

# ŘÍZENÁ TERMOJADERNÁ FÚZE PRO KAŽDÉHO

MILAN ŘÍPA

JAN MLYNÁŘ

VLADIMÍR WEINZETTL

FRANTIŠEK ŽÁČEK

PUBLIKACE BYLA VYDÁNA PŘI PŘÍLEŽITOSTI 50. VÝROČÍ ZALOŽENÍ  
ÚSTAVU FYZIKY PLAZMATU AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY, V. V. I.



## MOTTO

Nyní je všem jasné, že první úvahy o tom, jak se dveře do vytoužené komnaty mimořádně vysokých teplot otevrou hladce a bez skřípotu, se při prvním nárazu tvůrčí energie fyziků ukázaly falešné, stejně jako naděje hříšníka vstoupit v království nebeské, aniž by prošel očištěm. Pokud snad mohou být nějaké pochybnosti o tom, že problém termojaderné syntézy bude vyřešen, pak pouze není jasné, jak dlouho se v očištěm zdržíme. Z něho musíme vystoupit s ideální vakuovou technikou, přesně určenou geometrií magnetických siločar, s naprogramovanými režimy elektrických obvodů, nesoucí v rukou klidné, stabilní vysokoteplotní plazma, čisté jako mysl teoretického fyzika, ještě nenarušeného setkáním s experimentálními fakty.

L. A. Arcimovič

## PODĚKOVÁNÍ

### První vydání

Děkuji vedení Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., v čele s ředitelem prof. Ing. Dr. Pavlem Chráskou, DrSc., že nám umožnilo knížku napsat. Děkuji svým spolupracovníkům-spoluautorům, RNDr. Janu Mlynářovi, Ph.D., Mgr. Vladimíru Weinzettlovi, Ing. Františku Žáčkovi, CSc., za neuvěřitelně příjemnou, povzbudivou a inspirující tvůrčí atmosféru. Děkuji dalším zaměstnancům Ústavu fyziky plazmatu, kteří pomohli radou: Ing. Jiřímu Matějčkoví, Ph.D., Ing. Ivanu Ďuranovi, doc. Ing. Pavlu Šunkovi, CSc., Ph.D., RNDr. Karlu Koláčkovi, CSc., Ing. Jiřímu Ullschmiedovi, CSc., a RNDr. Jaroslavu Štrausovi. Jsem rád, že mohu za totéž poděkovat dlouholetému zaměstnanci Fyzikálního ústavu AV ČR Ing. Otou Štirandovi, CSc., prof. RNDr. Milanu Tichému, DrSc., z Matematicko-fyzikální fakulty UK a zejména děkuji doc. Ing. Jiřímu Limpouchovi, CSc., z Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT za cenné připomínky k popisu inerciálního udržení. Nemohu zapomenout na jazykovou korekturu a připomínky Ing. Marie Dufkové (Energetická společnost ČEZ, a. s.), Roberta a Michaely Čapkových, stejně tak na mimořádně pečlivé přečtení rukopisu paní Irenou Webrovou (Tiskový odbor Akademie věd České republiky). Tak malá knížečka a tolik lidí přispělo k jejímu napsání a vydání...

Milan Řípa, editor

V Praze 15. dubna 2005

### Druhé a zejména třetí, přepracované vydání

Děkuji řediteli Ing. Petru Křenkovi, CSc., že nám umožnil přepracovat a vydat mimořádně úspěšnou knížku a pochopitelně děkuji spoluautorům RNDr. Vladimíru Weinzettlovi, Ph.D., Ing. Žáčkovi, CSc., RNDr. Janu Mlynářovi, Ph.D., za aktualizaci „svých kapitol“, RNDr. Vladimíru Weinzettlovi, Ph.D., za napsání zcela nové a užitečné kapitoly „Měření parametrů plazmatu – diagnostika“ a RNDr. Janu Mlynářovi, Ph.D., za podrobné přečtení textu, které se stalo východiskem pro aktualizaci ostatních autorů. Děkuji redaktorce ITER Newslinu Sabině Griffithové, která obratem odpovídala na zvědavé otázky. Děkuji zástupkyni společnosti ČEZ Ing. Marii Dufkové za to, že zajistila grafické zpracování knížky a bude se podílet na její distribuci.

Milan Řípa

V Praze 15. dubna 2011

## OBSAH

Předmluvy	6
Minulost a budoucnost termojaderné fúze v datech • Milan Řípa	8
Přínos O. A. Lavrentěva k výzkumu termojaderné fúze • Milan Řípa	16
Proč právě termojaderná fúze? • Vladimír Weinzettl	19
Plazma a princip termojaderné fúze • Milan Řípa	22
Magnetické a inerciální udržení • Milan Řípa, Jiří Limpouch	25
Princip tokamaku • Vladimír Weinzettl	33
Historie termojaderné fúze ve světě • Milan Řípa	39
Historie termojaderné fúze v České republice • František Žáček	53
Významná termojaderná zařízení • Milan Řípa, Jan Mlynář	56
ITER • Milan Řípa	81
Měření parametrů plazmatu tokamaku COMPASS – diagnostika • Vladimír Weinzettl	90
Termojaderné technologie • Milan Řípa	102
Mezinárodní spolupráce České republiky v oblasti termojaderné fúze • Milan Řípa	107
Budoucnost termojaderné fúze • Jan Mlynář	110
Doslov • Milan Řípa	113
Fúze na internetu • Vladimír Weinzettl	114
Výkladový slovník • Milan Řípa, František Žáček	117
Předpony pro vedlejší jednotky	144
Literatura • Milan Řípa, Jan Mlynář	145
Resumé – Controlled Thermonuclear Fusion for Everybody	149
Autoři	150

# PŘEDMLUVA

## První vydání

Spolu s kolegy z Ústavu fyziky plazmatu AV ČR jsme se v roce 20. výročí generování prvního plazmatu na dosud největším tokamaku na světě – evropském JET – pokusili sepsat, a v roce, který by měl rozhodnout o místě stavby termojaderného reaktoru ITER poskytnout co nejširší veřejnosti základní informace o tom, co termojaderná energie pro společnost znamená. Důraz jsme kladli na historii, na cestu, kterou vědci a technici museli zvládnout, než dospěli ke stavbě ITER. Ostatně projektované termojaderné zařízení ITER (původně International Thermonuclear Experimental Reactor) latinsky znamená CESTA...

Knížce dominují dvě kapitoly: obsáhlý přehled historie výzkumu fúze v datech zakončený výhledem do její nejbližší budoucnosti a přehled velkých termojaderných zařízení. Odborné termíny a zkratky jsou vysvětleny buď poznámkami v textu pod čarou nebo ve Výkladovém slovníku. Další informace o fúzi najdete v kapitole Literatura nebo Fúze na internetu.

Milan Řípa, Jan Mlynář,  
Vladimír Weinzettl, František Žáček

## Druhé a zejména třetí vydání

Záhy po zveřejnění informace v denním tisku bylo první vydání knihy, kterou Ústav fyziky plazmatu AV ČR posílal zájemcům zdarma, rozebráno. Naštěstí se objevila nabídka Energetické společnosti ČEZ, a. s., vydat knížku stejným nákladem podruhé a zařadit ji do svého velkorysého programu energetického vzdělávání mládeže Svět energie. V druhém vydání jsme doplnili aktuální informace o projektu ITER a rozšířili Výkladový slovník. Rovněž jsme zahrnuli připomínky čtenářů prvního vydání týkající se srozumitelnosti textu.

Pravidelný kontakt autorů s veřejností identifikoval tři opakující se otázky. Zcela zásadní je rozdíl mezi štěpnou a slučovací (fúzní) jadernou reakcí. To, že si lidé pod pojmem jaderná energie představí v lepším případě Teme-lín a v horším případě Černobyl či Fukušimu, nelze mít laikům za zlé. Jedním z úkolů knížky je zdůraznit zásadní rozdíly mezi oběma typy jaderných reakcí. Štěpný reaktor v každém okamžiku obsahuje desítky tun paliva. V reaktoru probíhá řetězová reakce. Jak použité palivo, tak odpad tvořený mnoha různými prvky jsou a zůstávají radioaktivní stovky tisíc let. Naproti tomu slučovací či fúzní reaktor v každém okamžiku obsahuje gramová množství paliva. Reakce není řetězová a jakákoli nestandardní situace znamená okamžité vyhasnutí jaderné reakce. Primární palivo deuterium a lithium ani odpad helium nejsou radioaktivní.

Druhá otázka zní „kdy?“. Kdy bude fúze vyrábět elektřinu? Věříme, že kritická bude polovina tohoto století. Mimochodem média ráda papouškují tezi o jediné platné konstantě ve fúzním výzkumu: „V kterémkoli okamžiku platí, že fúze bude fungovat za 20 let.“ V roce 1955 na 1. mezinárodní konferenci o mírovém využití atomové energie v Ženevě totiž významný indický vědec Homi Bhabha prohlásil, že do 20 let bude známa metoda jak uvolnit jadernou energii pomocí fúze. Tato metoda byla známa, ba „uzákoněna“, v roce 1968 a byl jí a je jí

více než čtyřicet let TOKAMAK! Takže skutečnost předběhla vizi pana profesora o sedm roků! Výkon 16 MW tokamaku JET v roce 1997 je menší než příkon ohřevu plazmatu a reakce trvala jen dvě sekundy. Připravovaný mezinárodní tokamak ITER příkon ohřevu zesílí nejméně desetkrát, a protože vinutí elektromagnetů bude supravodivé, výboj zhasne až po více než deseti minutách.

Třetí otázka se týká stavu prací na ITER. Tomuto tématu se podrobně věnuje kapitola se stejným názvem. Práce na jihu Francie pokračují ovšem pravidelným tempem a to, co platí dnes, kdy knížku píšeme, bude v okamžiku jejího vydání překonáno. Doporučujeme navštívit stránky <http://www.iter.org> či Facebook patřící ITER.

Pět let je v historii výzkumu řízené termojaderné fúze hodně. Začal se stavět mezinárodní tokamak ITER, v České republice fungují dokonce dva tokamaky: COMPASS v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., a GOLEM na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT, tamtéž obhájili diplomové práce první studenti zaměření Fyzika a technika termojaderné fúze. Ve výzkumu fúze se objevily nové fyzikální, technologické a dokonce i historické poznatky. V neposlední řadě nezháleli autoři a během pěti let nabyli nových zkušeností. Určitě všichni uvítali možnost třetího vydání nesmírně úspěšné knižky. Třetí vydání doznalo oproti předešlým řady změn. Vznikla nová kapitola Přínos O. A. Lavrentěva k výzkumu termojaderné fúze, byl podstatně rozšířen Výkladový slovníček, kde jsme ponechali anglické ekvivalenty, jsou doplněny kapitoly Významná termojaderná zařízení, Minulost a budoucnost termojaderné fúze v datech, Historie termojaderné fúze v Česku a ITER, je zcela přepracována kapitola Historie termojaderné fúze ve světě. Pochopitelně byly opraveny věcné chyby a překlepy prvních dvou vydání.

Tři z autorů pravidelně přednášejí na vysokých školách. Dva se věnují popularizaci řízené termojaderné fúze formou článků a přednášek na středních školách a dva jsou členy Public Information Network při European Fusion Development Agreement – neformálního sdružení evropských popularizátorů fúze. Jmenované aktivity nesmírně pomohly při aktualizaci knížky. Poslední poznámka se týká jazykového vybavení autorů. Celá čtveřice zná ruštinu, což je v případě termojaderné fúze trefa do černého, neboť nejuspěšnější termojaderné zařízení tokamak vymysleli v Moskvě.

Věříme, že i třetí vydání bude stejně úspěšné jako dvě předchozí.

Milan Řípa, Jan Mlynář,  
Vladimír Weinzettl, František Žáček

# MINULOST A BUDOUCNOST TERMOJADERNÉ FÚZE V DATECH

- 1905 **A. EINSTEIN** – Annus Mirabilis: speciální teorie relativity:  $E = \Delta m \times c^2$
- 1920 **A. EDDINGTON**: „...hvězdy jsou tyglíky, kde se lehčí atomy, kterých je v mlhovinách spousta, spojují v mnohem složitější prvky.“
- 1926 **F. PANETH, K. PETERS**, Německo, paladium nasycené vodíkem produkuje helium – první zmínka o fúzi (nejen o studené)
- 1928 **I. LANGMUIR** – „plazmatem“ nazval kladný sloupec výboje v plynu (pro podobnost s krevní plazmou – oba přepřavují částice – nebo podle významu řeckého „tvarovat, formovat“ – výboj sleduje tvar výbojové trubice).
- 1929 **R. ATKINSON a F. G. HOUTERMANS** – první výpočet termonukleární reakce ve hvězdách (impuls pro přesné výpočty **C. F. VON WEIZSÄCKRA a H. BETHEHO** v roce 1938)
- 1932 **N. I. BUCCHARIN** navrhl **G. GAMOWOVI** postavit experimentální zařízení pro výzkum termonukleární fúze: měděný vodič naplněný bublinkami deuteria a tritia.
- 1933 **E. RUTHERFORD**: „Kdokoli se snaží pro komerční účely uvolnit výkon přeměnou atomu, je snílek.“
- 1934 **E. RUTHERFORD, M. L. E. OLIPHAN a P. HARTECK** (Cambridge University, Spojené království) – fúze jader deuteria na urychlovači za vzniku jádra helia a neutronů – první fúzní reakce v pozemské laboratoři
- 1937 **F. G. HOUTEREMANS** chtěl zkusit fúzi v charkovském Fyzikálně technickém ústavu, avšak putoval do vězení jakožto „špión“. Po šesti letech vězení byl poslán do Německa.
- 1938 **A. KANTROWITZ a E. JACOBS**, US National Advisory Commission for Aeronautics, přerušili výzkum magnetické izolace horkého plazmatu kvůli nedostatku financí.
- 1938 **O. HAHN a F. STRASSMAN** objevují štěpnou reakci uranu  $^{235}\text{U}$ .
- 1942 Manhattan – tajný americký projekt na sestrojení atomové bomby
- 1942 **E. FERMI** demonstruje v USA první samoudržitelnou řetězovou štěpnou reakci v reaktoru **Chicago Pile-1**, University of Chicago.
- 1945 USA svrhly atomové bomby na japonská města Hirošimu a Nagasaki.
- 1946 **E. TELLER** – seminář o řízené termojaderné fúzi. Záporné výsledky se svazky částic.
- 1946 Utajené výzkumy potenciálních zdrojů neutronů pro výrobu atomových zbraní **G. P. THOMSON a M. BLACKMAN** (Imperial College, London, Anglie) – patent toroidálního termonukleárního reaktoru – pinč efekt<sup>1</sup> v deuteriu, výkon PDD = 9 MW. **P. THONEMANN** (Clarendon Laboratory, Oxford University, Anglie) – toroidální výboj ve skleněné komoře buzený vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem (5 MHz a později 100 kHz).
- 1950 **H. TRUMAN**, prezident USA: „Urychlete vývoj vodíkové bomby!“
- 1950 **O. A. LAVRENTĚV** (seržant Rudé armády v reakci na **H. S. TRUMANOVU** výzvu) – dopisy **I. V. STALINOVÍ** a ÚV KSSS z ostrova Sachalin do Moskvy: „Znám tajemství vodíkové bomby.“
- 1950 **O. A. LAVRENTĚV** – zpráva pro ÚV KSSS obsahovala popis termonukleárního reaktoru s izolací vysokoteplotního plazmatu elektrostatickým polem a návrh konstrukce „suché“ vodíkové bomby.
- 1950 **A. D. SACHAROV a I. E. TAMM** (Laboratorija Izmeritel'nykh Priborov Akademii Nauk – LIPAN<sup>2</sup>, Moskva, SSSR) dokončili první výpočty magnetického termonukleárního reaktoru (MTR).
- 1951 **J. PERON**, prezident Argentiny, ohlašuje zvládnutí termojaderné reakce (rakouský fyzik **R. RICHTER**, původem ze západočeského Sokolova, na ostrově Huemul v jezeře Nahuel Huapi). Zpráva nebyla pravdivá.
- 1951 **I. V. STALIN** (květen) – usnesení Rady ministrů SSSR o organizaci výzkumu Magnetického termonukleárního reaktoru. Vedoucím projektu MTR je jmenován **L. A. ARCIMOVIČ**.
- 1951 **A. SACHAROV a I. TAMM** (LIPAN, Moskva, SSSR) – návrh tokamaku, **L. SPITZER** (Princeton University, Princeton, USA) – návrh stelarátoru
- 1951 **Matterhorn** (červenec) – smlouva vlády USA s Princeton University o výzkumu řízené termonukleární reakce. Později projekt Matterhorn rozšířen na projekt Sherwood (pinče v Los Alamos, zrcadlové pasti v Livermore apod.).
- 1951 **Divertor** zmíněn **L. SPITZEREM** již při návrhu projektu Matterhorn před Komisí pro atomovou energii USA. Divertor měl stelarátor B64 spuštěný v roce 1955 v Princeton Plasma Physics Laboratory.
- 1952 „Termojaderné“ neutrony Z-pinče **N. V. FILIPOVA** přisoudil ARCIMOVIČ nestabilitě.
- 1952 **Meunier** – výzkum termojaderné fúze ve Francii 1952, 1. listopadu, Marschallový ostrov, USA – vodíková nálož (81 tun – netransportovatelná, **E. TELLER**)
- 1953, 12. srpna, Semipalatinsk, SSSR – vodíková puma (**A. D. SACHAROV**)
- 1954 Obninsk (100 km od Moskvy) – do provozu uvedena první štěpná jaderná elektrárna připojená na elektrorozvodnou síť
- 1954 Divertor poprvé projektován na D-stellarator v Princeton Plasma Physics Laboratory (**L. SPITZER**)
- 1955 **J. D. LAWSON** – kritérium pro nulový zisk, tzv. breakeven, termojaderného reaktoru: fúzní výkon = výkon pro dosažení a udržení teploty plazmatu (z důvodu utajení nepublikováno)

<sup>1</sup> Vlastní magnetické pole proudy plazmatem plazma stlačuje (pinčuje), a tím zahřívá.

<sup>2</sup> LIPAN – později Ústav atomové energie I. V. Kurčatova, dnes Kurčatovův ústav v Moskvě

- 1955 **H. BHABHA** (Spojené národy, First International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy): „Metoda řízeného uvolňování energie jaderné fúze by měla být zvládnuta během příštích 25 let.“
- 1955 První „tokamak“ – označovaný jako **TMP** – Torus s magnetickým polem – s keramickou vakuovou nádobou
- 1955 Založen Ústav jaderného výzkumu a Fakulta technické a jaderné fyziky UK, později Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská (1967) ČVUT (1959)
- 1956 **L. A. ARCIMOVIČ** (Symposium on Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics, International Astronomical Union, Stockholm) – „Lawsonovo kritérium“ pro D-D reakci:  $n\tau_E \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$  při  $T_i \approx 10^8 \text{ K}$
- 1956 **I. V. KURČATOV** (Středisko atomového výzkumu, Harwell, Anglie) – přednáška „O možnostech termonukleární reakce v plynném výboji“ – začátek konce informačního embarga
- 1957 **J. D. LAWSON** – po odtajnění termojaderných výzkumů publikuje své kritérium kladného zisku termojaderné reakce („breakeven“) z roku 1955.
- 1957 **ZETA** (Zero-Energy Thermonuclear Assembly, Harwell, Anglie) – 2. srpna zahájen provoz na největším toroidálním pinči světa (hlavní poloměr 3 m, vedlejší 1 m)
- 1957 **EURATOM** (European Atomic Energy Community) – založení organizace
- 1957 Ústav jaderného výzkumu v Řeži, reaktor **VVR-S**: první řízená štěpná jaderná reakce v Československu
- 1958 T-1 první tokamak (autor názvu **I. N. GOLOVIN**): poprvé celokovová komora bez izolačních přerušení
- 1958 **ZETA** – chybná publikace senzačních „termojaderných“ neutronů (časopis Nature, 25. ledna). Neúspěšná byla i sovětská **ALFA** s dvojnásobným objemem.
- 1958 **2<sup>nd</sup> International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy** v Ženevě – odtajnění výzkumů termojaderné syntézy na obou stranách „železné opony“
- 1958 **EURATOM** – zahajovací program studia fúze s ohledem na chování ionizovaného plazmatu pod vlivem elektromagnetických sil
- 1959 **1. ledna založen Ústav vakuové elektroniky (ÚVE) Československé akademie věd – pověřen koordinací termojaderného výzkumu v Československu**
- 1960 **TM-1** (1965 přidáno VČ) uveden do provozu v Moskvě: nejprve adiabatické stlačení; 1965: ohřev plazmatu vF polem na ionto-cyklotronové frekvenci; 1977: převezen do ÚFP ČSAV v Praze
- 1960 **I. A. KURČATOV**, šéf termojaderného výzkumu v SSSR, zemřel.
- 1961 **M. S. IOFFE, B. B. KADOMCEV** (Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Salzburg, Rakousko) – stabilizace plazmatu v otevře-  
ných nádobách pomocí „Ioffeho tyčí“ – „absolutní magnetická jáma“ odstranila zhoubnou anomální Bohmovu<sup>3</sup> difúzi.
- 1961 **G. J. LINHART** zavádí pojem „inerciální udržení“
- 1962 **C. TOWNES** (USA), **A. M. PROCHOROV** a **N. G. BASOV** (SSSR) – Nobelova cena za objev principu laseru a maseru
- 1963 **ÚVE ČSAV** – přejmenování na Ústav fyziky plazmatu (ÚFP) Československé akademie věd
- 1963 **N. G. BASOV** a **O. N. KROCHIN** (SSSR) navrhli použití laseru k zapálení řízené termonukleární reakce.
- 1967 Elektrostatické udržení – **Farnsworth-Hirsch Fusor** generuje fúzní neutrony.
- 1968 **3<sup>rd</sup> Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research**, Novosibirsk: tokamak T-3<sup>4</sup> – 10 000 000 °C, doba udržení určena srážkami
- 1969 Angličtí fyzikové změřili/potvrdili v únoru teplotu tokamaku T-3 pětistunovou laserovou diagnostikou dovezenou z Culhamu. **D. ROBINSON** (2<sup>nd</sup> Workshop, Dubna, SSSR) referuje o měření teploty na **T-3** (1 keV). Zásadní úspěch tokamaků.
- 1970 Stávající experimentální zařízení se přestavují na tokamaky (USA, Evropa...).
- 1971 Laser **KALMAR** (Lebeděvův Fyzikální ústav AV SSSR, Moskva) – první inerciální fúzní D-T<sup>5</sup> reakce ve sféricky ozářeném terčíku z CD<sub>2</sub>
- 1971 Vytvořen právní rámec rozsáhlého programu výzkumu fúze Evropského společenství
- 1972 Ve světě je v provozu již 17 tokamaků
- 1972 Stlačení kulového terče laserovým impulzem o speciálním časovém profilu (LLNL, USA) – schéma v časopisu Nature
- 1973 JET (Joint European Torus) – zahájeny projektové práce na největším tokamaku světa
- 1973 První naftová krize na Středním východě – růst cen ropy a dotací vědeckému výzkumu nových zdrojů energie. USA: růst dotací na fúzi 10x za dva roky
- 1974 **TFTR** (Tokamak Fusion Test Reactor, Princeton University, USA) – zahájena práce na projektu tokamaku nové generace s cílem uvolnění fúzní energie reakcí D-T
- 1975 Velké tokamaky **T-10** (Ústav atomové energie I. V. Kurčatova, Moskva, SSSR) a PLT (Princeton Large Torus, Princeton University, USA) v provozu
- 1975 Návrh komprese paliva uvnitř implodujícího<sup>6</sup> kulového slupkového terče (SSSR)
- 1976 **TFTR** – zahájena výstavba největšího

3 Koefficient klasické difúze napříč siločar magnetického pole  $\sim B^{-2}$ , koefficient Bohmovy difúze  $\sim B^{-1}$

4 Čím větší číslo sovětských tokamaků, tím je tokamak mladší a často i rozměrnější.

