po rozpadu Inesca získal profesuru v MIT a postavil řadu tokamaků Alcator, z nichž Alcator C-Mod měl nejsilnější tokamakové magnetické pole vůbec. Jednu chvíli Coppi koketoval s ruským Troitskem ohledně stavby svého snu – tokamaku Ignitor. Premiér Silvio Berlusconi tehdy dokonce podepsal dohodu s prezidentem Vladimírem Putinem. Není tedy divu, že se idea dalšího navýšení intenzity magnetického pole tokamaku objevila právě na půdě MIT.

„Existuje jistá setrvačnost ohledně magnetického přístupu k fúzním reaktorům a odpovídající technologii,“ říká Dennis Whyte, „ale nová supravodivá technologie za poslední tři čtyři roky učinila doslova skok kupředu. Dokonce se od té doby, co jsme odstartovali projekt, možnosti supravodivé technologie dále zlepšily.“

„*Návrh našeho nového tokamaku ARC,*“ pokračuje nyní Whyte, „*je podobný běžnému tokamaku toroidálního tvaru – mnohem podobnější ve srovnání se současnou generací prstencových plazmat kulových tokamaků NSTX v Princetonu, N. J. či ST25 v Milton Park ve Spojeném království.*“

S hlavním poloměrem 3,3 m a vedlejším 1,1 m je ARC na polovině rozměrů reaktoru ITER, přičemž plánuje stejný fúzní výkon 500 MW.

ARC začal nejprve jako klasický projekt MIT. Nyní ale Plasma Science and Fusion Center hledá partnery, aby návrh, který je zatím na papíře, oživil. Whyte si

však pochvaluje: „S novými vylepšeními neustále přichází studenti. Ať už to jsou vysokoteplotní slitiny, modulární 3D-tisknuté návrhy středu zařízení či chytřejší chladičí žebra, která by mohla zvýšit chladičí kapacitu dvakrát. Je to úžasná doba pro inženýry.“

Názor odjinud

Bude se supravodičivá slitina Nb₃Sn v cívkách tokamaku ITER měnit za výkonnější supravodič REBCO?

Milan Řípa

Došlo po uzávěrce

Britský milionář Richard Dinan založil společnost Applied Fusion Systems. Hodlá při využití posledních technologických novinek postavit dva kulové tokamaky o málo větší než culhamský MAST, který je jeho vzorem. Supravodiče REBCO, výkonnější divertor, 3D obrábění. Především chce porozumět plazmatu. Varianty A a B tokamaků STAR (Small Toroidal Atomic Reactor) směřují k elektrickému výkonu 100 MW.

Poděkování: Děkuji kolegům Mgr. Janu Horáčkovi, Dr ès sc., za konzultace, RNDr Karlu Koláčkovi, CSc., a Ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc., za příspěvky Názor odjinud.

COMPASS-U

COMPASS-U bude zařízení se silným magnetickým polem s relevantní geometrií plazmatu, která v evropském fúzním programu chybí (a po ukončení činnosti amerického tokamaku Alcator C-MOD chybí i ve světovém programu). Účelem projektu je rozšířit prostor činnosti tokamaku COMPASS, zvýšit jeho výkon a zaplnit některé zajímavé mezery ve fyzice vzájemného působení plazmatu a stěny vakuové komory (Plasma Exhaust Physics, PEX). Modernizace si podrží výhodu středně velikých zařízení v jejich pružnosti při škálování směrem k tokamakům ITER a DEMO. Začátek činnosti se plánuje na konec roku 2021. Při experimentech na tokamaku COMPASS Upgrade se očekává široká účast evropských a mezinárodních partnerů.

Návrh tokamaku COMPASS-U nabízí široký a v mnoha ohledech jedinečný rozsah parametrů a vysokou pružnost činnosti:

- geometrii relevantní k ITER a DEMO,
- silné magnetické pole (5 T), činnost při veliké elektronové hustotě ($\sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$),
- pokročilou konfiguraci plazmatu (dvojitá nula, sněhová vločka),
- uzavřený a dobře diagnostikovatelný divertor s vysokou hustotou,
- činnost s horkou stěnou ($\sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$),
- velký poměr PB/R (PB/qAR ratio),
- velký tok výkonu v divertoru ($\lambda_q \sim 1 \text{ mm}$),
- možnost studia fyziky pokročilých módů (QH-mode, I-mode, EDA-mode atd.),
- velkou schopnost řešit klíčové výzvy v oblasti fyziky vzájemného působení plazmatu a stěny vakuové komory (Plasma Exhaust Physics).

Základní rozměry a parametry:

R = 0,84 m

a = 0,28 m

BT = 5 T

I_p = 2 MA

PNBI = 4–5 MW

PECRH = 4 MW (170 GHz)

triangularita až 0,6

objem plazmatu $\sim 2 \text{ m}^3$

doba výboje 1–5 s

$\langle T_e \rangle \sim \langle T_i \rangle \sim 2,5 \text{ keV}$ při veliké hustotě

nG $\sim 8 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$

fungování při vysokých teplotách ($\sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$).

„Důležitou věcí v životě není vítězství, ale zápas, základem není to, že se zvítězilo, ale že se bojovalo dobře.“

Pierre de Coubertin

V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:

Jan Vít: **Jan Patočka**

Zdeněk Nešpor: **Sociologická encyklopedistika**

Jiří Pernes: **Českoslovenští komunisté a jejich strana**

V EDICI MIMO JINÉ VYŠLO:

Milan Řípa: **Evropskou fúzi rozvířil Wirbelrohr**

Milan Řípa: **Historie výzkumu řízené termojaderné fúze v ČR**

Milan Řípa: **Historie výzkumu řízené termojaderné fúze**

Edice Věda kolem nás | Výzvy a otázky

Soukromý kapitál ve výzkumu řízené termojaderné fúze | Milan Řípa

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i. Grafická úprava dle osnovy Jakuba Krče a sazba WOW, spol. s r. o. Odpovědná redaktorka Petra Královcová. Vydání 1., 2017. Ediční číslo 12222. Tisk WOW, spol. s r. o., Washingtonova 1567/25, 110 00 Praha 1.

ISSN 2464-6245

Evidováno MK ČR pod e. č. E 22344

Další svazky získáte na:

www.vedakolemnas.cz | www.academiaknihy.cz | www.eknihy.academia.cz