5 Reakce deuteria a tritia zapálena laserem – více v kapitole „Magnetické a inerciální udržení“

6 Na rozdíl od exploze směřuje imploze do centra.

- amerického tokamaku v Princeton Plasma Physics Laboratory
- 1977 **INTOR** (**IN**ternational **TOK**amak **Reactor**) – **J. P. VELICHOV** (budoucí ředitel Ústavu pro atomovou energii I. V. Kurčatova v Moskvě a poradce generálního tajemníka **M. S. GORBAČOVA**) navrhl vytvořit pod hlavičkou **IAEA** mezinárodní projekt plazmových technologií v podmínkách blízkých termojadernému reaktoru.
- 1977 Tokamak **TM 1 MH** (původní název **TM 1 VČ**) – spuštění prvního tokamaku ve východní Evropě mimo tehdejší SSSR (Ústav fyziky plazmatu Československé akademie věd)
- 1977 **Shiva laser** zkompletován v LLNL – 20 infračervených svazků, 10,2 kJ
- 1978 **JET** – zahájena stavba evropského tokamaku v Culhamu, Oxfordshire, Spojené království
- 1978 Tokamak **PLT** (**P**inceton **L**arge **T**orus, Princeton University, USA) teplota 60 000 000 °C
- 1978 Tokamak **T-7** (Ústav atomové energie I. V. Kurčatova, Moskva, SSSR) – první tokamak se supravodivými magnetickými cívkami
- 1979 Havárie **ŠTĚPNÉHO**<sup>7</sup> reaktoru na Three Mile Island, Pennsylvania, USA
- 1980 Druhá ropná krize – revoluce v Íránu
- 1982 Tokamak **ASDEX** – objev režimu zlepšeného udržení plazmatu: **H-mode**
- 1982 Tokamak **T-7**, Moskva – vlnovodná struktura z ÚFP ČSAV generovala pomocí elektromagnetických vln rekordní proud 200 kA
- 1983 **JET** – v termínu a za plánované náklady zahájen provoz největšího tokamaku na světě. 350 vědců a inženýrů z celé Evropy a světa. V tomtéž roce **JET** jako první tokamak překračuje 1 MA elektrického proudu plazmatem. Demonstrace úspěšnosti velkého mezinárodního projektu.
- 1984 **CASTOR** (Czechoslovak Academy of Sciences Torus) – dokončena přestavba tokamaku **TM 1 MH** v ÚFP ČSAV – silnější magnetické pole, větší počet diagnostických oken, větší vstup pro vysokofrekvenční pole, počítačový sběr dat
- 1984 Nepřímá zapálená (Indirect Drive) inerciální fúze – návrh přeměnit energii vnějšího zdroje na rentgenové záření
- 1984 **M. S. GORBAČOV**, generální tajemník UV KSSS, a **R. REAGAN**, prezident USA, se rozhodli v Ženevě jménem SSSR a USA společně prověřit fúzní energii „ku prospěchu celého lidstva“.
- 1985 **NOVA** – spuštění největšího laseru na světě (LLNL, USA), 10 infračervených svazků, 120 kJ
- 1985 Japonský tokamak **JT-60** – první plazma
- 1987 **ITER** (**I**nternational **T**hermonuclear **E**xperimental **R**eactor) – v Ženevě se představitelé EU, SSSR, Japonska a USA dohodli na spolupráci při návrhu fúzního reaktoru s velkým výkonem – předposledního kroku k termojaderné elektrárně.
- 1988 **ITER** – Kanada se připojuje k projektu jako člen evropského týmu.
- 1988 **ITER** – Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA) ve Vídni přebírá patronát nad spoluprací SSSR, Japonska, USA a Evropské unie (a Kanady).
- 1988 **ITER** – Conceptual Design Activities (CDA) – zahájení projekčních prací
- 1988 **ITER** – Ústav fyziky plazmatu se zapojuje do projektu prostřednictvím SSSR.
- 1988 **Experiment Centurion/Halite** – inerciální fúze pomocí rentgenového záření podzemního jaderného výbuchu
- 1988 **T-15** – sovětský supravodivý tokamak zkompletován
- 1988 **TORE SUPRA** – první plazma částečně supravodivého francouzského tokamaku
- 1989 **INTOR** – závěrečný workshop (pracovní setkání) ve Vídni (zůstalo pouze u zpráv a bohatých databází)
- 1989 Krátce, avšak intenzivně, ožila fantastická myšlenka studené fúze (**S. PONS**, **M. FLEISHMANN**).
- 1990 **ITER** – Ústav fyziky plazmatu se zapojuje do projektu v rámci **EURATOM**.
- 1991 **JET** (Evropská unie) – první na světě používá směs 89 % **D** – 11 % **T** a produkuje termojaderný výkon 2 MW po dobu 0,2 s.
- 1991 **START** – první plazma kulového tokamaku v Culhamu, rekordní  $\beta = 40\%$
- 1992 **TFTR** (USA) – rekordních 6,1 MW termojaderného výkonu směsi 50 % **D** – 50 % **T** po dobu 0,7 s
- 1992 **ITER** – Engineering Design Activities (EDA) – podepsána čtyřstranná dohoda o vypracování projektu (Rusko, USA, EU, Japonsko) s cílem prokázat fyzikální a technickou dostupnost průmyslového termojaderného reaktoru
- 1993 **TFTR** (USA) – 10 MW termojaderného výkonu po dobu cca 1 s (rekord)
- 1994 „**Fast ignition (rychlé zapálení)**“ – subpikosekundový<sup>8</sup> laserový impuls ohřívá palivo stlačené nanosekundovým impulzem.
- 1994 USA odtajnilo část výzkumů inerciální fúze.
- 1996 **TORE SUPRA** – rekordní plazma trvalo dvě minuty. Proud plazmatem 1 MA neinduktivně buzený 2,3 MW dolně hybridní frekvencí, odvedeno 280 MJ tepla.
- 1997 **JET** (Evropská unie) – 16,1 MW po dobu jedné sekundy (4 MW po dobu 4 s),  $Q^9 = 0,65$  – poprvé na světě byl identifikován dobře měřitelný vnitřní ohřev  $\alpha$  částicemi – produkty termojaderné reakce.
- 1998 **ITER – Final Design Report** (závěrečná zpráva: 6 mld. dolarů, 1500 MW fúzního výkonu,  $Q = \infty$ ). Redukce projektu. USA odstupují od účasti na projektu ITER.

<sup>7</sup> Štěpný reaktor a fúzní reaktor jsou dvě dokonale rozdílné věci – podrobnosti v kapitole „Princip termojaderné syntézy a plazma“.

<sup>8</sup> Menší než pikosekunda – viz Výkladový slovník  
<sup>9</sup>  $Q$  = termojaderný výkon/příkon plazmatu D-T

- (republikánská většina v Kongresu USA, dotace do magnetického udržení prakticky zastaveny).
- 1998 **LHD** – největší a supravodivý stelarátor světa uveden do provozu v japonské Toki
- 1998 japonský tokamak **JT-60** dosáhl v deuteriu rekordního ekvivalentního zesilovacího faktoru<sup>10</sup>  $Q = 1,25$ .
- 1999 **ITER** – Kanada prvním zájemcem o místo pro stavbu
- 1999 Asociace **EURATOM IPP.CR** – Česká republika přistoupila k EURATOM a stala se signatářem **EFDA** (Evropská dohoda o rozvoji fúze). Garantem programu asociace je Ústav fyziky plazmatu Akademie věd ČR. Asociace sdružuje Ústav fyziky plazmatu AV ČR, Ústav jaderné fyziky AV ČR, Ústav fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského AV ČR, Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s., Ústav aplikované mechaniky Brno, spol. s r. o., Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT, Matematicko-fyzikální fakultu UK.
- 1999 **JET** se stává společným pracovištěm evropských fúzních laboratoří, signatářů dohody **EFDA** (European Fusion Development Agreement).
- 1999 **Laser NIF** – zahájena stavba
- 1999 USA opouští projekt **ITER**.
- 2000 100 tokamaků v provozu
- 2000 Stelarátor Wendelstein **W7-X** (Ústav

10 Ekvivalentní  $Q$  v deuteriu je přepočítané na směs deuteria a tritia.

- fyziky plazmatu Maxe Plancka, Greifswald, Německo) – zahájení stavby
- 2001 **ITER – Final Design Report No 2:** redukovaný projekt ITER s polovičními náklady (3 mld. dolarů, 500 až 700 MW fúzního výkonu,  $Q > 10$ )
- 2002 **ITER** – Cadarache (Francie), Vandellós (Španělsko), Clarington (Kanada), Rokkasho-mura (Japonsko) splnily technická zadání pro stavbu ITER.
- 2002 **ITER** – vývoj speciální Hallovy sondy v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR
- 2002 **ITER** – studie materiálu první stěny v ÚFP AV ČR, ÚJF AV ČR a v ÚJV Řež, a. s., ÚAM Brno, spol. s r. o., ve spolupráci s podniky Vítkovice – výzkum & vývoj, spol. s r. o., a Škoda – výzkum Plzeň, spol. s r. o.
- 2003 **ITER** – Čína (leden) a USA (únor): připojení k projektu
- 2003 **ITER** – Korea (červen): připojení k projektu
- 2003 **ITER** – Evropa (26. listopad) – ze dvou evropských kandidátů na místo pro ITER bylo vybráno francouzské Cadarache.
- 2003 **TORE SUPRA** (supravodivý tokamak v Cadarache, Francie) – v jediném výboji trvajícím 6:21 minut odvedl tokamak rekordních 1000 MJ tepla.
- 2003 **Laser NIF** – první výstřel do terčové komory o  $\Phi$  10 m; v provozu čtyři ze 192 svazků
- 2003 **Z-machine** – zahájeny fúzní experimenty v Sandia National Laboratory (Albuquerque, Nové Mexiko)

- 2005 **ITER** – Moskva, 28. června: rozhodnuto o místě stavby – Cadarache
- 2005 Ústav fyziky plazmatu AV ČR přijal nabídku **UKAEA** na převzetí moderního tokamaku **COMPASS D**
- 2005 **ITER** – Indie (listopad): připojení k projektu. Projektu se účastní více než polovina obyvatel zeměkoule.
- 2005 **KANAME IKEDA**, diplomat a fyzik, jmenován kandidátem na ředitele **ITER Organization**
- 2005 **NIF** – osm svazků dosáhlo rekordní infračervené energie 152,8 kJ.
- 2006 **N. R. HOLTkamp**, fyzik. jmenován kandidátem vedoucího projektu **ITER** a prvním zástupcem generálního ředitele **ITER Organization**
- 2006 **ITER** – 21. listopadu v Paříži podepsána smlouva o právnické osobě ITER pro nakládání s ITER
- 2006 **EAST** (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) – první celosupravodivý tokamak na světě zahájil činnost v Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Science, Hefai, Čína.
- 2007 **ITER** – 29. ledna archeologickým průzkumem zahájena v Cadarache stavba tokamaku ITER
- 2007 **ITER** – 24. října ratifikací smlouvy založena **ITER Organization** pro nakládání s ITER
- 2007 Tokamak **CASTOR** ukončil činnost v ÚFP AV ČR a byl převezen na Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT

- Praha, kde jako výukový tokamak funguje pod názvem **GOLEM**.
- 2007 **KSTAR** – druhý celosupravodivý tokamak na světě – **Korea Superconducting Tokamak Advanced Research** byl spuštěn v Národním ústavu pro výzkum fúze v Daajenon, Jižní Korea.
- 2009 Tokamak **COMPASS** z Culham Science Centre slavnostně spuštěn v ÚFP AV ČR
- 2010 **Laser NIF** – plný počet 192 svazků vystřelil s energií 1 MJ do terčiku.
- 2010 **B. GUCCIONE** – zakladatel a vydavatel časopisu pro pány **Penthouse** a největší privátní sponzor fúze zemřel. V 80. letech minulého století věnoval na vývoj kompaktního tokamaku **Rigatron** téměř 20 mil. dolarů.
- 2010 **O. MOTOJIMA** generálním ředitelem **ITER Organization** (nahradil Kaname Ikedu).
- 2011 Havárie štěpného reaktoru ve Fukušimě, Japonsko
- 2011 Tokamak **GOLEM** generuje poloidální magnetické pole jako první na světě vysokoteplotním supravodičem.
- 2019 **ITER** – předpokládané první plazma
- 2014 **DEMO** – předpokládané zahájení práce na projektu
- 2026 **ITER** – předpokládané zahájení experimentů se směsí deuterium a tritium
- 2032 **DEMO** – předpokládané zahájení stavby
- 2034 **DEMO** – předpokládané uvedení do provozu
- 2050 **Termojaderná elektrárna (?)**



# PŘÍNOS O. A. LAVRENTĚVA K VÝZKUMU TERMOJADERNÉ FÚZE

Knižka o řízené termojaderné fúzi a bez zmínky o Olegu Alexandroviči Lavrentěvi? Nemyslitelné, zejména když se životní dráha geniálního vědce uzavřela v době, kdy jsme publikaci psali. Oleg Alexandrovič Lavrentěv zemřel 10. února 2011.

Osobně jsem rád, že mohu alespoň takto vzdát hold mimořádně nadanému člověku, který stál u zrodu státního programu výzkumu řízené fúze v bývalém Sovětském svazu. Se jménem Lavrentěv jsem se poprvé setkal v sedmdesátých letech, kdy jsem sepisoval práci k takzvanému kandidátskému minimu. Téma práce znělo: Elektrostatické udržení plazmatu. Po třiceti letech se otevřely archivy a ukázalo se to, co jsem tehdy netušil a ani tušit nemohl. Ani sám Lavrentěv tehdy nevěděl, že jeho iniciativa v padesátých letech minulého století byla rozhodujícím impulzem pro pány Sacharova a Tamma, kteří vymysleli tokamak! Lavrentěv se o tom, že Sacharov od něho – od seržanta Rudé armády – při vymýšlení tokamaku „opisoval“, dozvěděl až v roce 1968 z beletristické knížky A. M. Livanovové „Fyzici o fyzicích“. O. A. Lavrentěv se narodil v roce 1926 v Pskově. Zájem o fyziku při středoškolských studiích zúžil na fyziku atomů. Aniž by studia dokončil, dobrovolně narukoval a konec II. světové války ho zastihl na Sachalinu ve funkci radiooperátora. Přes nepřízeň vojenských regulí dálkově maturoval a přihlásil se na MGU (Moskovskij gosudarstvennyj universitet).

Projev prezidenta Harry S. Trumana v lednu 1950 před americkým kongresem, v němž

v reakci na úspěšný pokus Sovětského svazu s atomovou bombou vyzval národ k dokončení super bomby, byl bezprostředním impulzem pro jeho takřka neuvěřitelné konání. Pilné studium dostupné literatury z posádkové knihovny mu stačilo k napsání dopisů nejprve Stalinovi na sklonku roku 1949 a později na počátku roku 1950 ÚV KSSS, v nichž popsal princip vodíkové bomby s pevnolátkovým deuteriem lithia 6 a princip termojaderného reaktoru, který horké plazma udržoval sférickým elektrostatickým polem. Připomínám, že se psal rok 1950 a Amerika odpálila ještě v roce 1952 netransportovatelnou H-bombu Mike s kapalným deuteriem. Dopis adresovaný ÚV KSSS dostal k posouzení Andrej D. Sacharov a zejména druhá část dopisu – možnost využití termojaderné reakce deuteria a tritia k civilním účelům – ho nadchla! Nadchl ho i brilantně uvažující Lavrentěv. Sacharov nahradil elektrostatické pole polem magnetickým a spolu se svým učitelem Igorem J. Tammem navrhli magnetický termojaderný reaktor, který v roce 1958 Igor N. Golovin, zástupce ředitele Ústavu pro atomovou energii Igora V. Kurčatova, pojmenoval tokamak. Jak je dobře známo, tokamak v roce 1968 dobyl svět fúzních zařízení a více než čtyřicet let nebyl z trůnu sesazen!

Demobilizovaný Lavrentěv odjel do Moskvy, kde se rychle, na doporučení Sacharova, setkal s fúzní „smetánkou“, a to jak fyzikální, tak politickou. Sacharov o něm napsal: „...jedná se o iniciativního člověka s nevšedním tvůrčím potenciálem, kterému je třeba věnovat všechnu možnou podporu a pomoc...“ Poznal se

osobně s Kurčatovem, Sacharovem, se skupinou plazmové fyziky v LIPAN, což byl kryptonázev Ústavu pro atomovou energii v čele s Golovinem, Arcimovičem, Leontovičem a dalšími. Politická reprezentace už nebyla tak perspektivní: generálové B. L. Vannikov, velitel Hlavní správy, Nikolaj I. Pavlov, velitel oddělení pro atomovou energii Hlavní správy a Lavrentij P. Berija, který kromě neblaze proslulému NKVD šéfoval i zvláštnímu výboru pro výzkum atomové energie v SSSR. Ten také rozhodoval o moskevském osudu nadaného studenta: mimořádné stipendium, samostatný byt, individuální učitelé na MGU, literatura podle přání až do domu... Pak zemřel Stalin, Beriju odsoudili a Lavrentěv, považován za Berijova chráněnce, byl spuštěn na samé dno: žádné stipendium, žádná literatura, žádní učitelé. Navíc před dokončením diplomové práce mu byl zakázán vstup do laboratoře LIPAN. Nicméně MGU dokončil, jak mu nakázal Kurčatov, místo za pět za čtyři roky, a ptal se sám sebe, co bude dál. Rok, který ušetřil pilným studiem, strávil hledáním práce.

Zafungovala osvědčená metoda – napsal dopis Nikitovi S. Chruščovovi a reakcí byla umístěnka do Charkova. Rychle setřásl pověst potíživosti a etabloval se ve slavném institutu jako majitel originálních nápadů. Lavrentěv zůstal celý život věrný svému „vojenskému“ nápadu termojaderného reaktoru s elektrostatickým udržením plazmatu. Aniž by ji znal, „uznal“ Sacharovovu námitku, že materiál mřížek je třeba chránit. Tak vznikla slavná série elektromagnetických pastí Jupiter, což byla nejprve jednoštěrbino-

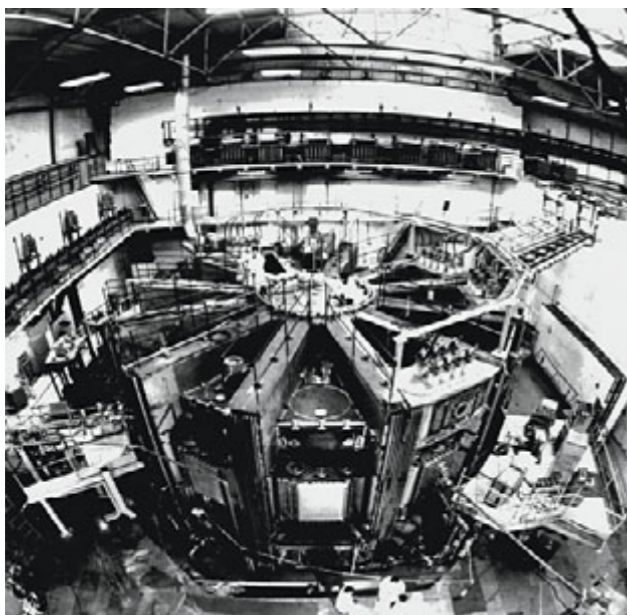


Oleg Alexandrovič Lavrentěv

vá a později mnohaštěrbínová vstříčná pole. Ztráty elektronů se blížily klasické předpovědi, tedy neovládala je difúze podle Bohma. Téměř nulové magnetické pole v centrální oblasti znamenalo malé ztráty cyklotronovým zářením. Když se schylovalo ke stavbě rozměrnějšího zařízení, nejprve tragicky zahynul jeho velký sympatizant, vedoucí Kalmykov (zopakoval se moskevský osud?) a pak se rozpadl Sovětský svaz a na stavbu velkých zařízení nebylo pomýšlení či spíše prostředky.

Lavrentěv patřil ke vzácným výjimkám, které se vyznaly jak v teorii, tak v experimentu. Vždyť v padesátých letech mu nabízel aspiranturu sám velký Leontovič, který vedl výzkum řízené termojaderné fúze v Sovětském svazu po teoretické stránce. Lavrentěv odmítl, neboť jeho snem byl experimentální důkaz ideje tehdy už elektromagnetického udržení. Rozpracoval způsob přeměny tepelné energie elektronů na elektřinu a návrh ověřil na zdroji slabého proudu.

V roce 2001 se dostalo Lavrentěvovi obrovského zadostiučinění, když archivy prozradily jeho roli v počátcích výzkumu řízené termojaderné fúze v Sovětském svazu. Objevily se ztracené



Dějiny jsou plné paradoxů. Rusko, které dalo světu nejúspěšnější termojaderné zařízení „tokamak“, nedokázalo svůj největší tokamak T-15 kvůli chybějícím financím uvést do provozu a muselo po 100 výstřelech tokamak zakonzervovat a čekat na lepší časy, které jsou na obzoru.

dopisy Stalinovi a především dopis ÚV KSSS, který četl Sacharov.

Oleg Alexandrovič se stal známým a slavným. V roce 2003 dostal státní vyznamenání „Vynikající pracovník Ukrajiny ve vědě a technologii“, v roce 2004 Cenu K. D. Sinělnikova Akademie věd Ukrajiny za vynikající práci v oboru fyziky plazmatu, titul doktora věd ozdobil osmdesátiletého vědce, který celou svoji kariéru neopustil myšlenku elektromagnetického udržení plazmatu. Byl autorem více než sta vědeckých článků a majitelem třiceti patentů.

Lavrentěvovi bylo v roce 2011 osmdesát pět let. Mezi podpisy nekrologu figurují jména Thomase J. Dolana z Illinoiské univerzity

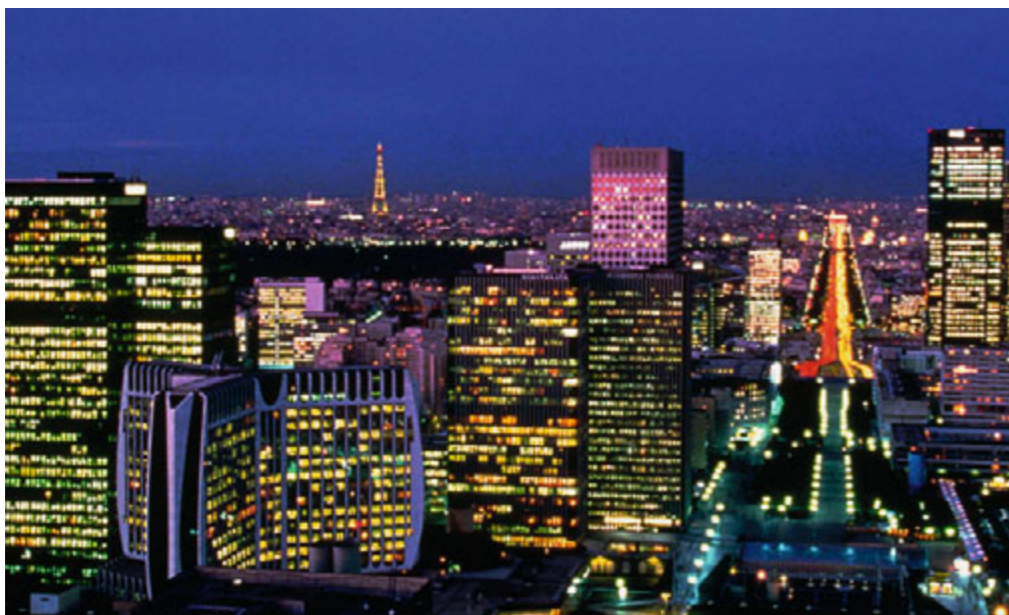
a Dmitrije Rjutova z Lawrence Livermore National Laboratory.

Nutno dodat, že paralelně s výzkumem IEC v Sovětském svazu studovali totéž ve Spojených státech. Zpočátku nezávislý výzkum charakterizují jména Phila Farnswortha, jednoho z otců televize, Roberta Hirshe, dlouholetého vedoucího amerického fúzního programu AEC, Roberta Bussarda, autora řady experimentálních zařízení Polywell, která jsou americkou obdobou Lavrentěvových elektromagnetických pastí. Výzkumy v USA stále pokračují za peníze US Navy pod vedením Roberta Nebela. Farnsworthův fúzor je „hračkou“ produkující fúzní neutrony ve studentských laboratořích.

## PROČ PRÁVĚ TERMOJADERNÁ FÚZE?

Slunce zahřívá Zemi po miliardy let od jejího vzniku až po současnost. Bez stálého přítoku tepla z této hvězdy by se naše planeta proměnila v ledovou kouli bez života. Slunce získává energii ze slučování jader vodíku na helium a těžší prvky. Tento proces nazýváme termojaderná fúze. Každou vteřinu se spotřebuje 600 milionů tun vodíku, což je přibližně 100× více než hmotnost největších egyptských pyramid, avšak naprosto zanedbatelné množství ve srovnání s jeho zásobami ve Slunci ( $2 \times 10^{30}$  kg). Asi půl procenta hmotnosti vodíkového paliva se v souladu s Einsteinovou teorií relativity ( $E = \Delta m \times c^2$ ) mění na energii a uniká z povrchu jako elektromagnetické záření. Zanedbatelnou část ( $10^{-10}$ ) z něj vnímáme na Zemi jako světlo a teplo. A tento zlomek je zdrojem energie nejen pro život na Zemi, ale například i pro veškerý koloběh vody. Fotovoltaickými články dokážeme z tohoto dopadajícího výkonu (průměrně 200 W/m<sup>2</sup>) přeměnit na elektrický proud ne více než jednu desetinu. Dnes se vědci a inženýři zabývají myšlenkou uskutečnit řízené termojaderné slučování v pozemských podmínkách a využít tak plný potenciál termojaderné fúze. V současné době se i přes nejrůznější úsporná opatření energetická spotřeba lidstva neustále zvyšuje. Ceny energie a paliv rostou, a to nejen v důsledku zvyšující se poptávky. Zásoby fosilních paliv se pomalu ztenčují a odhadují se na 200 až 250 let u uhlí, ale pouze okolo 40 až 45 let u ropy či 60 až 70 let u zemního plynu. Již 15 let těžíme ropy více, než jsme schopni v nových nalezištích objevit. Na jaké sopce, vyplývající z omezených

ropných zásob, se nachází lidská společnost, ukázaly dvě ropné krize v letech 1973 a 1980. Rovněž zásoby uranu <sup>235</sup>U pro štěpné jaderné reaktory vzhledem k jeho dosavadnímu ne hospodárnému využívání nejsou nevyčerpatelné. Světové zásoby ekonomicky dostupných jaderných paliv mohou bez recyklace paliva vystačit na 90 let, při recyklaci dnešními způsoby na stovky let. Na druhé straně ale obnovitelné zdroje energie zřejmě nebudou v budoucnosti schopny pokrýt více než 20 % světové spotřeby. 16. kongres Světové energetické rady WEC (World Energy Council) v Tokiu v roce 1995 potvrdil, že spoléhání se jen na obnovitelné zdroje energie (vítr, voda, biomasa) je utopií a energetické problémy lidstva nevyřeší. Energetický deficit by se tak mohl stát vážnou překážkou v trvale udržitelném rozvoji lidské společnosti. Válečné konflikty odjakživa vznikaly z nesteronomického rozložení zdrojů. V poslední době zejména zdrojů energie. Nerovnoměrnost spotřeby energie je přitom do očí bijící. Spotřebuje-li Evropa s 9 % všech obyvatel Země 30 % „světové energie“, pak stejné množství energie spotřebují Spojené státy s pouhými 5,5 % obyvatel Země. Na druhé straně Asie tvořící 60 % veškeré populace musí vystačit s 30 % celkové energie, což není nic proti Africe, kde je poměr 11 % : 3 %! Nerovnováha odjakživa znamenala pohyb, při kterém v tomto případě řinčí zbraně. Rovněž ekologická stránka produkce takového množství energie je spojena s velkými riziky. Spalováním fosilních paliv se do ovzduší dostává kromě oxidů síry a dusíku způsobujících kyselý dešť i velké množství oxidu uhličitého



Paříž a další města po celém světě potřebují energii. Hodně energie.

přispívajícího ke skleníkovému efektu. To pravděpodobně přispívá ke globálnímu oteplování, které by v budoucnosti mohlo vést například k tání arktických ledovců a vzestupu hladin oceánů, k posuvu mírného klimatického pásma směrem k pólům, jakož i k častějším a prudším změnám počasí. Jaderná energie ze štěpných reaktorů, které jsou k atmosféře velmi šetrné, je zase spojena s produkcí vysoce a dlouhodobě radioaktivního odpadu. Dokonce i větší elektrárny založené na obnovitelných zdrojích je ekologicky značně nešetrná (použití velmi těžko dosažitelných materiálů pro solární panely a vysoká energetická náročnost jejich výroby, hluchost větrných elektráren, zaplavení obrovských ploch hladinami vodních elektráren). I zdánlivě nevinná geotermální energie je spojena s vyvěráním těžkých kovů na zemský povrch. Termojaderná fúze je ve své podstatě prazákladem většiny obnovitelných zdrojů energie na zemské kouli. Účinnost využití paliva při jaderné fúzi je 10 000 000× větší než u všech chemických reakcí včetně hoření. Porovnáním vychází, že při elektrickém výkonu 1 GW by bylo zapotřebí ročně spálit 2,5 milionu tun uhlí, nebo použít plochu 20 km<sup>2</sup> solárních

panelů či 2000 stometrových sloupů větrných elektráren a nebo... pouze 500 kg vodíku pro fúzní elektrárnu. V dlouhodobém výhledu bude jako palivo pro fúzní reaktor sloužit deuterium, což je izotop vodíku <sup>2</sup>H (oproti „normálnímu“ vodíku <sup>1</sup>H má v jádře kromě protonu ještě neutron) nacházející se v libovolné sloučenině obsahující vodík, například v obyčejné vodě. Deuterium (tvoří přibližně 1/6000 všech vodíkových atomů) může z jednoho litru vody vyprodukovat energii ekvivalentní 300 litrům benzínu; energetickou potřebu České republiky by mohlo deuterium z Máchova jezera krýt po dobu zhruba 100 let. Celosvětové zásoby paliva pro fúzní elektrárny by lidstvu vystačily na desítky milionů let. Vzhledem k jejich téměř rovnoměrnému geografickému rozložení se fúze může stát budoucím globálním zdrojem energie.

Pro první generaci fúzních elektráren se počítá s využitím izotopu vodíku tritia <sup>3</sup>H (jádro obsahuje dva neutrony) jako druhé části paliva. Radioaktivní tritium (poločas rozpadu<sup>11</sup> 12,3 roku)

11 Doba, za kterou se rozpadne polovina všech atomů radioaktivní látky.

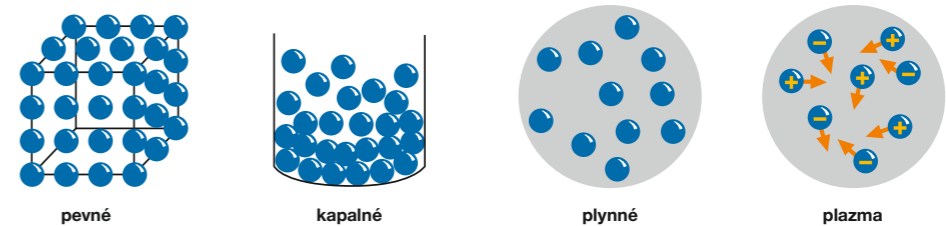


Ač na pohled působivá, není přehradní nádrž plná energie vody řešením

by se však vyrábělo z lithia přímo ve fúzním reaktoru a tam by se slučovalo na stabilní vzácný plyn helium. Jinými slovy, termojaderný reaktor by během doby provozu nevyžadoval žádný transport radioaktivního paliva ať už dovnitř, nebo ven z elektrárny. Fúzní reaktor, na rozdíl od reaktoru štěpného, bude takzvaně vnitřně, to je principiálně, bezpečný. Zatímco ve štěpném reaktoru jsou přítomny desítky tun štěpného materiálu, hmotnost fúzního paliva přítomná v daný moment v reaktoru se počítá na gramy a postačí pro jaderné hoření jen na několik desítek sekund! Při jakékoli poruše se palivo rychle ochladí a slučovací reakce skončí. Výbuch reaktoru je tedy zásadně vyloučen. Jistě, konstrukční materiály reaktorové komory budou aktivovány energetickými částicemi, zejména neutrony. Aktivaci materiálů však lze jejich vhodnou volbou snížit na minimum tak, aby je nebylo nutné uchovávat v trvalých úložištích radioaktivních materiálů. Již dnes se uvažuje o uložení sekundárně radioaktivních konstrukčních materiálů pouze na desítky let (oproti statisícům let při ukládání použitého paliva štěpných

jaderných elektráren). Vedle neutronu je dalším produktem fúzních reakcí jádro helia, které není radioaktivní. Helium je vzácný plyn, nepodílí se na skleníkovém efektu a z vyšších vrstev atmosféry Země je unášeno tzv. slunečním větrem do mezihvězdného prostoru. Helium rovněž vyvěrá z hlubin Země jako produkt alfa-rozpadu přírodních izotopů. Z ekonomického hlediska se jeví budoucnost termojaderných elektráren o předpokládaných výkonech 2 až 3 GW jako velmi slibná. Do celkové ceny energie se nejvíce promítnou investiční náklady. Ty však budou kompenzovány velmi nízkou cenou paliva a předpokládanou, desítky let dlouhou, dobou životnosti elektráren. S přesným vyčíslením nákladů se však musí počkat až na zkušenosti s plánovaným experimentálním reaktorem (tokamak ITER o fúzním výkonu 500 až 700 MW), na který má navázat demonstrační elektrárna DEMO o elektrickém výkonu kolem 1 GW). Existuje mnoho cest, kudy se může naše civilizace v budoucnosti ubírat. Vzhledneme-li ke hvězdám, jejichž světlo a teplo jsou nezbytnými podmínkami pro život, spatříme jednu z nich – termojadernou fúzi.

# PLAZMA A PRINCIP TERMOJADERNÉ FÚZE



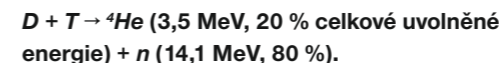
Skupenství hmoty: plazma je čtvrtým skupenstvím hmoty.

Elektrárny spalující fosilní paliva, vodní, větrné a sluneční elektrárny – ty všechny využívají energii, kterou na Zemi vyzářilo Slunce. Budoucím termojaderným elektrárnám Slunce slouží pouze jako vzor, jako inspirace. Termojaderné elektrárny budou, podobně jako štěpné atomové elektrárny, využívat energii jadernou. Jadernou energii lze uvolnit dvěma způsoby. Štěpením jader těžkých prvků, nebo slučováním jader prvků lehkých. Klidová hmotnost nukleonu<sup>12</sup> nese informaci o potenciální (jaderné) energii, stejně jako výška vody v přehradní nádrži odpovídá potenciální (gravitační) energii.

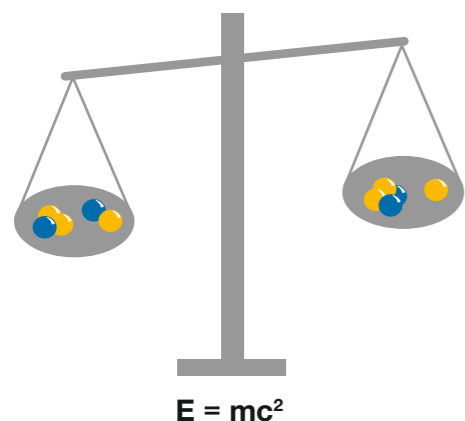
Zatímco při přeměně potenciální na kinetickou energii vody řítící se do turbíny pomáhá gravitační síla, její úlohu při jaderných reakcích (vypouštění vody z přehrady) hraje přitažlivá jaderná síla. Jak při fúzi, tak při štěpné reakci nukleony „padají“ z úbočí křivky vyjadřující závislost průměrné hmotnosti nukleonu na hmotovém čísle (to je na celkovém počtu nukleonů – protonů a neutronů – v jádře) do míst s menší průměrnou klidovou hmotností. Podle Einsteinova slavného vztahu  $E = \Delta m \times c^2$  je úbytek hmoty  $\Delta m$  ekvivalentní uvolněné energii  $E$ , v tomto případě energii záření a pohybu

produktů reakce ( $c$  je rychlost světla ve vakuu). Záření a kinetická energie je právě onou uvolněnou jadernou energií. Z obrázku je zřejmé, že slučování lehkých jader je mnohem účinnější než štěpení jader těžkých. Zatímco existují štěpné reakce, při nichž se jádra těžkých prvků rozpadají samovolně, opačný příklad, kdy se spontánně slučují jádra lehkých prvků, asi na Zemi nenajdeme. Na Slunci ovšem probíhá jaderná fúze již hezkou řádku let a věřme, že hned tak nepřestane. Jinak by musel život na Zemi vyhlásit velmi rychle bankrot. Aby došlo ke sloučení jader a aby začala působit přitažlivá jaderná síla, je třeba je přiblížit na vzdálenost  $10^{-14}$  m a před tím překonat elektrostatickou odpudivou sílu souhlasně nabitých jader. To je možné tak, že jádra srážíme dostatečnou rychlostí, kterou jim udělíme buď urychlovačem, či zahřátím na takzvanou zápalnou teplotu. Pro průmyslový způsob uvolňování jaderné energie slučováním má význam druhý způsob. Snažit se využívat energii uvolněnou pomocí lineárního urychlovače nemá smysl, neboť vstupní energie nebude nikdy menší než energie výstupní. Většina energie urychleného svazku se totiž vždy spotřebuje na zahřívání terčíku v důsledku Coulombických (tj. elektrických) srážek, které jsou mnohem pravděpodobnější než srážky jaderné. Jaderných reakcí, při nichž se jádra slučují, existuje celá řada. Ovšem pouze jedna má zápalnou teplotu nejnižší. Tou je reakce těžších izotopů vodíku – deuteria a tritia, krátce D-T reakce:

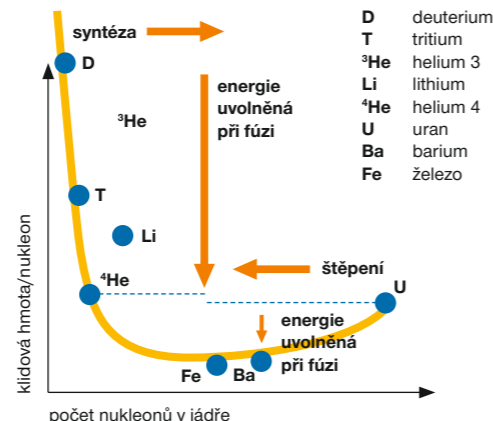
Hmota zahřátá dokonce i na tuto nejnižší zápalnou teplotu, tedy na zápalnou teplotu D-T reakce, se nachází ve stavu, kdy jsou všechny atomy ionizované. Jinými slovy, záporně nabitě elektrony a kladně nabitě ionty se pohybují „nezávisle“. Tento stav hmoty se nazývá plazma, v tomto zvláštním případě plazma plně ionizované. Název zavedl v roce 1928 Irving Langmuir, když mu chování a vzhled kladného sloupce ve výboji připomnělo krevní plazmu (jak kladný sloupec, tak krevní plazma přepravují částice). Možný je i druhý výklad. Řecky „plasma“ znamená „tvarovat, formovat“, tak jak to dokáže výboj v plynu, když se přizpůsobuje různě zohýbané výbojové trubici. Čeština na rozdíl od jiných jazyků odlišuje plazmu krevní a plazma – ionizovaný plyn – mluvnickým rodem. První plazma je rodu ženského, plazma, o které se v naší publikaci zajímáme, rodu středního. „To“ plazma je tedy, hrubě řečeno, soubor atomů v nejrůznějším stupni ionizace vykazující kolektivní chování a navenek elektrickou neutralitu. Za kolektivní chování jsou zodpovědné síly dalekého dosahu (elektrické a magnetické) a za neutralitu stejný počet kladných a záporných nábojů. Toto plazma je médiem pro termojaderné reakce. Matematický popis plazmatu není jednoduchá záležitost. Na model používaný u urychlovačů, tedy pro studium trajektorií jednotlivých částic, je plazma příliš husté, na druhé straně zvolit pro popis plazmatu model tekutiny není vždy trefou do černého – plazma na to může být příliš řídké. Fyzikové proto často používají statistický popis pomocí rozdělovací funkce rychlostí, tzv. kinetickou teorii. Nicméně



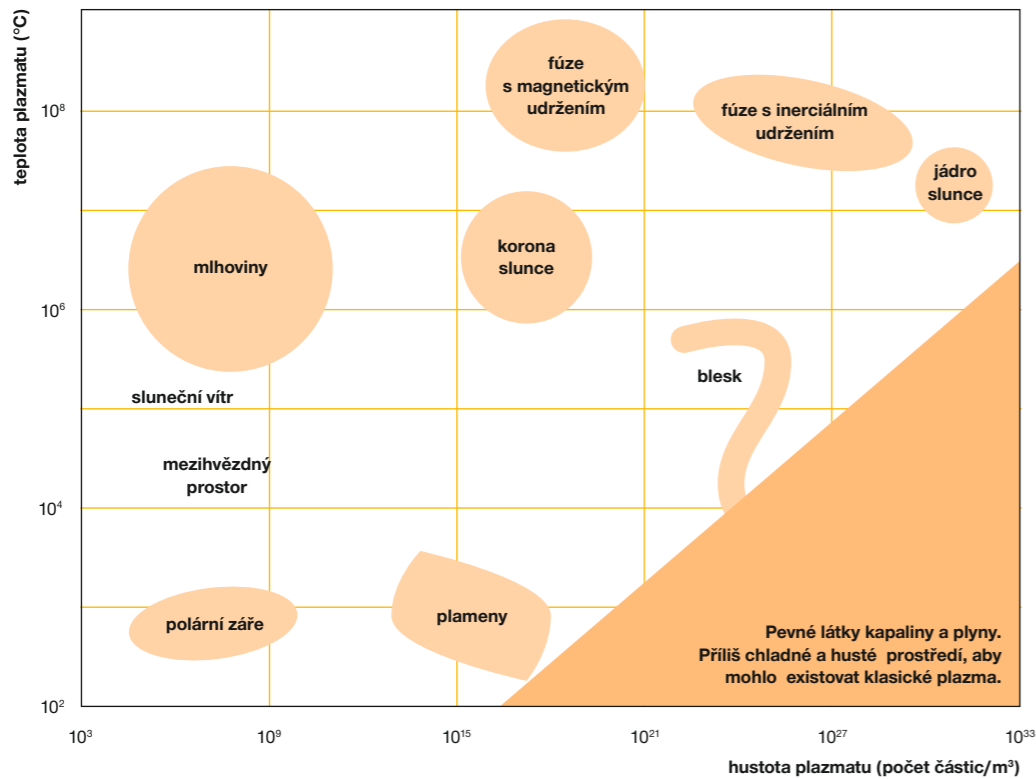
12 Nukleon – společný název pro proton a neutron – je částice tvořící jádro atomu.



Celková hmotnost produktů reagujících (jádra deuteria a tritia) je větší než celková hmotnost výsledných produktů (jádro helia, neutron). Rozdíl hmotnosti je skryt v pohybové energii výstupu – viz rovnici na str. 23.



Závislost průměrné klidové hmotnosti nukleonu v jádře na počtu nukleonů v jádře: pád do údolí ať už zleva (fúze), nebo zprava (štěpení) vede k uvolnění jaderné energie. Účinnější je syntéza!



Různé druhy plazmatu umístěné do grafu podle jejich hustoty (vodorovná osa) a teploty (svislá osa)

pro některé případy jednočásticové přiblížení stačí. Pro pochopení následujících kapitol uvedeme v několika větách základní zákonitosti pohybu nabitých částic v homogenním elektrickém a magnetickém poli. Elektricky neutrální částice změni směr a velikost své rychlosti teprve při srážce s jinou částicí. Elektricky nabitá částice v elektrickém poli je urychlována ve směru nebo proti směru elektrických siločar. Kladný iont je urychlován od anody ke katodě a elektron od katody k anodě. V magnetickém poli bez působení vnějších sil se nabitá částice pohybuje podél magnetických siločar volně – magnetické pole „nevnímá“. Ve směru kolmém na směr magnetických siločar se pohybuje po kružnici, jejíž poloměr je nepřímo úměrný intenzitě magnetického pole. Elektrony se pohybují opačným směrem než kladně nabití ionty a poloměr „jejich“ kružnice je menší než u hmotnějších iontů. Kolmo k mag-

netickému poli se nabitá částice může pohybovat pouze díky srážce s jinou částicí, která střed kružnice jejího pohybu posune na jinou magnetickou siločaru. V případě mnoha částic se místa s různou hustotou homogenizují pohybem zvaným difúze. Za normálních okolností je rychlost difúze napříč magnetickým polem nepřímo úměrná druhé mocnině intenzity magnetického pole. Zajímavé je, že při pohybu podél magnetického pole srážky pohyb částice brzdí, při pohybu napříč magnetickým polem jsou srážky naopak nezbytnou podmínkou difúze. Plazma – ionizovaný plyn – bývá nazýváno čtvrtým skupenstvím hmoty a hraje klíčovou roli v celé řadě důležitých procesů jak v přírodě včetně vesmíru, tak ve vyspělých technologiích. Chování hmoty ve stavu plazmatu je zcela odlišné od chování ostatních tří skupenství. Ač více než 99 % známého vesmíru je ve stavu plazmatu, na Zemi je plazma výjimkou.

## MAGNETICKÉ A INERCIÁLNÍ UDRŽENÍ

Podmínkou, aby termojaderná reakce vyprodukovala více energie, než je třeba k vytvoření plazmatu a jeho ohřevu, náhradě ztrát zářením a únikem částic z plazmatu, jsou určité požadavky na hustotu plazmatu  $n$  a teplotu plazmatu  $T$ , respektive na dobu udržení jeho energie  $t_E$ . Za předpokladu, že zdrojová termojaderná energie a ztrátová energie záření a unikajících částic jsou vráceny do tepelného cyklu s účinností nepřevyšující 33 %, odvodil v roce 1955 J. D. Lawson kritérium, které se podle autora nazývá Lawsonovo. Pro syntézu deuteria s tritiem (D-T reakci) při teplotě iontů  $T_i \approx 2 \times 10^8$  °C platí:

$$n t_E \geq 0,5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}.$$

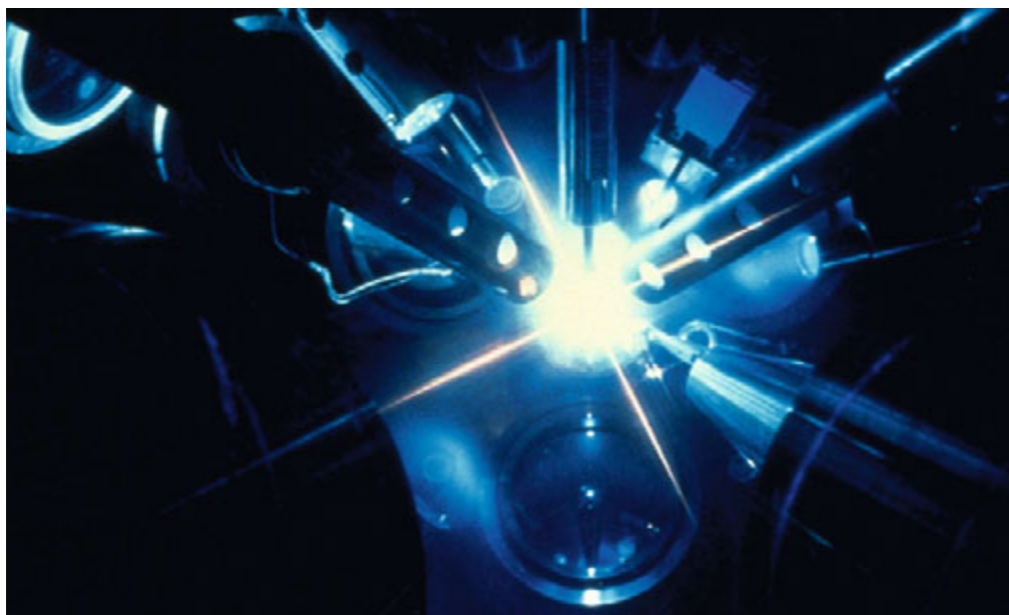
Zajímavé je, že kritérium publikoval Lawson (v časopise) až v roce 1957, kdy byl výzkum termojaderné fúze v USA odtajněn. Zajímavé proto, že nezávisle na něm o kritériu pro D-D reakci hovořil L. A. Arcimovič na Symposiu o elektromagnetických jevech v kosmické fyzice (Symposium on Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics) v roce 1956 ve Stockholmu. Nicméně priorita byla přiznána Lawsonovi, protože kritérium publikoval, ač v důvěrném dokumentu, už v prosinci 1955. Z kritéria pak vyplývají dva základní způsoby jak dosáhnout kladného zisku termojaderné reakce. Zhruba řečeno, buď velkou hustotou ( $\approx 10^{31} \text{ m}^{-3}$ ) a krátkou dobou udržení ( $\approx 10^{-10} \text{ s}$ ), nebo malou hustotou ( $\approx 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ) a dlouhou dobou udržení (několik sekund). První typ se nazývá inerciální udržení a druhému se říká udržení magnetické.

Inerciální udržení proto, že horké plazma, ve kterém má nastat termojaderná reakce, není drženo žádným vnějším silovým polem a reakce musí proběhnout včetně ohřevu dřive, než se objem plazmatu vlastním tlakem rozletí do prostoru. To, že doba mezi ohřevem následovaným reakcí a rozpadem není nulová, je dáno obecnou vlastností hmoty – inercií či setrvačností. Inerciální fúze je vlastně miniaturní výbuch vodíkové bomby. K tomu, aby bylo možno udržet uvolněnou energii ve vakuové nádobě přiměřené velikosti (např. v kouli o průměru 10 m), musí být uvolněná energie relativně malá. Typicky se uvažuje o energii 340 MJ, která se rovná energii uvolněné při výbuchu 75 kg TNT<sup>13</sup>. Tato energie se uvolní, pokud slučování deuteria a tritia proběhne v 1 mg paliva. Přitom



J. D. Lawson publikoval v roce 1955 (tajný dokument) a v roce 1957 (časopis) základní kritérium pro energeticky ziskový termojaderný reaktor.

13 Trinitrotoluen – běžná (vojenská) trhavina



energetické zesílení reakce, dané poměrem energie 17,6 MeV uvolněné při syntéze deuteria a tritia k energii 30 keV potřebné k ohřátí paliva na zápalnou teplotu kolem 60 milionů kelvinů, je v ideálním případě  $Q = 580$ .

Vzhledem k výše uvedenému omezení množství paliva plyne z Lawsonova kritéria, že směs deuteria a tritia musí být stlačena při inerciální fúzi na hustotu  $200 \text{ gcm}^{-3}$ , tj. asi na hustotu tisíckrát větší, než je hustota paliva v pevné fázi. K dosažení vysoké hustoty paliva se při inerciální fúzi používají slupkové kulové terče (pelety) o průměru několika milimetrů. Energie je pohlcena na vnější straně slupky, povrchová část je odpařena a expanduje do vakua. Na opačnou stranu se šíří tlaková vlna, která urychlí neodpařenou část slupky směrem ke středu terče. Ze zákona akce a reakce lze odvodit maximální rychlost imploze, která může dosáhnout až několika tisíc kilometrů za sekundu. Při implozi stlačuje neodpařená část slupky palivo, které je uvnitř buď ve formě plynu nebo ještě lépe ve formě pevného ledu. Kinetická energie slupky se mění na vnitřní energii paliva. Pokud by komprese byla ideálně symetrická, došlo by ve středu imploze v okamžiku dosažení maximální hustoty paliva k prudkému zahřátí jeho malé

části. Přesáhne-li tato teplota zápalnou teplotu, palivo se vznítí a vlna termojaderného hoření se šíří do zbytku paliva.

Problémem tohoto schématu jsou extrémní požadavky na symetrii, respektive homogenitu terče a absorpci energie na jeho povrchu. Každá odchylka od kulové symetrie je totiž při implozi zesilována v důsledku Rayleigh-Taylorovy nestability. V praktickém životě tato nestabilita způsobuje vyprázdnění sklenice obrácené dnem vzhůru, ačkoli atmosférický tlak je dost velký na to, aby kapalinu ve sklenici udržel. Už dnes lze v současných zařízeních dosáhnout požadovaných hustot paliva  $200 \text{ gcm}^{-3}$ , ale vzrůst teploty uprostřed terče je podstatně menší než očekávaný v důsledku turbulentního<sup>14</sup> promíchání paliva.

Energie může být dodána do terče buď přímo z vnějšího impulzního zdroje energie (přímo zapalovaná fúze), nebo jako energie měkkého rentgenového záření, na kterou je energie vnějšího zdroje přeměněna v materiálu o vysokém atomovém čísle (nepřímo zapalovaná fúze). Výhodou přímo zapalované fúze je lepší účinnost přeměny energie vnějšího zdroje na kinetickou

<sup>14</sup> Vírového (chaotického)



Inerciální udržení – dutina zvaná hohlraum pro experiment s nepřímo zapalovanou fúzí

Inerciální udržení – světelné svazky laseru míří na terčik termojaderného paliva (protější strana).

energii implodující slupky. Výhodou nepřímo zapalované fúze jsou podstatně menší požadavky na kvalitu (homogenitu, symetrii) vnějšího zdroje energie. Nepřímo zapalovaná fúze je do určité míry oním miniaturním modelem vodíkové bomby, proto má i významné vojenské aplikace. Nepřímo zapalovaná fúze byla pravděpodobně uskutečněna kolem roku 1985 v americkém experimentu Halite/Centurion, kde bylo použito rentgenového záření z pokusného podzemního jaderného výbuchu. Detaily tohoto experimentu jsou z pochopitelných důvodů utajeny, nicméně v informovaných amerických vědeckých kruzích panuje jistý optimismus o uskutečnitelnosti nepřímo zapalované inerciální fúze a zřejmě existuje i určitá představa o potřebné velikosti zdroje energie. Nejintenzivnějším zdrojem energie dostupným v laboratoři je dnes laser. Může totiž velmi rychle dodat velké množství energie do velmi malého objemu. Proto se idea inerciální fúze objevila brzy po sestrojení prvního laseru a laser se stal nejpoužívanějším nástrojem při jejím studiu. Záhy se zjistilo, že pro dlouhé vlnové délky a vysoké intenzity laserového záření je většina energie laseru transformována na energii malého množství rychlých elektronů, které předehřejí palivo

a zabráni tak jeho stlačení. Proto se přestal užívat jinak výhodný plynový  $\text{CO}_2$  laser s vlnovou délkou  $10,6 \mu\text{m}$  a záření nejpoužívanějšího pevnolátkového neodymového laseru o vlnové délce  $1,054 \mu\text{m}$  (blízká infračervená oblast) se obvykle mění na třetí harmonickou frekvenci<sup>15</sup>  $0,351 \mu\text{m}$  (blízká ultrafialová oblast), což lze i u velkých laserů provést s účinností lepší než 60 %. I tak je užívaná intenzita laserových svazků fokusovaných na terč obvykle menší než  $10^{15} \text{ Wcm}^{-2}$ . Používané laserové impulzy mají délku několika nanosekund.

Z hlediska výzkumu inerciální fúze jsou Nd lasery nejuspěšnějšími nástroji. Intenzivně se zkoumají možnosti jak podstatně zvýšit zisk  $Q$  při stejné energii laseru. Homogenizace laserových svazků a symetrizace ozáření terče se dnes intenzivně zkoumá především na 30 kJ laseru OMEGA v LLE na univerzitě v Rochesteru v USA. Cílem je přímo zapalovaná fúze pro výrobu energie. S vynálezem výkonných femtosekundových laserů se objevila myšlenka rychlého zapálení fúze (Fast Ignition). Tyto lasery mohou dosáhnout výkonu až 1 PW v pulzu délky od 10 fs do 1 ps.

<sup>15</sup> Frekvence 3× větší (vlnová délka 3× menší) než základní

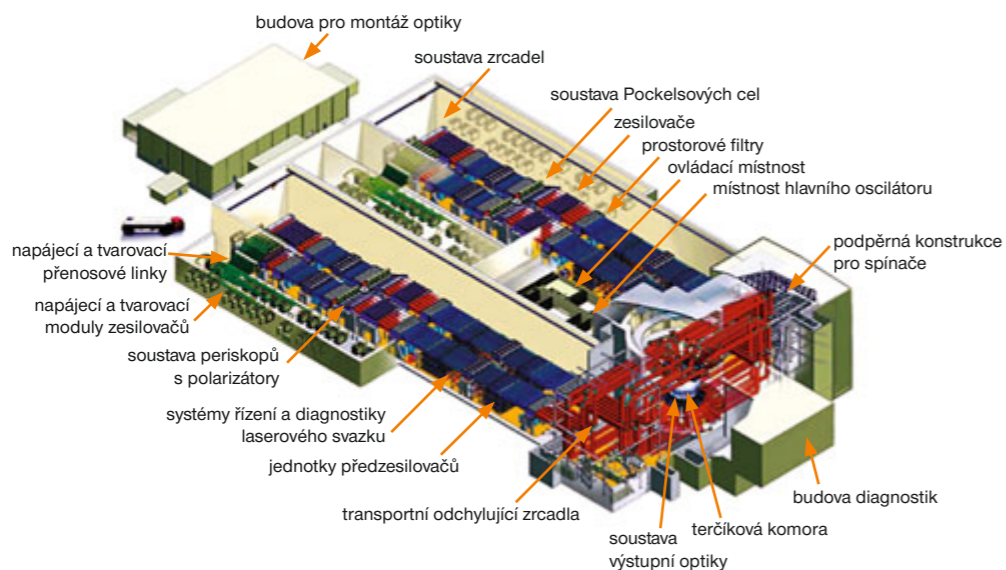


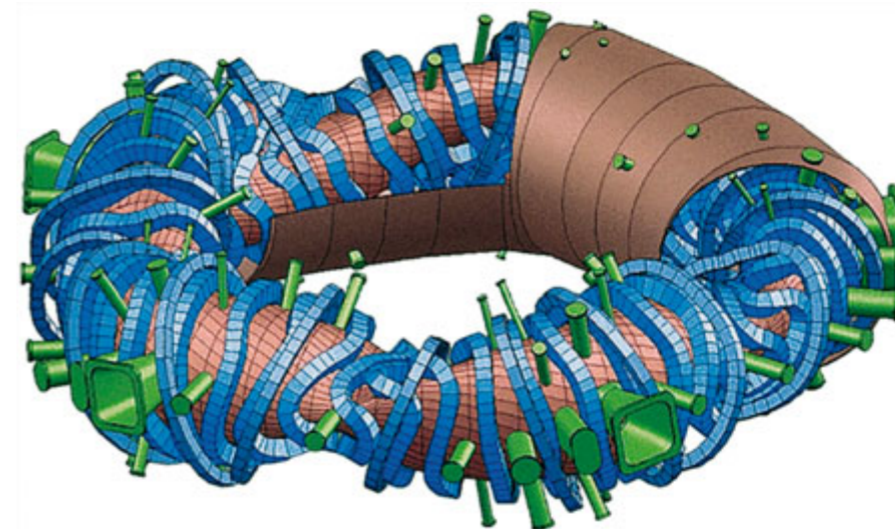
Schéma Národního zapalovacího zařízení (NIF), které je v Lawrenceově livermorské národní laboratoři a bylo dokončeno v roce 2010. Budova obsahuje lasery a veškerá podpůrná zařízení nutná k tomu, aby zařízení dodávalo laserové pulzy o energii 1,8 milionu joulů (MJ) a špičkový výkon 500 bilionů wattů, tj. milion milionů (TW) na terčík pro inerciální fúzi umístěný v terčíkové komoře.

Pokud se podaří dopravit energii femtosekundového laseru do paliva stlačeného na potřebnou hustotu nanosekundovým laserovým pulzem, bude možno zapálit termojaderné hoření při podstatně menších energiích laseru. Poněvadž lze poměrně snadno upravit jeden nebo několik svazků velkých Nd laserů na generaci intenzivních femtosekundových pulzů, je tato myšlenka usilovně zkoumána na laseru Gekko XII v japonské Ósace a na laseru VULCAN ve Spojeném království. Z dalších metod přichází v úvahu i zapálení nepřímo zapalované fúze v z-pinči – impulzním výboji, ve kterém se oblast s velmi vysokou proudovou hustotou komprimuje vlastním magnetickým polem.

V současné době v oboru inerciální fúze věnuje největší pozornost odborní i laická veřejnost velkému experimentálnímu zařízení NIF (National Ignition Facility – Národní zapalovací zařízení), které bylo právě dobudováno v Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) v USA. Již samotný název NIF napovídá, že právě zde by se poprvé v historii mělo podařit „zapálení“ terčíku pomocí laserového systému, který je největší na světě. Experimenty

již byly zahájeny a je možné, že ten přelomový, se zapálením, přijde již v roce 2012. V případě úspěchu bude předpokládán fúzní zisk (poměr uvolněné fúzní energie k energii laserového světla absorbovaného terčíkem) „pouze“ kolem  $Q = 10$ , čili shodou okolností stejný zisk jako má mít ITER. K dosažení takového cíle má NIF celkem 192 velkých neodýmových laserových tras, které společně mohou zaměřit na cíl celkem 1,8 MJ energie ve světelném pulzu, jehož výkon odpovídá během několika nanosekund neuvěřitelným 500 bilionům wattů (obvyklý elektrický výkon všech elektráren světa je více než stokrát menší!). NIF bude pracovat na principu nepřímo zapalované fúze, terčem laserového světla tedy bude zlatá dutinka, v jejímž centru je drobná deuterio-tritiová kulová peleta. Dutinka se pod působením laserového pulzu okamžitě vypaří a dá vzniknout rentgenovému záření, které by mělo peletu stlačit a vést k její termojaderné explozi.

Velmi obdobný systém pod názvem Laser Mégajoule (LMJ) je v poslední fázi výstavby nedaleko Bordeaux ve Francii – a nejde o náhodu, Francie podobně jako USA patří k jaderným



Velký soupeř tokamaku – stellarátor – zaznamenal v poslední době úspěch. Komoře projektovaného největšího stellarátoru na světě – Wendelstein W7-X.

mocností jak v mírových, tak ve vojenských aplikacích. Po dokončení bude LMJ bezkonkurenčně největším evropským laserovým systémem, s 240 trasami neodýmových laserů a s celkovou energií v laserovém pulzu 1,8 MJ, tedy stejně jako NIF. Obě střediska, NIF a LMJ, při svém výzkumu také poměrně úzce spolupracují. Celý systém LMJ má být uveden do provozu nejdříve v roce 2012.

Ve stínu těchto obrovských experimentálních investic se odborníkům z oboru inerciálního udržení jen s obtížemi prosazuje další projekt, a to experiment s tzv. rychlým zapálením známý pod zkratkou HiPER (High Power Energy Research facility). HiPER má využít vedle tradičního laseru, který během nanosekund zkomprimuje palivo, i poslední výkřik techniky – laser s ještě kratším (pikosekundovým) a tím pádem i intenzivnějším světlem, které má zkomprimovaný terčík zapálit<sup>16</sup>. Vědci jsou přesvědčeni, že se díky této kombinaci podaří zažehnout palivo ve peletu menším, a tedy i výrazně levnějším

systémem laserů. Takový způsob zapálení je ovšem z hlediska atomových zbraní nezajímavý, projekt je proto zcela závislý na financování ze zdrojů pro mírový výzkum. Vybudování HiPER (na kterém se má podílet i naše země) směřuje do Spojeného království, kde byl ovšem vzhledem k finanční situaci pozastaven. Je pravděpodobné, že v případě úspěchu NIF jeho podpora opět ožije.

V této souvislosti nelze nezmínit ani další projekt velmi výkonného pikosekundového laseru, kterým je ELI (Extreme Light Infrastructure), přestože jeho příspěvek k výzkumu inerciální fúze bude nejspíš zanedbatelný. ELI má ostřelovat nepředstavitelně krátkým (attosekundovým) a extrémně intenzivním světlem (s výkonem v řádu exawattů, tj. trilionu wattů) nejrůznější terče, a tím umožnit základní i aplikovaný výzkum chování hmoty při extrémních hustotách a tlacích. Pro nás tím nejradostnějším je, že ELI má být vybudován v Dolních Břežanech u Prahy, a to zhruba do roku 2015.

<sup>16</sup> Pikosekundový pulz je velmi krátký i doslova – rychlost světla krát doba trvání pulzu dává jeho délku, která tak vychází pro 10 ps laser jen tři milimetry! Těmto laserům se říká též „petawattové“, protože výkon pulzu je po dobu 10 milisekund v řádech petawattů, čili ještě o několik řádů vyšší než (v čase delší) výkon laserů NIF.

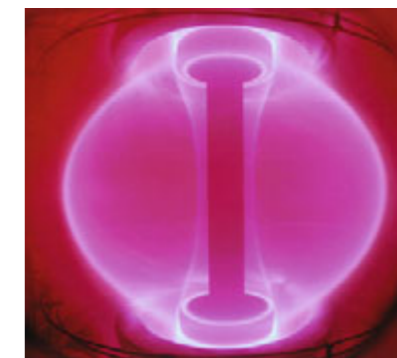


I to je magnetické udržení – magnetická past GOL-3-II v pozadí s generátorem elektronového svazku U2 v novosibirském Budkerově Ústavu jaderné fyziky.

Zatím se zdá, že inerciální fúze je mnohem dále od demonstrace k energetickému využití než magnetické udržení. Účinnost velkých pevnolátkových laserů je menší než 1 % a opakovací frekvence je menší než jeden výstřel za hodinu. Chceme-li využít energii inerciální fúze, bylo by třeba několika výstřelů za sekundu a účinnosti větší než 10 %. V principu lze těchto parametrů dosáhnout i Nd lasery. K čerpání laseru je však třeba použít místo výbojek drahé LED diody. Cena laseru by tak zatím o mnoho řádů převyšovala nejvyšší ekonomicky možné náklady, a proto se dnes zkoumají jiné impulzní zdroje energie. Z laserů přichází v úvahu vyvíjený excimerový laser na bázi fluoridu kryptonu. Dostatečného výkonu při relativně nízké ceně urychlovače mohou dosahovat svazky nabitých částic. Obtížně fokusovatelné elektronové svazky vypadly hned v první etapě. Možnost použít svazky lehkých iontů se dosud zkoumá, ale potíže s jejich transportem a fokusací na terč zatím mnoho optimismu nevzbuzují. Z dnešního hlediska se jeví jako nejpravděpodobnější pro budoucí energetické využití svazky těžkých iontů. Zdá se, že mohou splnit všechny požadavky. Jejich použití se však studuje zatím výhradně teoreticky. Nemá totiž smysl provádět experimenty na malém urychlovači těžkých iontů, a proto je třeba již do prvního zařízení

investovat více než miliardu dolarů. Výstavba takového zařízení se odkládá do okamžiku, kdy bude inerciální fúze demonstrována pomocí laserů. Na druhé straně má inerciální fúze výhodu, že nejdražší a nejsložitější část zařízení (laser nebo urychlovač) stojí daleko od interakční komory, a je tudíž chráněna před radioaktivním zářením. Samotná interakční komora bude relativně jednoduchá, a proto problémy s materiály vystavenými silným neutronovým tokům budou pravděpodobně podstatně menší než u magnetického udržení. Další výhodou výzkumu inerciální fúze je mnohostranné použití budovaných velkých zařízení. Velmi významné jsou vojenské aplikace, a proto je i výstavba laseru NIF placena z programu údržby strategického arzenálu amerických jaderných zbraní. Zařízení se ale používají i pro základní výzkum systémů s vysokou hustotou energie, např. jejich stavové<sup>17</sup> rovnice, a dalších vlastností materiálů při extrémních tlacích přítomných v jádrech planet a hvězd. Řada experimentů slouží přímo jako modely různých astrofyzikálních jevů, mluví se velmi často o laboratorní astrofyzice. Významná je i generace intenzivních rentgenových a čas-

<sup>17</sup> Rovnice udávající závislost vnitřních parametrů systému na teplotě a vnějších parametrech ve stavu termodynamické rovnováhy



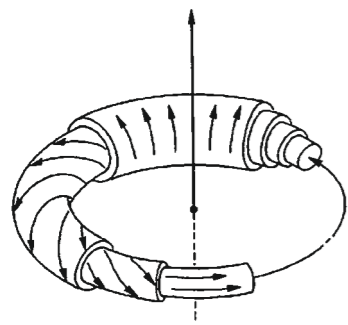
Vývoj v kulovém tokamaku START (Spojené království)

ticových svazků vhodných pro různé aplikace v biologickém a materiálovém výzkumu. Lze si představit i situaci, kdy bude inerciální fúze využita pro vývoj konstrukčních materiálů pro fúzní reaktor s magnetickým udržením, a to z hlediska jejich odolnosti vůči velkým neutronovým tokům. Vynakládání prostředků na velké laserové systémy je tedy účelné i v případě, že se nakonec inerciální fúze nebude využívat pro výrobu energie.

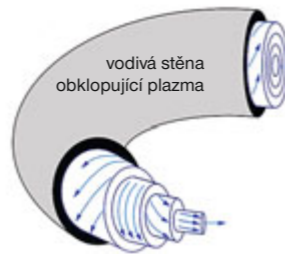
Současnou jedničkou razantně směřující k termojadernému reaktoru je magnetické udržení. Na rozdíl od inerciálního udržení se v tomto případě pracuje s vnějším magnetickým polem. Jak známo, pohyb nabitých částic (tedy i částic plazmatu) napříč siločarami magnetického pole je tímto polem ovlivňován, a to tak, že dráha nabitých částic se zakřivuje, až kolem směru siločar magnetického pole opiše kružnici. Čím silnější je magnetické pole, tím menší kružnice nabitých částic opisují a tím lépe jsou polem „drženy“. Napříč magnetickým polem se pak pohybují díky srážkám, které je posouvají na „sousední“ magnetické siločáry. Částice ve směru kolmém na směr magnetických siločar difundují tím hůře, jinými slovy tím lépe jsou magnetickým polem „drženy“ či izolovány, čím je méně srážek a čím je magnetické pole silnější. Ve směru podél magnetických siločar není pohyb nabitých částic homogenním magnetickým polem nijak ovlivňován. Pokud by se tedy vytvořila kolem nabitých částic taková konfigurace magnetického pole, aby se kterákoli unikající částice musela pohybovat kolmo na magnetické siločáry, byly by tyto částice drženy uvnitř jakéhosi hrnce jako

pára pod pokličkou. Až na to, že místo do stěn z kovu by částice narážely do stěn z magnetického pole. Při této úvaze zanedbáváme srážky mezi částicemi. I laika napadne, že tvarů magnetických nádob (tak se skutečně magnetickým hrncům říká) může být více. Magnetické pole nádob se zásadně vytváří elektrickým proudem, který teče pevným vodičem nebo přímo plazmatem. Jsou dva základní typy magnetických nádob: nádoby otevřené a nádoby uzavřené. Otevřené magnetické nádoby řeší únik částic podél siločar zvýšením intenzity magnetického pole na obou koncích nádoby. Nabitá částice „vidí“ zhuštění siločar jako zrcadlo a odráží se zpět do středu nádoby. Proto se těmto nádobám říká magnetická zrcadla (USA) nebo magnetické pasti (bývalý SSSR). Ovšem částice s dostatečně velkou podélnou složkou rychlosti nezastaví ani zrcadlo a z pasti uniknou. Vy-mýšlela se nejrůznější řešení, ovšem dokonalé ucpání otevřených konců magnetických zrcadel se nepodařilo. Přesto to byla právě magnetická zrcadla, která demonstrovala eliminaci zhoubné Bohmovy difúze. Byl to geniální nápad sovětského fyzika Abrama F. Ioffeho, který vybavil zrcadlo podélnými tyčemi protékajícími elektrickým proudem a vytvořil tak konfiguraci magnetického pole, kdy intenzita rostla všemi směry – nejen axiálně, ale i radiálně. Tento objev se později uplatnil i v uzavřených magnetických nádobách. Ioffe za svůj objev obdržel od Američanů Fordovu cenu, ale politbyro – vedení KSSS – mu nakázalo cenu odmítnout. Nic netušící kolegy fyziky za „železnou oponou“ si tak Ioffe velmi rozzlobil. Na rozdíl od otevřených





Střížné pole při magnetickém udržení v toroidální komoře. Šipky označují směr siločar magnetického pole (stočení přehnáno).



Střížné pole v pinči s reverzním magnetickým polem

nádob siločáry magnetického pole v uzavřených magnetických nádobách neopouští vakuovou komoru. Nabitá částice by tedy nikdy neměla opustit vymezený prostor. Ovšem nehomogenita magnetického pole po průřezu a odstředivá síla vedou k tzv. toroidálnímu driftu nabitých částic, a tím i k rychlému úniku plazmatu v radiálním směru na stěnu komory. Řešením je tzv. šroubovicové pole, které je součtem toroidálního pole vnějších cívek a poloidálního pole proudu plazmatem. Po průřezu se mění stoupání šroubovicového pole, tzv. střížné pole, pak potlačuje nestability. Siločáry střížného magnetického pole si můžeme představit jako nitě navíjené na váleček, přičemž stoupání při závitu se mění – klesá se vzdáleností od osy válečku. Zatímco na ose válečku je „navíjená“ nit totožná s osou válečku, na povrchu téměř celý „závit“ leží v rovině kolmé na osu válečku. Nabitá částice se v takovém střížném magnetickém poli pohybuje tak, že se zmíněný drift eliminuje. Základními typy uzavřených nádob jsou tokamaky, stelarátory a toroidální pinče. Tokamaky k vytváření potřebného magnetického pole využívají složení pole vnějších magnetických cívek a 100× slabšího magnetického pole proudu tekoucího v plazmatu, střížné pole stelarátorů je tvořeno pouze vnějšími cívkami. Požadovaná konfigurace cívek stelarátoru může vést k zvláštnímu tvaru komory (např. ve tvaru osmičky) nebo samotných cívek. Vzhledem k tomu, že proud v plazmatu tokamaku se buď induktivně (tokamak není nic jiného než

transformátor s jediným závitem, plazmatickým provazcem v sekundárním vinutí), jedná se principiálně o impulzní zařízení. Uvidíme později, že i tokamaky mohou pracovat stacionárně, ovšem pouze „s dodatečnou výbavou“. Naproti tomu uspořádání stelarátoru umožňuje práci ve stacionárním režimu, navíc v plazmatu stelarátoru neteče elektrický proud a stelarátor tak nezná obtíže s tzv. proudovými nestabilitami. Bohužel se ve stelarátorech dlouho nedařilo odstranit Bohmovu difúzi a vzhledem k problémům s ohřevem plazmatu (stelarátorům chyběl účinný počáteční ohřev Jouleovým teplem) získaly tokamaky před stelarátory náskok. Proto také mezinárodní experimentální termojaderný reaktor ITER bude postaven na principu tokamaku. Pravdou je, že s mohutným vývojem výpočetní techniky za zády se podařilo navrhnout a vyrobit takové tvary cívek magnetického pole a dosáhnout takové přesnosti jejich instalace, že doba udržení energie vyhlíží slibně i na stelarátorech. V Greifswaldu na severu Německa staví Institut für Plasma Physik se sídlem v Garchingu za přispění Evropské unie stelarátor Wendelstein W7-X o rozměrech srovnatelných s velkými tokamaky. Jinými slovy, nikde není psáno, že termojaderná elektrárna bude fungovat pouze a jenom na principu tokamaku. V současné době je největším stelarátorem na světě japonský LHD (Large Helical Device) v laboratoři Toki, který se „pyšní“ dobou udržení 0,1 až 0,3 s, což je o 50 % více, než „povoluje“ empirická extrapolace výsledků dosavadních stelarátorů.

## PRINCIP TOKAMAKU

Tokamak (zkratka ruských slov: **TO**roidalnaja **KA**mera i **MA**gnitnyje **K**atuški – toroidální komora a magnetické cívky) je jedním z nejslibnějších typů zařízení pro uskutečnění řízené termojaderné fúze, v budoucnu i stavby fúzní elektrárny. Jeho koncepce se zrodila v letech 1950–1952 v bývalém Sovětském svazu díky týmu slavného ruského fyzika Andreje D. Sacharova. Tokamak si můžeme představit jako dutou prstencovou komoru (nafouknutou automobilovou pneumatiku) naplněnou horkým vodíkovým plynem, která je obklopena magnetickými cívkami a transformátorovým jádrem. V tokamaku rozlišujeme dva význačné směry – toroidální a poloidální, a dva význačné poloměry – hlavní a vedlejší. Toroidální směr můžeme sledovat, vydáme-li se podél prstence,

zatímco v poloidálním směru bychom kroužili kolem komory v rovině kolmé na toroidální směr. Hlavní poloměr  $R$  je poloměrem prstence, tj. vzdálenost rotační osy celého prstence od osy komory. Vedlejší poloměr  $a$  je poloměr samotné komory. Tokamak patří mezi koncepce termojaderných zařízení s magnetickým udržením částic (paliva). Toroidální složka magnetického pole (o síle 1–10 tesel) je vytvářena magnetickými cívkami, poloidální složka je přibližně 100× menší a je indukována elektrickým proudem procházejícím vodíkovým plazmatem uvnitř komory. Obě složky dohromady tak vytvářejí střížné pole. Elektricky nabitě částice, které za vysokých teplot tvoří více než 99 % plazmatu, musejí sledovat siločivky tohoto pole – pohybují se po

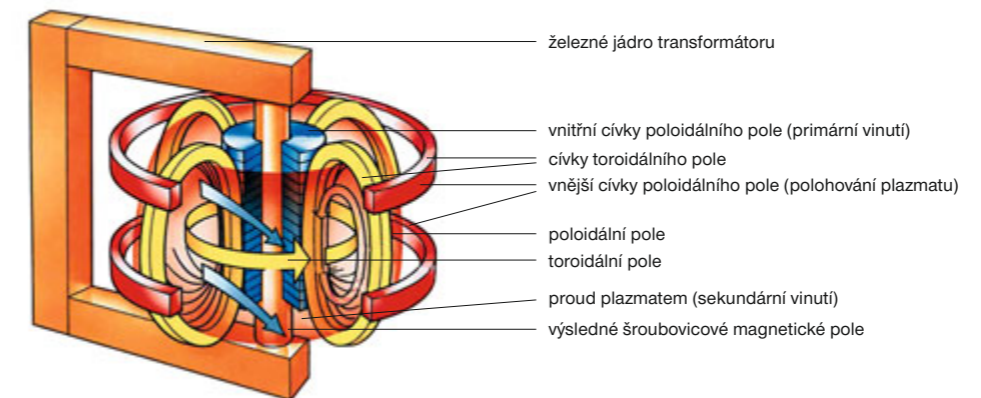


Schéma tokamaku



Německý tokamak TEXTOR v Jülichu slouží ke studiu vzájemného působení plazmatu a stěn komory.

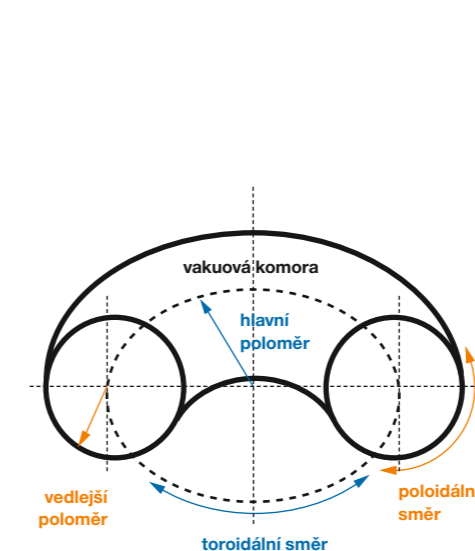
magnetických povrchů a nemohou tak unikat na stěny komory. Poloha horkého plazmatu uprostřed komory musí být kontrolována stabilizačními poloidálními cívkami nataženými podél prstence. Tepelné ztráty v tradičních magnetických cívkách (tudíž i příkon do nich) jsou při generaci silných magnetických polí obrovské (např. JET potřebuje kvůli jejich chlazení malé chladicí věže, podobné elektrárenským). ITER proto použije supravodivé cívky (slitiny NbTi nebo Nb<sub>3</sub>Sn při teplotě 4,5 K = -268,6 °C), jejichž spotřeba elektrické energie je zanedbatelná.

Termojaderných teplot řádu stovek milionů stupňů potřebných k tomu, aby se jádra vodíku začala slučovat na helium za uvolnění velkého množství energie, se musí dosáhnout bezkontaktním ohřevem. Veškeré látky jsou totiž již při teplotách okolo deseti tisíc stupňů plynné. Tokamaky využívají princip transformátoru, kde komora s plynem tvoří jediný závit jeho sekundárního vinutí. Vybitím kondenzátorové baterie (jen u malých přístrojů, velké používají setrvačnické nebo přímo rozvodnou síť) do primárního vinutí se elektromagnetickou indukcí vybudí proud v sekundárním vinutí, kterým je plyn uvnitř prstencové komory. Díky značnému elektrickému odporu je vodíkový plyn rychle ohříván Jouleovým teplem ( $P = R \times I^2$ , kde  $P$  je uvolňovaný výkon,  $R$  je elektrický odpor plaz-

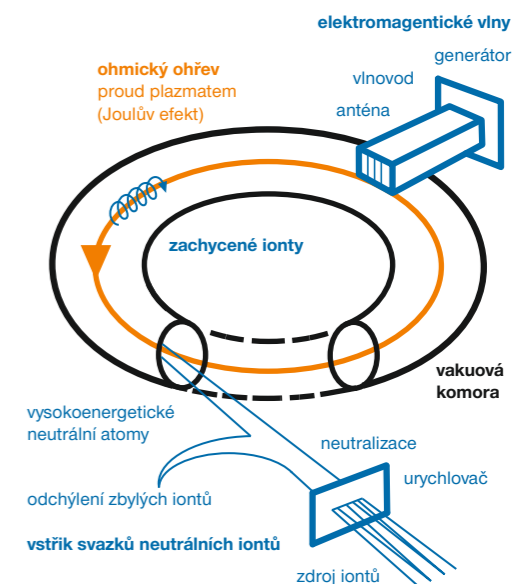
matického provazce a  $I$  je protékající proud). Během jediné milisekundy se dosáhne teploty milionů stupňů a zprvu jen slabě ionizovaný vodíkový plyn se změní v plně ionizované plazma tvořené směsí elektronů a atomových jader. Jak se vzrůstající teplotou klesá elektrický odpor plazmatu, začíná být induktivní ohřev neúčinný. Nastupují další metody ohřevu. Hojně využívané jsou metody založené na absorpci elektromagnetického vlnění v ohříváném médiu (ohřev „na“ cyklotronní<sup>18</sup> rezonanční frekvenci iontů v rozmezí 20–120 MHz a elektronů 70–200 GHz, nebo ohřev „na“ dolní hybridní<sup>19</sup> frekvenci 1–10 GHz), jejichž obdoba se uplatňuje i v domácnostech v mikrovlnných troubách.

Naprosto odlišným přístupem je vstřik neutrálních atomů vodíku s energií rovnou až stonásobku teploty plazmatu, které svoji energii předávají srážkami okolnímu plazmatu. Jakmile se podaří dosáhnout termojaderných teplot, začnou se vodíková jádra slučovat a část energie uvolňované fúzními reakcemi plazma ohřívá (samoohřev), podobně jako plazma ohřívá vstřikované částice v předchozím případě. A právě ve fúzních elektrárnách se vyjma krátkého okamžiku

18 Frekvence rotace nabitých částic kolem siločáry magnetického pole – viz Výkladový slovník  
19 Kombinace dvou charakteristických frekvencí plazmatu – viz Výkladový slovník



Dva význačné směry v komoře tokamaku: toroidální a poloidální



Tři metody vnějšího ohřevu plazmatu v tokamaku: základní ohmický a dodatečný s vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem, respektive se vstřikem svazku vysokoenergetických neutrálních atomů

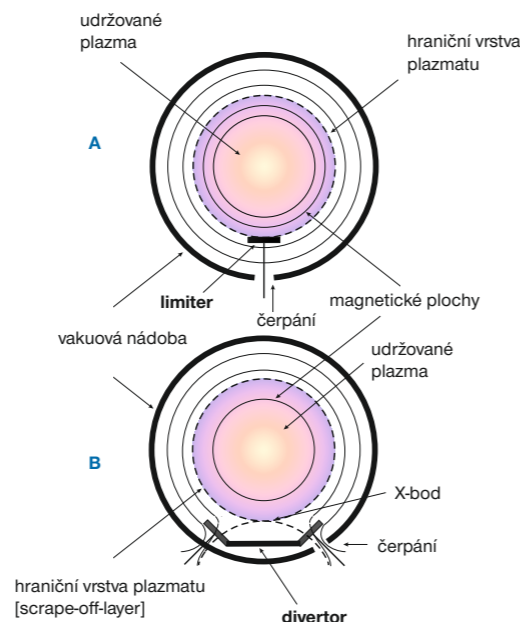
před zapálením fúzních reakcí vystačí pouze se samoohřevem<sup>20</sup>. Stejně jako když zapalujeme táborový oheň. Nejprve škrtneme sirkou a později již dřevo hoří „samo“. Zapálení termojaderné reakce tedy bude okamžik srovnatelný s činem bájněho Prométhea. Musíme jen věřit, že lidstvo nestihne hněv bohů, který byl hrdinovi odměnou. Podmínku fungování termojaderného reaktoru jako elektrárny na základě tepelné rovnováhy stanovuje Lawsonovo kritérium: fúzní součin, definovaný jako součin hustoty částic, jejich teploty a doby udržení energie, musí být větší než konstanta pro danou fúzní reakci, tj. fúzi uvolněný výkon musí pokrýt samoohřev i ztráty energie. Současný největší tokamak světa JET se blíží stavu vyrovnání produkované fúzní energie a energie spotřebované na ohřev ( $Q \approx 0,65$ , kde  $Q$  = termojaderný výkon/vnější příkon plazmatu). Splnění Lawsonova kritéria a stavu blízkému trvalému termojadernému „hoření“, by však měl dosáhnout až plánovaný tokamak ITER ( $Q > 10$ ).

I přes poměrně jednoduchý princip tokamaků bylo nutno vyřešit několik zásadních problémů. Předně, tokamak je z principu impulzní zařízení: transformátor je připojen ke zdroji stejnosměrného narůstajícího proudu a po čase dochází k nasycení transformátorového jádra nebo k proudovému přetížení primárního vinutí (u velkých tokamaků za 10 až 20 s). Proud plazmatem postupně vymizí, tím se změní konfigurace magnetického pole a částice plazmatu začnou rychle unikat na stěny komory odnášeje s sebou energii potřebnou ke slučování atomových jader. Plazma se rozpadá a vysokoteplotní výboj vyhasíná. Elektrárna by však měla do sítě dodávat v čase neměnný elektrický výkon. Technicky nejjednodušším, ale z hlediska spolehlivého provozu neperspektivním, řešením se zdá být rychlé přepólování transformátoru a s tím spojená změna směru proudu plazmatem (vyzkoušeno na JET při proudu 2 MA). Uvažuje se především o využití jiného mechanismu při zachování směru proudu,

20 Pro budoucí elektrárny se předpokládá určitý vnější ohřev jako prostředek zvyšující bezpečnost řízení.



Tokamak JET, vpředu zdroj neutrálních svazků pro ohřev plazmatu



Průřez komorou tokamaku (A) s limiterem, (B) s divertorem. Dva způsoby jak z plazmatu odvést nečistoty, zplodiny termojaderné reakce a nespálené palivo.

o tzv. neinduktivní generaci (vlečení) proudu. Směřované vysokofrekvenční elektromagnetické vlnění (dolní hybridní frekvence 1–10 GHz) vpuštěné do plazmatu zachytí elektrony a „vleče“ je na čele vlny, podobně jako mořská vlna nese surfaře. Tok elektronů podél prstence pak vlastně tvoří „vlečený“ proud plazmatem. Doby výboje s vlečením proudu se dnes běžně pohybují v řádech desítek sekund. Počítá se i se zajímavým efektem, zvaným „bootstrap current“, který probíhá automaticky díky rostoucímu tlaku plazmatu směrem do středu komory. Tento samobuzený proud v požadovaném toroidálním směru by mohl při vhodném režimu v budoucích tokamacích nést většinu elektrického proudu nutného k vytváření poloidálního pole. Dalším závažným problémem je odvod „spalin“ fúzních reakcí z tokamaku. Původní koncepce tokamaků s kruhovým průřezem komory a ohraničením plazmatu překážkou – limiterem (z materiálu snášejícího vysoké tepelné zatížení, např. molybden) – se touto otázkou příliš nezabývala. S prodlužováním délky výbojů, při-

bližování se k termojaderným teplotám a při zvyšování síly magnetického pole bylo nutné modifikovat komoru (mírné vertikální protažení průřezu komory do tvaru písmene D) a vytvořit tzv. divertor (modifikaci základního toroidálního udržovacího magnetického pole odchylojící magnetické siločáry na periferii plazmatického provazce do divertorové komory). Tato konfigurace magnetického pole nasměruje únik částic z plazmatu do oblasti divertoru, kde se na divertorových sběrných deskách – terčích – zachytí nečistoty uvolňované ze stěn (uhlík, kyslík...) či pronikající do vakuové komory mikronetěsnostmi, a stejně tak i heliový „popel“ či atomy nespáleného vodíkového paliva, které může být znovu použito. Nečistoty se odčerpávají pomocí výkonných vymrazovacích vývěv. Podobný účel jako divertor má v tokamaku limiter. Původně poloidální limiter coby prstencová clona vymezoval poloidální průměr plazmatu, aby snížil tepelné zatížení stěn nádoby. Jiný typ limiteru byl v roce 2002 vyzkoušen na supravodivém tokamaku Tore Supra ve Francii. Tore Supra použil toroidální limiter, který výkonové zatížení

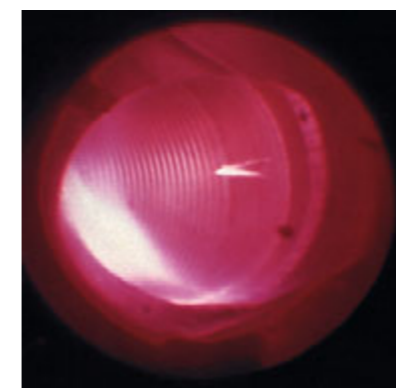
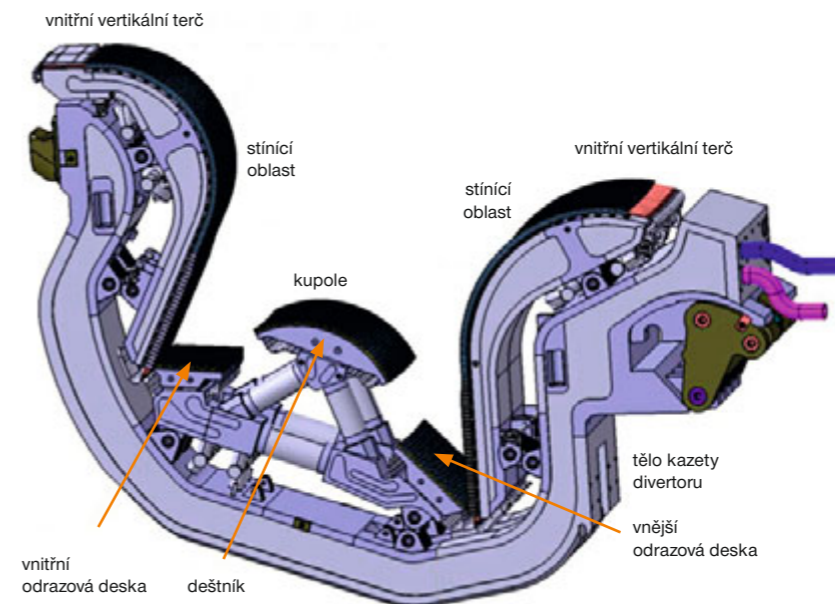


Schéma jedné z 54 kazet divertoru ITER • nahoře

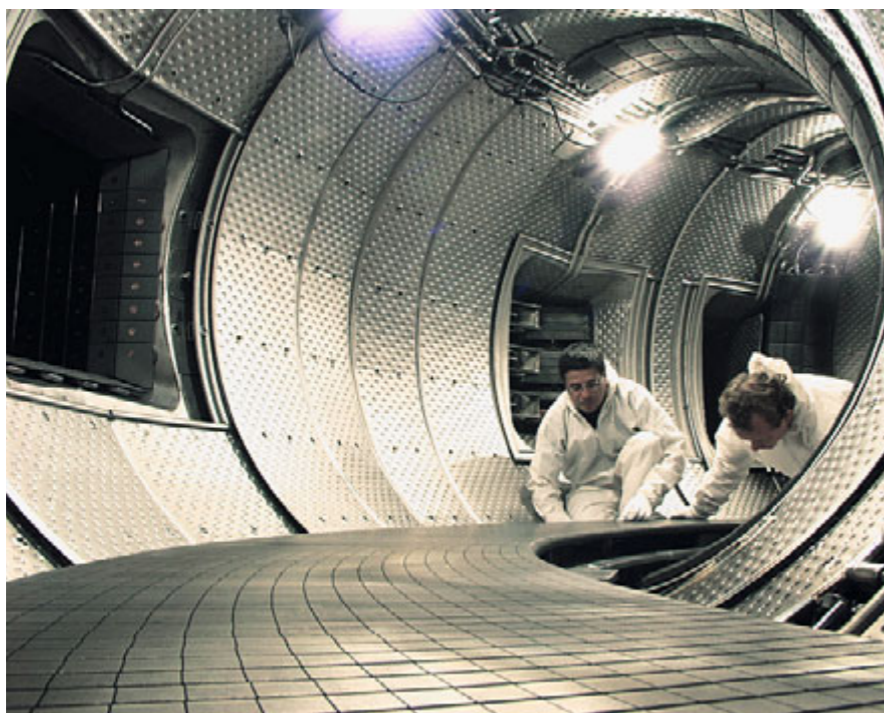
Takto se doplňuje palivo do tokamaku. Zářící „kometa“ je zmrazený vodík vstřelený do centra komory. Palivové pelety o objemu 90 mm<sup>3</sup> letí rychlostí 3600 km/hod. až 16x za sekundu. • vlevo dole

Vlnovod zavádějící vysokofrekvenční elektromagnetické pole pro dodatečný ohřev plazmatu do komory tokamaku v italském Frascati • vpravo dole

rozložil v toroidálním směru. Díky speciální technologii výroby umožnil prstencový limiter výbojový impuls plazmatu dlouhý 6:30 minut<sup>21</sup> při tepelném zatížení limiteru výkonem 10 MWm<sup>-2</sup> a odvodu celkové tepelné energie v rekordní výši 1000 MJ v jednom výboji (pulzu).

Rovněž doplňování vodíkového paliva do oblastí horkého plazmatu není snadné. Neutrální atomy přicházející od stěn (napouštění plynného vodíku) jsou díky vysokým teplotám v tokamaku velmi rychle ionizovány (již ve vzdálenosti několika centimetrů od stěny), a tak jim v dalším pronikání ke středu komory, kde jsou splněny podmínky pro termojaderné slučování,

21 Prosinec 2003



Toroidální limiter umožnil francouzskému supravodivému tokamaku Tore Supra odvod rekordních 1 GJ tepla v jediném výboji trvajícím 6:30 minut.

brání silné magnetické pole. Pouze tabletky zmrazeného vodíku vstřelené do komory velmi vysokou rychlostí (cca  $10 \text{ km s}^{-1}$ ) mohou ještě před svým odpařením dosáhnout nejteplejších oblastí plazmatu. V současnosti probíhají rovněž experimenty s nadzvukovým napouštěním vodíkového plynu. Jedním z největších úskalí všech termojaderných zařízení jsou různé druhy nestabilit, které v plazmatu vedou k jeho turbulenci. Mnohdy až o několik řádů zvyšují únik částic a energie na stěny komory, čímž nejen znesnadňují udržení termojaderných podmínek v jejím centru, ale také tepelně zatěžují tzv. první (z pohledu od plazmatu) stěnu komory ( $1\text{--}10 \text{ MW m}^{-2}$ ).

Optimalizace materiálů pro první stěnu (wolfram, uhlík, berylium) a jejího chlazení spolu s výběrem režimu výbojů, v nichž je maximálně potlačena turbulence plazmatu, je jednou z nej-

důležitějších částí termojaderného výzkumu posledních let. U tokamaků vybavených divertorem se pozoruje (poprvé v roce 1982 v tokamaku ASDEX) vytvoření transportní bariéry, která vzniká potlačením turbulence okrajového plazmatu a zabraňuje úniku částic a tepla. Tento režim výboje je nazýván H-mod (z angličtiny: high – vysoký, režim s lepším udržením částic a energie) na rozdíl od běžně pozorovaného L-modu (z angličtiny: low – nízký, režim s kratší dobou udržení částic a energie).

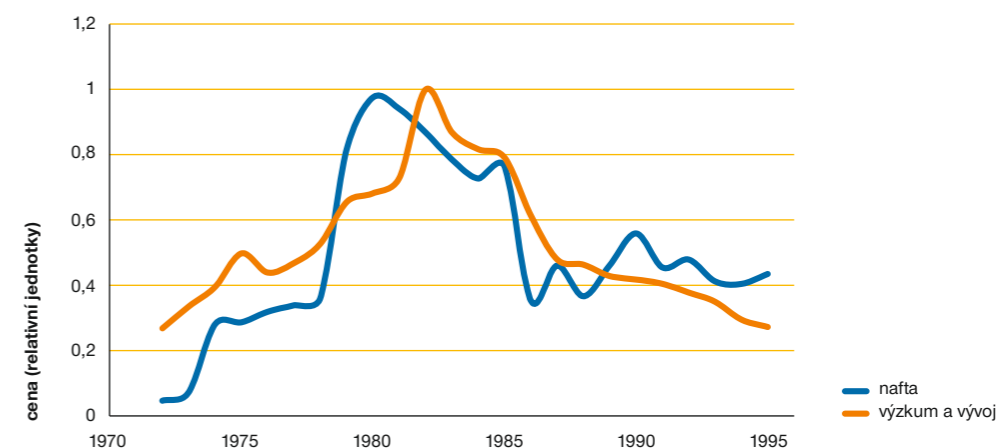
V roce 2001 byl dokončen revidovaný projekt tokamaku ITER s fúzním výkonem 500 až 700 MW, kde již byla většina výše zmíněných problémů úspěšně vyřešena. Pokud i experiment ITER potvrdí tyto optimistické výhledy, tokamaky se nejspíš stanou prvními fúzními elektrárnami a energetický problém lidstva by tak mohl být na tisíce generací vyřešen.

## HISTORIE VÝZKUMU ŘÍZENÉ TERMOJADERNÉ FÚZE VE SVĚTĚ

### PROČ SLUNCE SVÍTÍ?

Hledání procesu, který pohání Slunce, se pochopitelně omezilo na v tu dobu známé zdroje a formy energie: na energii chemickou – hoření, energii mechanickou – dopady meteoritů na sluneční povrch a energii gravitační – gravitační smršťování. Již v roce 434 př. n. l. se domníval Anaxagoras, že Slunce je hromada hořícího kamení, která je o málo větší než Řecko. Koncem 19. století jedinými zdroji energie bylo uhlí a dřevo, jedinou známou reakcí reakce chemická. Představa Slunce jako kusu uhlí shořela stejně jako Slunce z uhlí, které by dohaslo za méně jak 2000 let! Nu a to by znamenalo, že Země je starší než Slunce. Když Ernest Rutherford zjistil, že radioaktivita zajišťuje Zemi vnitřní zdroj

energie, zestárla Země rázem na 4,6 miliardy let. Slunce musí být přinejmenším stejně staré a problém zdroje energie Slunce se ponořil ještě hlouběji do mrazivého vesmíru. V druhé polovině 19. století skotský inženýr John Waterston předpokládal, že vyzářená energie pochází z gravitační kontrakce Slunce. V roce 1854 navrhuje Hermann von Helmholtz totéž – pomalé gravitační smršťování. V roce 1861 nezávisle na Helmholtzovi navrhuje William Thomson – lord Kelvin – tentýž mechanismus. Proces přijal název Helmholtz-Kelvinova kontrakce. Ani tato hypotéza nebyla v souladu s geologickými poznatky o stáří Země. Další hypotéza, vyslovená Juliem Robertem Mayerem, tvrdila, že teplota Slunce nepochází



Srovnání vývoje cen ropy a dotací na výzkum energetických zdrojů v Německu v letech 1970 až 1995. Zřejmá je zpožděná reakce dotací výzkumu na cenu ropy.



Nejhorší podoba termojaderné energie – vodíková nálož – „lednička Mike“ odpálená Američany v noci na 1. listopad 1952 na ostrově Elugelab – Marshallovy ostrovy v Pacifiku

z chemických reakcí, ale je udržována nestálými dopady meteoritů na jeho povrch. O tomtéž byl již v roce 1764 přesvědčen John Herschel, anglický astronom. Slabinu hypotézy, to je chybějící svědectví o nezbytném počtu Slunce bombardujících meteorů, nikdo ovšem nevyvrátil.

Nové století přivítalo zdroj energie Slunce stále obklopený tajemstvím, i když o středu naší soustavy bylo známo mnohé. Racionální vysvětlení zdroje jeho zářivé energie, na níž byl závislý život na Zemi, našel až počátek minulého století. Potřeboval k tomu slušně rozvinuté fyzikální poznání a tři odvážné muže. Alberta Einsteina, Francise Astona a Arthura Eddingtona.

I pravil fyzik Albert Einstein: „Hmotnost je energie!“ Spektroskopik Francis Aston zjistil, že prostý součet hmotností stavebních prvků jádra atomu je větší než hmotnost jádra a hmotnostní deficit přisoudil vazebné energii jádra, to je energii, kterou je třeba jádru dodat, aby se rozpadlo na menší části. Jinými slovy je to energie, která se uvolní při sloučení menších částí na větší jádro. Význačný astrofyzik své doby Arthur Eddington, kolega F. Antona,

geniálně spojil Einsteinovu rovnost a Astonův nedostatek do šokujícího závěru: „Slunce hoří díky energii uvolněné slučováním jader vodíku na jádro helia. Slunce pohání termojaderné slučování – fúze.“ Svoji senzační hypotézu vyslovil na setkání Britského sdružení pro vědecký pokrok, které se roku 1920 konalo v Cardiffu.

## DO ROKU 1938: KDO CHCE VYUŽÍT JADERNOU ENERGIÍ, JE SNÍLEK!

Určitě překvapí, že první pokusy s řízeným slučováním jader lehkých atomů má na svědomí studená fúze. V roce 1926 němečtí chemici oznámili produkci helia v paladiu nasyceném vodíkem. Svoje závěry později odvolali, avšak v roce 1989 Pons a Fleishmann vrátili studenou fúzi do hry a nyní se s periodou dvou tří roků objevují nové „důkazy“ o možnosti řízené fúze ve zkumavce. Naposledy Italové Sergio Focardi a Andrea Rossi v lednu 2011 na Boloňské univerzitě.



E. Rutherfordovi, M. L. E. Oliphantovi a P. Harteckovi se v roce 1934 podařilo uskutečnit první jadernou fúzi v laboratoři. Na snímku E. Rutherford (uprostřed) s pozdějším ředitelem Harwelu D. Crockroftem a dalším spolupracovníkem S. Waltonem (vlevo).



Mladší seržant O. A. Lavrentev byl na základě svých návrhů termojaderného reaktoru pozván ze Sachalinu do Moskvy, aby se zapojil do výzkumu po boku A. D. Sacharova.

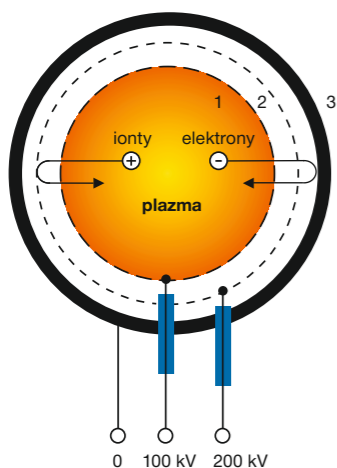
V roce 1934 pomocí lineárního urychlovače sloučili jádra deuteria Paul Harteck a Marcus L. E. Oliphant pod vedením nositele Nobelovy ceny Ernesta Rutherforda. Z té doby pochází známý výrok Sira Rutherforda o nemožnosti využití energie jádra pro průmyslové účely. Energetický zisk fúze pomocí lineárního urychlovače skutečně neskýtal naději na významnou hodnotu. Štěpná jaderná reakce a sférický urychlovač byly v té době neznámé.

V roce 1932 nabídl politik Nikolaj Bucharin na několik okamžiků celý elektrický výkon zásobující Moskvu Georgu Gamowovi, aby ho prohnal měděnou tyčí s bublinkami deuteria. Gamow pokus odsouzený k neúspěchu prozřetelně odmítl a Bucharina později Josef V. Stalin (samozřejmě pod jinou záminkou) nechal popraviti. V roce 1938 Artur Kantrowitz a jeho šéf Eastman Jacobs zkoušeli řízenou fúzi v prstencové (torodiální) kovové komoře, kterou omotali cívkou, jejíž magnetické pole mělo zabránit kontaktu výboje se stěnou komory. Byli zřejmě první, koho takové uspořádání napadlo a kdo se také setkal s nestabilitou plazmatu. Když US National Advisory Commission for Aeronautics přestala jejich experimentování podporovat, pokusy zanechali. Kantrowitz s Jacobsem se v březnu 1938 marně pokoušeli přihlásit patent „Oslabovač difúze“ (Diffusion Inhibitor), což rozvedli slovy: „Potlačení difúze plazmatu na stěny komory magnetickým polem“. Jejich průkopnic-

ká práce nezanechala ani článek v odborném tisku, pouze složka s nadpisem „Atom Buster“ skrývala průkopnické myšlenky izolace plazmatu magnetickým polem, které znovu objevovala až poválečná léta.

## DO ROKU 1958: ZAČALO TO V ARGENTINĚ!

Během II. světové války Enrico Fermi a další členové jeho týmu, který pracoval na atomové bombě, spekulovali o fúzní reakci v plazmatu udržovaném magnetickým polem. V roce 1946 otec americké vodíkové bomby Edward Teller vedl v Los Alamos semináře o řízené fúzi. Závěr diskuze naznačil obtížnost, ne-li nemožnost řízené fúze kvůli ztrátám tepla brzdným zářeními. Nicméně v témže roce v londýnské Imperial College George P. Thomson a Moses Blackman patentovali „Vylepšení aparatury pro výboje v plynech pro generaci termonukleární reakce“ pod číslem 817 681 u Patentové kanceláře v Londýně. Torodiální pinč byl buzen vysokofrekvenčním polem. Patent vzbudil značnou pozornost a vzápětí byl utajen. V oxfordské Clarendon Laboratory experimentoval se skleněnými torusy Peter Thoneman, který použil k buzení plazmatu transformátor s kovovým jádrem. Jeho práce vyvrcholila po přesunu do Harwellu (kde mj. tenkrát pracoval i první evropský štěpný reaktor) s tehdy největším zařízením



Skica sférického reaktoru s elektrostatickou izolací termojaderného plazmatu podle seržanta Lavrentěva. Zatímco elektrické pole mezi mřížkami 1 a 2 zadržuje kladné ionty, pole mezi mřížkou 2 a stěnou reaktoru 3 udržuje záporné elektrony.

pro fúzní výzkum na světě, toroidálním pinčem ZETA. Třetím místem výzkumů řízené fúze ve Spojeném království byl Aldermaston. V šedesátých letech všechna místa „fúzovala“ do dnešního Culham Centre for Fusion Energy, které je jen pár mil od Harwellu (a stejně jako Harwell byl původně i Culham válečným letištěm).

Jako startovní výstřel zapůsobil v dubnu 1951 prohlášení prezidenta Argentiny Juana Perona, že Argentina řízenou fúzi vyřešila. Díky fyzikovi Ronaldu Richterovi. Mimochodem Richter se narodil coby sudetský Němec v českém Sokolově. Ač zcela nepravdivá, iniciovala zpráva začátek státního programu výzkumu řízené fúze v Sovětském svazu, kde J. V. Stalin podepsal příslušný výnos 5. května 1951. O necelé dva měsíce později prosadil ve Spojených státech astrofyzik Lyman Spitzer program Matterhorn (Spitzer byl totiž náruživým horolezcem). Později byl Matterhorn rozšířen na známý všeobíhající projekt Sherwood.

V roce 1951 Spitzer ve Spojených státech zkonstruoval stelarátor. Výbojová komora ve tvaru číslice osm zabezpečila rotační transformaci nutnou pro potlačení toroidálního driftu. Výrobně náročný tvar výbojové komory a také nepřilíš dobré výsledky přinutily Spitzera vyrobit stelarátor ve tvaru atletické závodní dráhy, „racetrack“, kde dva rovné úseky jsou spojeny oblouky. Rotační transformaci zajišťovala dvě vinutí, jedno ve tvaru spirály. Stelarátory se sice obejdou

bez elektrického proudu v plazmatu, ale mají větší ztráty tepla. Plazma se v nich budí a ohřívá vysokofrekvenčním polem, v principu jsou určité pro nepřetržitý provoz. Dnes se domníváme, že hlavní příčinou větších ztrát byly nepřesnosti magnetického pole, a zdá se, že stelarátory přece jen mohou být konkurenceschopnými experimentálními zařízeními. Dnešní stelarátory, kupříkladu japonský LHD (Large Helical Device – první celosupravodivé fúzní zařízení na světě) má 3D vakuovou nádobu ve tvaru spirály a rovněž supravodivý německý Wendelstein W7-X, který se staví v Greifswaldu, trojrozměrné, složitě tvarované modulární cívky, které by měly vytvářet oproti kombinaci obyčejné a spirálové cívky mnohem dokonalejší magnetické pole. První plazma by měl zapálit v roce 2014, což představuje desetileté zpoždění oproti plánu. Na jeho předchůdci, stelarátoru W7-AS, který měl též modulární cívky, ale byl menší a nebyl supravodivý, byl dosažen režim s vysokým udržením, tzv. H-mod, známý z tokamaků.

Ze Spojeného království „zavlekl“ do Spojených států z-pinč Jim L. Tuck. Jeho Perhabsatron (Perhaps = možná **to bude fungovat!**) potvrdil obecnou neuctnost pinčů, to je náchylnost k Taylorově-Rayleighově nestabilitě. Vedle pinčů a stelarátorů se ve Spojených státech intenzivně věnovali i magnetickým zrcadlům, ve kterých je pole solenoidu (tj. obyčejné, válcové cívky) „uzavřeno“ na obou koncích silnějším mag-

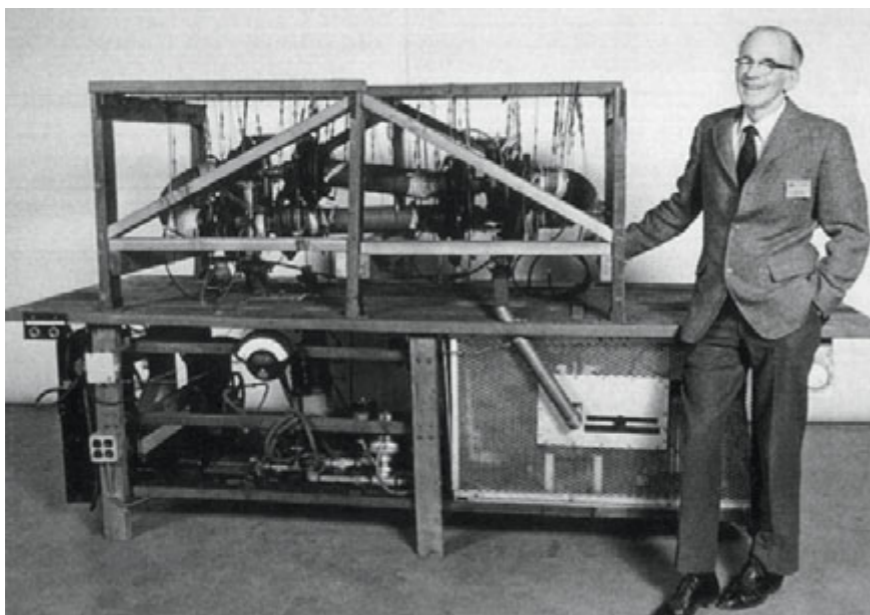
netickým polem – zrcadlem. O konci jednoho „zrcadla“ vyprávěl doc. Pavel Šunka, významný odborník Ústavu fyziky plazmatu: „V LLNL postavili tandemové zrcadlo se supravodivými magnety 20 m dlouhé, mělo mít 20 MW v neutrálních svazcích pro ohřev. Pikantní na tom je, že toto drahé zařízení nikdy nefungovalo, došly peníze. Dopoledne to slavnostně otevřeli a večer potichu zavřeli.“ Tato velká a promarněná investice nesla poněkud neatraktivní název MFTF-B (**M**irror **F**usion **T**est **F**acility). Třetí zemí, kde se studovala řízená fúze, byl poválečný Sovětský svaz. Dopisy seržanta Olega A. Lavrentěva inspirovaly mladého Andreje D. Sacharova a jeho vynikajícího učitele a vědce Igora J. Tamma v roce 1950 k návrhu Magnetického termojaderného reaktoru. V toroidální vakuové komoře byl výboj buzen transformátorovým efektem a rotační transformace – spirálové magnetické pole – byla vytvořena superpozicí vnějšího toroidálního pole a poloidálního pole výbojového proudu. Geniální nápad A. Sacharova nazval v roce 1958 Alexandr S. Golovin tokamak. Určitě tehdy v roce 1958 netušil, že tokamak (**T**Oroidalnaja **K**Amera i **M**AGnitnyje **K**atuški – toroidální nádoba a magnetické cívky) se stane díky svému pozdějšímu úspěchu mezinárodním slovem. Ani sovětský tokamak se neubráníl pinčovému opojení a do roku 1960 byly práce na tokamacích silně omezeny, nejvíce peněz se investovalo právě do pinčů jako do nakažlivě jednoduchého způsobu jak dosáhnout termojaderných teplot. Další událostí, která rozhodující měrou ovlivnila vývoj řízené fúze, zejména mezinárodní spolu-

práci v této oblasti fyziky, byla legendární přednáška Igora V. Kurčatova v Harwellu v dubnu 1956. Definitivní tečkou za fúzní „železnou opou“ byla II. mezinárodní konference Atom pro mír v září 1958 v Ženevě. Řízené fúze se na této konferenci týkalo 109 referátů z jedenácti zemí a USA uspořádaly i první fúzní expozici. Účast československé delegace vyústila v založení Ústavu fyziky plazmatu ČSAV, který byl pověřen koordinací výzkumu řízené fúze a dodnes je vedoucí institucí v tomto oboru v České republice. Stalo se tak 1. ledna 1959.

Odtajnění fúzních výzkumů umožnilo Johnu D. Lawsonovi publikovat nerovnost, dnes známou pod jeho jménem. Lawsonovo kritérium vysvětluje, kdy vybraná fúzní reakce v termojaderném reaktoru bude energeticky zisková, tedy kdy bude fungovat fúzní elektrárna. Říká, že součin hustoty a doby udržení energie plazmatu musí být větší než konstanta, která je závislá na teplotě. Kritérium zásadního významu odvodil John D. Lawson prokazatelně již v roce 1955.

## 1959 AŽ 1969: OD HLUBOKÉHO PESIMISMU K TOKAMAKOVÉ EUFORII!

Období krátké, avšak bouřlivé. Rodilo se nové odvětví fyziky – fyzika plazmatu. Brzy se ukázalo, že metoda pokus-omyl při stavbě experimentálních zařízení ke kýženému cíli – řízené termojaderné fúzi s významným ziskem energie – nepovede. Plazma se



L. Spitzer pózuje před svou variantou magnetického udržení – stelarátorem. Úspěšnější byli Rusové pod vedením A. D. Sacharova s tokamakem.

sledovalo spíše kvalitativně než kvantitativně. Mezi základní „měřicí“ zařízení patřilo lidské oko. Aparatury převzaté ze studia nízkoteplotního plazmatu – sondy – a z astronomie – spektroskopy – se vědci používat v podmínkách vysokoteplotního plazmatu teprve učili. Rozvoj pozorovacích technik umožnil plazmatu porozumět a naučit se předvídat jeho chování. Dnes je úroveň tak zvaných **diagnostik fúzního plazmatu** na vysoké úrovni – viz kapitola Měření parametrů plazmatu – diagnostika.

Jedním z prvních vítězství v boji s nestabilitami bylo Šafranovo-Kruskalovo kritérium nezávisle objevené na obou stranách Atlantiku. Platné jak pro lineární, tak pro uzavřené systémy stálo pro toroidální systémy charakter rotační transformace spirálových magnetických polí zajišťující stabilitu v toroidálních nádobách. Další podmínkou pro stabilitu plazmatu je, že intenzita magnetického pole ( hustota siločar) musí růst ve směru poklesu hustoty plazmatu (pole v reaktoru musí být konkávní – alespoň v průměru podél každé siločarivky). Nestabilní křivost magnetických zrcadel obešly tzv. Ioffeho tyče, které pole solenoidu zvenku vhodným

způsobem deformují. Nicméně únik částic ztrátovým kuželem – otevřenými konci solenoidálního magnetického pole – prozatím vyloučil magnetická zrcadla ze soutěže. Obdobné problémy provázely i tzv. vstřícná pole (Magnetic Cusp), která byla sice MHD stabilní díky křivosti magnetických siločar, navíc nulové magnetické pole ve středu nádoby snižovalo ztráty cyklotronním zářením, ale únikové štěrbiny – prstencová a dvě osové – nebylo možné dost dobře ucpat (více viz odstavec „Jiné přístupy magnetického udržení“). Stelarátor bojoval s rezonančními poruchami magnetického pole způsobenými nepřesnostmi cívek.

Období trhu idejí – jak ho nazval vedoucí experimentální částí fúzního sovětského projektu Lev A. Arcimovič – nemělo dlouho žádného vítěze. Ve skutečnosti se teplotní hranice stovky tisíc stupňů zdála nepřekonatelná. Rychlost difúze plazmatu podle Bohmova vztahu, která je nepřímo úměrná mocnině magnetického pole (a navíc s nečekaně vysokou konstantou), se stala zlým snem fyziků – plazmatiků.

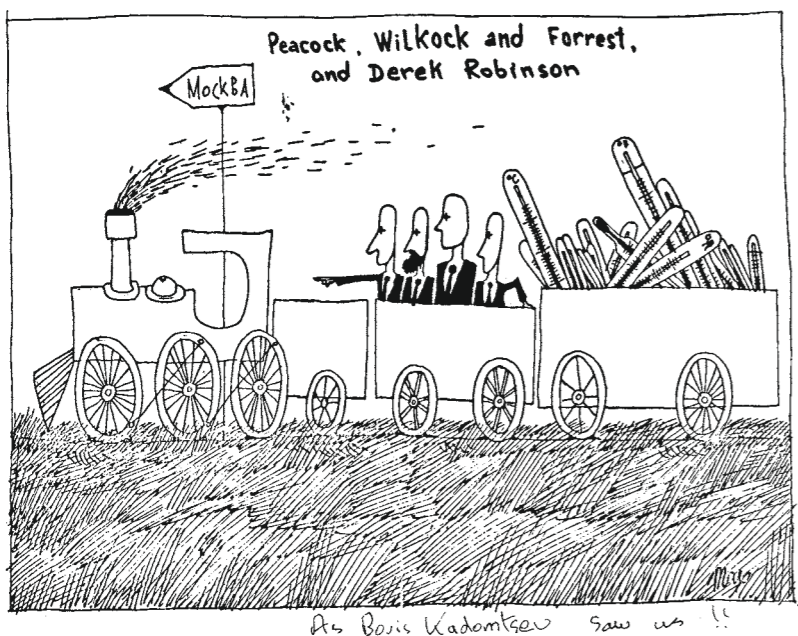
V roce 1962 v tokamaku TM-2 s větším toroidálním magnetickým polem naměřili poprvé

v uzavřených systémech K. A. Razumova a E. P. Gorbunov zcela stabilní režim. Mimočodem, K. A. Razumova, tehdy s D. I. Ivanovovem, ověřila již v roce 1953 vůbec poprvé na světě Šafranovo-Kruskalovo kritérium na lineárním výboji SK-1. Teď už stačilo „jen“ postavit větší tokamak, tak velký, aby transformátorový proud dokázal plazma dokonale ionizovat. Pak byl, díky výraznému snížení vyzařování světla, správně očekávan prudký nárůst teploty. Tímto prvním větším tokamakem (velkým asi jako náš dnešní COMPASS) se stal moskevský T-3. V roce 1965 vystoupil Lev A. Arcimovič s tak dobrými výsledky tokamaku, že místo nadšení vzbudil pochybnosti. Spory o správnou interpretaci tokamakových teplot vrcholily v roce 1968, kdy se v srpnu konala III. mezinárodní konference o fyzice plazmatu a řízené termojaderné syntéze. Američané prohlásili Arcimovičových pozorování urychlených elektronů (tzv. runaway electrons). Arcimovič využil dlouhodobého přátelství s vedoucím britského fúzního projektu Sebastianem „Bas“ Peasem a ještě během konference předjednal „návštěvu“ jeho týmu na tokamaku T-3A. Pak už následovala všem odborníkům dobře známá historie, kdy začátkem roku 1969 přijela do Moskvy – navzdory srpnovým událostem v Československu – skupinka britských fyziků s pět tun těžkou aparaturou, tenkrát naprosto jedinečnou, pro přímé měření teploty pomocí Thomsonova rozptylu laserového paprsku. Na **Mezinárodní konferenci o udržení plazmatu v uzavřených systémech** v Dubně v polovině téhož roku vedoucí

britských fyziků Derek Robinson oznámil, že na tokamaku T-3A naměřili dokonce vyšší teplotu, než prezentoval Lev A. Arcimovič v Novosibirsku. Doba udržení energie plazmatu byla třicetkrát lepší než obávaná Bohmova doba udržení – což byl do té doby nepřekonatelný strašák dosavadních fúzních zařízení. Návštěva Britů v Moskvě tak vlastně byla prvním mezinárodním fúzním experimentem.

## 1970 AŽ 2006: ČÍM VĚTŠÍ, TÍM LEPŠÍ (NA VELIKOSTI ZÁLEŽÍ)!

Následoval doslova úprk k tokamakům. Příléhavé pojmenování „tokamánie“ výstižně popisuje dobu hladovou po dlouho očekávaných příznivých zprávách, dobu, ve které se na konci tunelu rozsvítilo světlo silou neočekávanou! Největší americký Stellarator C byl přestavěn na tokamak ST (**S**ymmetric **T**okamak). První tokamak v Evropě postavila Francie ve Fontenay aux Roses – tokamak TFR. Udržení energie podle předpokladů rostlo s magnetickým polem a objemem plazmatu. Brzy se ukázalo, že ohřev pomocí Jouleova tepla nestačí, neboť s rostoucí teplotou plazmatu klesal jeho elektrický odpor a tím i vydělené teplo. Z nejrůznějších způsobů dodatečného ohřevu se prosadily dva: ohřev pomocí mikrovln na elektronové či iontové cyklotronní frekvenci a vstřik vysokoenergetických svazků neutrálních atomů (NBI – Neutral Beam Injection). Francouzský tokamak TFR a Ormak v ORNL dosáhly pomocí NBI teploty



2 keV. Tokamak PLT opět s NBI v Princetonu dokonce 7 keV.

Na počátku sedmdesátých let Arcimovič a Šafranov vyslovili myšlenku, že protáhlý tvar příčného řezu plazmatu zlepší jeho stabilitu. Byla postavena série tokamaků s nekuhovým průřezem výbojové komory. Prvním na světě byl T-8 a následovaly T-9, T-12 a TVD. Dnes je „D-shape“ standardním vybavením moderních tokamaků. Neoklasická teorie pro toroidální nádoby rozvinutá Alecem A. Galjejevem a Roaldem Z. Sagdejevem přepověděla v toroidálním plazmatu samoindukovaný elektrický proud (takzvaný bootstrap current) a ten byl záhy experimentálně potvrzen v toroidálním multipólu. Tokamak využívající ke generaci proudu transformátorový efekt je v principu pulzní zařízení a vědci se snaží tuto nevýhodu potlačit a nalézt způsob trvalé generace proudu v plazmatu. Nejnadějnější je kombinace neindukčního buzení elektrického proudu mikrovlnami (LHCD) a právě samoindukovaného „bootstrap“ proudu. Pro kontinuální provoz experimentu s velmi vysokými magnetickými poli je potřeba využívat supravodiče – obyčejné (měděné) vodiče se přehřívají a mají velkou spotřebu energie. V roce 1978 byl zprovozněn v Moskvě první tokamak

na světě se supravodivým vinutím pro toroidální pole. Tokamak T-7, později předaný do Číny, se stal základem pro čínský supravodivý program, který vyvrcholil prvním celosupravodivým tokamakem na světě – EAST. Nejprve byl ovšem tokamak T-7 nabídnut Praze, ale ta ho kvůli náročnému heliovému hospodářství pro chlazení supravodičů nepřijala. Nicméně Ústav fyziky plazmatu ČSAV se na provozu tokamaku T-7 podílel – viz kapitola „Mezinárodní spolupráce...“. Díky dodatečnému ohřevu sice rostla teplota plazmatu, ale ukázalo se, že klesá udržení jeho energie. Nejprve se efekt objevil při ohřevu pomocí NBI a vzápětí byl potvrzen i při ohřevu mikrovlnami. Kompenzace poklesu doby udržení zvětšením objemu plazmatu by vedla k ne-realistickým rozměrům. Záchranný kruh topící se fúzi s magnetickým udržením hodil německý tokamak ASDEX, na němž v roce 1982 objevili režim vysokého udržení nazvaný H-mod (H jako high). Režim do té doby obyčejného udržení pak nazvali symetricky nízkým udržením, tedy L-mod (L jako low). Ukázalo se, že existence H-modu má univerzální charakter a během následujících dvaceti let byl vytvořen podobnostní vzorec pro jeho výskyt. Prvním celosupravodivým tokamakem, který dosáhl režimu H-modu,



L. A. Arcimovič – šéf termojaderného výzkumu v bývalém SSSR a suverénní jednička termojaderné komunity v sedmdesátých letech 20. století – navštívil v roce 1964 Ústav fyziky plazmatu ČSAV v Praze.

Kresba akademika Kadomtceva zachycuje příjezd britské skupiny do Moskvy, kde potvrdila rekordní teploty plazmatu tokamaku T-3 (předchozí strana).

byl v roce 2010 korejský KSTAR a vzápětí pak o málo starší čínský EAST. Nadějně fyzikální výsledky umožnily značné pokroky v plazmových technologiích: jde mj. o vstřík svazku neutrálních částic (NBI), mikrovlnný ohřev, vstřík pelet zmrazeného paliva, komponenty přímo vystavené plazmatu („vidící“ plazma – Plasma Facing Components, PFC), diagnostiku plazmatu. Astronomické teploty požadované pro fúzi (stovky milionů stupňů) se pro řadu zařízení staly rutinou. Další nové technologie se jmenovaly supravodivost a malý „aspect ratio“ – poměr velkého poloměru a malého poloměru toroidální komory. Tokamaky s malým aspectem ratio, tak zvané kulové tokamaky, se začaly intenzivně studovat v mnoha laboratořích po celém světě, například v Culhamu (tokamaky START, MAST) či v Princetonu (tokamak NSTX). Dobu udržení plazmatu lze zvýšit buď zvětšením intenzity magnetického izolujícího pole nebo zvětšováním objemu plazmatu. Intenzita magnetického pole se pomalu blížila technickým možnostem, a tak byl konec osmdesátých let ve znamení stavby čtyř velkých tokamaků: amerického TFTR, japonského JT-60, ruského T-15 a konečně evropského JET. Každý z nich

se zapsal do historie, každý z nich má jiný osud. JET, mimochodem postavený bez zpoždění, je na jednu stranu zařízení s nepřekročenými plánovanými náklady a na druhou stranu naopak zařízení s překročenými plánovanými parametry. Poprvé na světě vyzkoušel směs D-T, v roce 1991 generoval významný fúzní výkon 2 MW a úspěšně vyzkoušel dálkově řízenou výměnu vnitřních částí vakuové komory. V roce 1993 ho překonal TFTR výkonem 10 MW a konečně slovo řekl JET v roce 1997 – 16,5 MW. Zatímco společný evropský tokamak JET pokračuje ve výzkumu jako významný zdroj informací pro mezinárodní tokamak ITER, TFTR byl na konci minulého století rozmontován a JT-60U potkal podobný osud. Na rozdíl od TFTR ale dostane JT-60U důstojného nástupce, celosupravodivý tokamak JT60-SA, který se má stát druhým největším tokamakem a „satelitním“ experimentem pro ITER v době, kdy se již nepředpokládá provoz JET. Supravodivých tokamaků tedy bude pět a z toho čtyři v Asii! Ruský tokamak T-15 v roce 1988 předvedl ustálený režim. Dosud největší tokamak v Rusku s největšími supravodivými cívkami Nb<sub>3</sub>Sn na světě byl po sto výstřelech zakonzervován, neboť na provoz nebyly peníze. V roce 2010 uvažovaná modernizace včetně



instalace divertoru pro T-15 MD (Modified Divertor) by měla vyústit v první plazma v roce 2014. Je otázkou, zda se významná moskevská fúzní komunita vydá nakonec touto cestou, nebo cestou stavby tokamaku Ignitor ve spolupráci s Itálií. Uvažuje se dokonce o hybridním reaktoru TIN-1. Světová fúzní komunita může jen litovat, že Rusové – vzhledem k dosavadním úspěchům – nedokázali ve výzkumu fúze pokračovat tak, jako se jim to podařilo třeba ve výzkumu vesmíru.

## OD ROKU 2006: VELKÁ MEZINÁRODNÍ SPOLUPRÁCE – ITER!

Tokamaku ITER je věnována zvláštní kapitola, proto jen krátce. V osmdesátých letech se dohodly velmoci Spojené státy a Sovětský svaz, že předvedou světu výsledek mírové spolupráce, a volba padla na mezinárodní tokamak ITER. Dnes ITER Organisation tvoří Evropská unie a šest států: Rusko, USA, Čína, Jižní Korea, Indie a Japonsko. ITER má ověřit možnost civilního využití energie řízené termojaderné fúze. Poprvé je fyzika na druhém místě za technologií. Růst výkonů počítačů umožňuje stanovit dobu udržení energie v ITER dvěma způsoby. První – standardní – vychází z extrapolace výsledků stávajících tokamaků (scaling) a druhý používá modelů lokálního transportu odvozených počítačovou simulací. Výrazně spolehlivější je zatím první – podobnostní metoda. Stavba ITER započala v roce 2007 a v roce

2010 byla zahájeno hloubení jámy pro reaktor. V témže roce byl položen základní kámen pro administrativní budovy včetně ředitelství.

## JINÉ PŘÍSTUPY MAGNETICKÉHO UDRŽENÍ

Zmíníme dva alternativní přístupy. Oba se pěstují řadu let a ač jsou diametrálně odlišné, jsou personálně propojeny: inerciální elektrostatické udržení a kompaktní tokamak.

Robert Bussard, bývalý spolupracovník Roberta Hirsche, šéfa AEC, navrhl přilákat soukromý kapitál do fúzního výzkumu na malý kompaktní tokamak. Svěřil se svému příteli pracujícím v MIT, Bruno Coppimu. V roce 1969 navštívil MIT Lev A. Arcimovič. Jeho přednášky Coppiho inspirovaly. Bruno Coppi v MIT prosadil **malý** tokamak s **velkým** polem. Na tokamaku Alcator (**torus s velkým polem**) dosáhl pozoruhodně dobrého udržení při vysoké hustotě, které navíc s hustotou rostlo, ale na „velký“ kompaktní tokamak nedostal peníze. Až v roce 2010 se domluvili premiéři Itálie a Ruska, Silvio Berlusconi a Vladimír V. Putin, že by se tokamak, který nazvali IGNITOR, mohl vyrobit v Itálii a postavit a provozovat v Troitsku u Moskvy. Mimochodem název IGNITOR pochází již z roku 1976! Tehdy byl ale změněn podle názvu úvěrové banky na Riggatron, jehož neúspěšný vývoj 17 milionů dolarů podpořil Bob Guccione, zakladatel a vydavatel časopisu pro pány Penthouse. Robert Hirsch svoji vědeckou kariéru začínal pod dohledem Phila Farnwortha, jednoho z otců televize. V International Telephone&Tele-

graph (ITT) spolu úspěšně zkusili generovat fúzní neutrony v zařízení zvaném fúzor. Když ITT přestalo výzkum podporovat a AEC peníze nedala, fúzor usnul na 13 roků (1972–1985), ale probudil ho právě Robert Bussard. Bussard za peníze US NAVY postavil šest Polywellů (polyhedron = mnohostěn a well = jáma, pracují totiž s potenciální jámou prostorového náboje elektronů). Po smrti Bussarda se Polywellu ujal Robert Nebel.

Zatímco v případě Ignitoru se Rusko objevuje až v roce 2010, v případě Polywellu od samého počátku v šedesátých letech s podobným zařízením experimentoval Oleg A. Lavrentěv v charkovském FTI. Začal stejně jako Robert Hirsch s čistě elektrostatickým polem. Později přidal magnetické pole jako ochranu mřížek. Stejně jako Robert Bussard v Polywellu. Lavrentěvovo úsilí vrcholilo sérií elektromagnetických pastí Jupiter. Hospodářské turbulence osmdesátých let program Jupiter přerušily a Oleg A. Lavrentěv se stejně jako na počátku své kariéry v padesátých letech věnoval teorii. Ještě v roce 2008 vystoupil na mezinárodní konferenci o fyzice plazmatu a řízené termojaderné syntéze v ukrajinské Aluste. Bylo mu 82 let. Oleg A. Lavrentěv se s Robertem Hirschem setkali na památné konferenci v Novosibirsku 1968. Oleg A. Lavrentěv má nicméně nehynoucí zásluhu na zrození tokamaku, neboť v roce 1950 inspiroval Andreje D. Sacharova ke konstrukci MTR, přímého předchůdce tokamaku. George H. Miley z University of Illinois nazval v roce 2004 Olega A. Lavrentěva dokonce „otcem fúzního výzkumu v Sovětském svazu“.

## HYBRIDNÍ REAKTORY

Myšlenka je jednoduchá: centrální část reaktoru bude vyrábět fúzní neutrony a obal bude obsahovat štěpný materiál v podkritickém množství. Konečně dnešní koncepce fúzního reaktoru nemá od takového hybridního reaktoru příliš daleko: ve vakuové komoře probíhá fúze izotopů vodíku – deuteria a tritia – a v obalu na fúzní neutrony čeká štěpný materiál – lithium, aby se rozštěpilo a poskytlo fúzní reakci tritium. V hybridním reaktoru by se navíc používaly i štěpné materiály z konce Mendělejevovy tabulky. O hybridním reaktoru uvažoval už A. Sacharov v roce 1951 a v osmdesátých letech publikoval náš Ústav fyziky plazmatu ČSAV několik článků o možnostech hybridních reaktorů jako zdrojích energie. V roce 2009 se objevilo několik laboratoří, které byly ochotné, zatím jen na papíře, poskytnout své zdroje fúzních neutronů – ať tokamaky nebo lasery – jako základ pro hybridní reaktor. Na rozdíl od raných ideí, poslední návrhy spíše než o zdrojích energie uvažují o „spalovnách“ odpadu ze štěpných jaderných elektráren.

Texaská univerzita uvažuje o kompaktním tokamaku vybaveném divertorem Super X Divertor (SXD) mimořádně odolným vůči tepelné zátěži. Divertor SXD by prý umožnil podstatně zmenšit rozměry tokamaku. Při výkonu 100 MW by měl celkový průměr 6 m, zatímco ITER pro výkon 500 MW bude mít průměr 30 m. Divertor SXD se instaluje do kulového tokamaku MAST (Culham, UK), zájem projevil další kulový tokamak NSTX (Princeton, USA) a tokamak DIII-D (General Atomics, USA). Kompaktní tokamak by tvořil základ



Zleva: V. S. Muchovatov, S. V. Mirnov, L. A. Arcimovič, V. S. Strelkov před tokamakem T-3A

hybridního reaktoru CFNS (**C**ompact **F**usion **N**eutron **S**ource). Prognózy texaských vědců jsou lákavé: sedm až jedenáct hybridních reaktorů zlikviduje odpad 104 amerických štěpných reaktorů, třicet až čtyřicet pět hybridů by spolykalo odpad všech atomových elektráren na světě. Prakticky ve stejnou dobu se objevil návrh vědců General Atomic ze San Diega uvažujících o svém tokamaku DIII-D, současné vlajkové lodi americké fúze, jako o výchozím bodu pro projekt FDF (**F**usion **D**evelopment **F**acility – Zařízení pro výzkum fúze). Fúzní část hybridu FDF by měla pracovat s 200 MW fúzního výkonu při zesílení  $Q \approx 2$ . Pro srovnání ITER má naplánováno 500 MW při  $Q \approx 10$ . FDF tvaru válce o průměru 12 m, 7 m vysokého by měl zahájit činnost během osmi až třinácti let. Jak jsme uvedli výše, i snaha oživit největší ruský tokamak T-15 je provázána úvahami o hybridním reaktoru TIN-1. Ještě dále od průmyslového využití než předchozí návrhy vycházející z magnetického udržení, je projekt livermorského hybridu LIFE – **L**aser **I**nertial **F**usion-**F**ission **E**nergy (laserová inerciální fúzně-štěpná energie). Základem má být laserový gigant NIF – **N**ational

**I**gnition **F**acility (Národní zařízení pro zapálení) – 192svazkový laserový systém.

## INERCIÁLNÍ FÚZE

Poněkud rozporná je role inerciálního udržení. O vývoj mohutných laserů mají zájem především vojáci, a proto byl tento směr pěstován zejména v USA i v době, kdy magnetické udržení upotřebitelné pouze v civilní oblasti zmíralo na úbytě. Ekonomické problémy výroby energie pomocí mikrovýbuchů jsou obrovské a zatím to nevypadá, že by tato metoda nabízela snadnější cestu k reaktoru vyrábějícímu energii. Brzy po sestrojení prvního laseru navrhl Nikolaj G. Basov, laureát Nobelovy ceny, a Oleg M. Krochin laserovou termojadernou fúzi. Od prvního mnohasvazkového laserového systému, moskevského devítisvazkového zařízení KALMAR, ke stavbě poslední generace laserových systémů, 256svazkového LMJ ve francouzském Le Barbu u Bordeaux a 192svazkového NIF v Livermoru, uplynulo více než čtvrt století naplněné hledáním vhodné konstrukce terčíku, tvaru laserového impulsu a zvyšováním počtu svazků ozařujících symetricky kulový terčík. V roce 1972

John Nuckolls (LLNL) v Nature předpověděl, že k zapálení pomocí ICF bude třeba energie kolem 1 kJ a pro „vysoký zisk“ dokonce 1 MJ. Od roku 1995 Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA) oficiálně, byť v malém rozsahu, podporuje výzkum energetického využití inerciální fúze. V současné době čeká inerciální fúze na experimenty s novým pokolením laserových systémů (NIF, LMJ), které mají mít třicetkrát větší energii než někdejší král laserů NOVA, a měly by dosáhnout zesílení  $Q > 10$ . V červenci 2003 laser NIF poprvé vystřelil do terčové komory. Nejprve jen čtyřmi ze 192 svazků a v roce 2010 všemi 192 svazky, kdy dosáhl v pulzu přes 1 MJ energie. Koncem srpna 2010 NIF naplánoval „zapálení“, ale pak zajímavý pokus odložil. Francouzský LMJ by měl být dokončen v roce 2012. Cesta k termojadernému reaktoru je však ještě dlouhá. V cestě stojí malá opakovací frekvence, malá, pouze 1% účinnost laserového systému a drahá kusová výroba terčů. Přestože jsou nové lasery NIF a LMJ financovány převážně z prostředků programů údržby arzenálu strategických jaderných zbraní, mají v programu i využití fúze pro výrobu energie a základní výzkum systémů s vysokou hustotou energie.

## ANI RYBA ANI RAK

Ani inerciální ani magnetická fúze, to jsou pinče, které byly bezesporu průkopníky fúzního výzkumu. Pinč – výboj v plynu – ohřívá plazma průchodem elektrického proudu a od stěn výbojové komory ho izoluje vlastním magnetickým polem. Svou zdánlivou jednoduchostí vzbuzoval velké

naděje na brzké vyřešení fúzního problému. Stačí určitá minimální hodnota výbojového proudu a potřebná teplota plazmatu podle relativně jednoduchého Bennetova vztahu je dosažena. Zpočátku optimistický start pinčových experimentů zabrzdlily nestability a většina laboratoří na fúzní výzkum pinčů rezignovala. Jeden z posledních mohykánů provozuje Sandia National Laboratory v Albuquerque, USA. Nicméně optimistické předpovědi týkající se Z-zařízení (Z-machine či Z-Pulsed Power Facility mělo produkovat fúzi v roce 2010) narazily do stejné zdi jako jeho předchůdci. Magnetická Rayleigh-Taylorova nestabilita (MRT) vedla ke zhroutilí výboje dříve, než plazma dosáhlo termojaderných parametrů. Poslední způsob, jak se s nestabilitou vypořádat, pochází právě z roku 2010. Původní klec z pavoučích drátků protékajících elektrickým proudem byla nahrazena aluminiovým tenkostěnným válcem – „linerem“. Zamýšlené stlačení fúzního paliva rentgenovým zářením nahradil laserový „předohřev“. Vědci z SNL si od lineru slibují lepší podmínky pro studium MRT. Breakaven očekávaný do tří let nejspíše ale patří do řady podobných, až příliš optimistických prohlášení. Další podrobnosti viz kapitola Významná fúzní zařízení.

## HiPER

Evropa projektuje v režimu „rychlého zapálení“ High Power laser Energy Research facility (HiPER) a Japonsko FIREX II. Rychlé zapálení, kdy první pulz terčík stlačí a druhý pulz ohřeje, předpokládá téměř 10× menší energii laserů

než systémy NIF, respektive LMJ. Poslední počítají s energií až 2 MJ, zatímco HiPER pro stlačení vyžaduje 200 kJ a pro zapálení 70 kJ. HiPER navíc počítá pro stlačení paliva s účinnými nanosekundovými opakovacími lasery na bázi nanokeramických YAG laserů čerpanými laserovými polovodičovými diodami. Koncept HiPER by měl částečně odstranit nevýhodu malé opakovací frekvence ICF. Vzhledem k současné ekonomické situaci a také k tomu, že systém je z vojenského hlediska nezajímavý, je projekt HiPER v době vydání této publikace sice projektově připravený, ale je „u ledu“. Naši odborníci jsou přitom přesvědčeni, že úspěch NIF povede i k realizaci HiPER. Česká republika se účastní přípravné fáze HiPER a dalšího evropského laserového projektu Extreme Light Infrastructure (ELI). Podstatná část ELI bude postavena v Dolních Břežanech u Prahy. Opakovací systém s mimořádně krátkým pulzem několik desítek femtosekund (fs) odpovídá obrovské intenzitě osvětlení terčíku cca  $10^{24}$  Wcm<sup>-2</sup>, a proto bude jedinečným nástrojem pro výzkum hmoty za extrémních podmínek. Pro srovnání: PALS dosahuje  $10^{16}$  Wcm<sup>-2</sup>. Součástí ELI ale nebude laser pro stlačení, ELI totiž není přímo určen k výzkumu inerciálního fúze.

## PŘÍTOMNOST A BUDOUCNOST FÚZE

V uplynulých šedesáti letech byly vytvořeny pevné vědecké základy pro výrobu fúzní

energie, a to jak magnetickým, tak inerciálním udržením. Diagnostika a technologie koketují s průmyslovou výrobou: dodatečný ohřev plazmatu pomocí svazků vysokoenergetických neutrálních částic či vysokofrekvenčního elektromagnetického pole, buzení elektrického proudu v plazmatu, vstřík palivových pelet, komponenty pro přímý kontakt s plazmatem. Mnoho zařízení dnes běžně dosahuje optimálních fúzních teplot > 100 milionů °C, supravodivá zařízení umí udržovat vysokoteplotní plazma i desítky minut – plazma v japonském tokamaku Triam „žilo“ přes pět hodin. Velká fúzní zařízení fungují spolehlivě a se směsí D-T bezpečně. Nesmírně důležitá je dobrá zkušenost s mezinárodní spoluprací jak u magnetického, tak inerciálního udržení.

Co je ještě třeba? Dosud není zcela zřejmé, jak se bude chovat hořící plazma, to je plazma ohřívávané převážně produkty fúze – alfa částicemi, je nutné vyřešit koncept plodícího obalu – blanketu, komponenty vystavené plazmatu a atakované dlouhými pulzy velkých výkonů, a technologii materiálů odolávající silným neutronovým tokům.

## ZÁVĚR

Naprosto zásadní pro další výzkum termojaderné fúze je informovanost a zájem laické veřejnosti a jejích politických představitelů. Jak prohlásila svého času osobnost číslo jedna světové fúze – L. A. Arcimovič: „**Fúze tu bude, až ji bude společnost potřebovat.**“

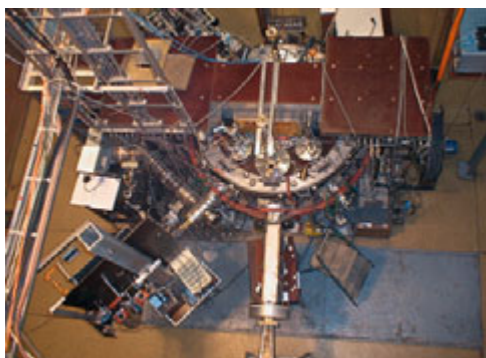
# HISTORIE TERMOJADERNÉ FÚZE V ČESKÉ REPUBLICĚ

Dne 1. ledna 1959 byl vyčleněním oddělení urychlovačů částic z Výzkumného ústavu pro vakuovou elektrotechniku v Praze založen Ústav vakuové elektroniky ČSAV. Stalo se tak záhy po zveřejnění dosavadních výsledků výzkumu řízené termojaderné fúze tehdejšími Sovětským svazem, USA a Velkou Británií v roce 1958 v Ženevě na II. mezinárodní konferenci Atom pro mír. V roce 1964 ústav v souvislosti s novou výzkumnou tematikou přijal název Ústav fyziky plazmatu ČSAV. Vzhledem k blízké výzkumné oblasti byl ústav již v roce 1959 pověřen i koordinací prací na poli fúze v tehdejší Československu. Několik počátečních let byla stále ještě hlavním vědeckým programem ústavu fyzika a technika kruhových urychlovačů částic, nicméně počínající studium vzájemného působení elektronů s vysokofrekvenčním polem, vyzarování relativistických elektronů a obecně vzájemného působení (interakce) vysokofrekvenčních polí s horkým plazmatem již v této době naznačovalo pozdější zaměření ústavu. To vykrystalizovalo v roce 1961, kdy se studium chování horkého plazmatu a především studium možnosti ohřevu plazmatu do termojaderných teplot stalo náplní práce dvou nově vzniklých oddělení. Práce, již tehdy dobře vyvážené mezi teorií a experimentem, se rozběhly ve dvou směrech. První směr se věnoval ohřevu plazmatu vstříkovaným svazkem energetických elektronů (přesněji řečeno nestabilitami v plazmatu tímto svazkem vybuděnými), druhý pak ohřevem z vnějšího zdroje do plazmatu vysílaných intenzivních elektromagnetických vln. Společným znakem obou směrů však bylo stále studium interakce horkého plazmatu s vy-

sokofrekvenčními poli, vznikajícími v plazmatu buď samovolně jeho nestabilitou, či dodávanými do plazmatu vnějším zdrojem. První směr se věnoval během šedesátých let teoretickému i experimentálnímu výzkumu nestabilit buzených nerelativistickým svazkem elektronů v lineárních zařízeních ELMAN-1 a ELMAN-2, během sedmdesátých a osmdesátých let pak silnoproudým (100 kA) svazkem relativistických elektronů (0,5 MeV) na zařízení REBEX. Výzkum dosáhl řady prioritních výsledků, jako např. prokázání dominantní role vysokofrekvenčních polí nestabilit v okolí horní hybridní<sup>22</sup> rezonance (kombinace dvou charakteristických frekvencí plazmatu) a vzniku virtuální<sup>23</sup> katody odrážející většinu vstříkovaných elektronů zpět do plazmatu (čímž se mnohonásobně zvyšuje účinnost ohřevu terčového plazmatu). Kromě mezinárodně uznávaných fyzikálních výsledků (tehdy se dokonce hovořilo o pražské svazkové škole) vedl vývoj a použití vysokovýkonové impulzní techniky v ÚFP později i k několika významným technickým aplikacím, jako je např. realizace zařízení pro bezoperační odstraňování ledvinových kamenů – lithotryptoru. Druhý směr se zaměřil již od počátku na hledání způsobu buzení v plazmatu se šířících vhodných větví vysokofrekvenčních vln a především pak na hledání podmínek jejich následného účinného bezsrážkového pohlcení v požadovaném místě. Za tímto účelem (a také za účelem vývoje potřebných diagnostik vysokoteplotního

22 Kombinace dvou charakteristických frekvencí plazmatu – viz Výkladový slovník

23 Zdánlivé



Tokamak CASTOR v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. Česká republika díky němu byla jedinou z deseti přístupujících zemí k Evropské unii v roce 2004, která měla dlouholeté zkušenosti s provozem tokamaku. ● vlevo

Tokamak CASTOR byl v roce 2007 přestěhován na Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT, kde funguje jako výukové zařízení pod názvem GOLEM. ● vpravo

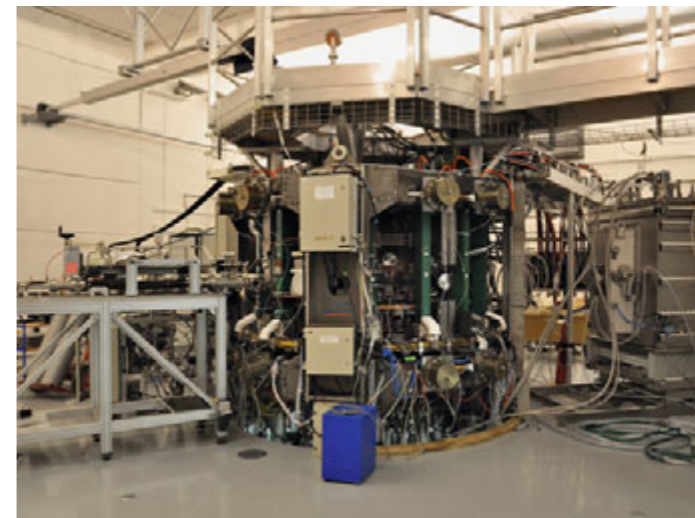
plazmatu) byla postupně postavena během šedesátých a počátkem sedmdesátých let celá řada lineárních zařízení (tj. přímých s otevřenými poli: D-1, VF-2, ECR-1, ER-2, ER-3), na kterých byla např. poprvé v laboratorních podmínkách ověřena teorií předpovězená transformace a následná úplná absorpce vysokofrekvenčních vln v plazmatu v magnetickém poli. Na toroidálním zařízení INTERMEZZO byl pak navíc v polovině sedmdesátých let proveden vůbec první experimentální důkaz v ÚFP vypracované teorie generace (vlečení) elektrického proudu vysokofrekvenční vlnou. A protože existence toroidálního elektrického proudu je podstatou magnetického udržení plazmatu v tokamacích, bylo na základě tehdejší spolupráce mezi ÚFP a Kurčatovovým ústavem v Moskvě předáno v roce 1977 do Prahy zařízení TM-1 MH<sup>24</sup>. Na jednom z prvních tokamaků na světě se měla v Praze studovat neinduktivní generace proudu v toroidální geometrii. Kromě teoretického studia s mezinárodně uznávanými výsledky bylo možné v ÚFP začít – po více než patnácti letech výzkumu – i s experimentálním studiem interakce vln tentokrát s horkým, plně ionizovaným magnetoaktivním plazmatem. Zařízení TM-1 prošlo v roce 1984 rekonstrukcí vakuové komory, která zlepšila zejména možnosti diagnostiky plazmatu, a od té doby neslo název

24 Původní název TM-1 VČ (vysokočastotný), nový název TM-1 MH (magnetic heating)



CASTOR (Czechoslovak Academy of Sciences **TOR**us). V roce 1988 se díky instalaci zpětnovazební kontroly polohy plazmatu podařilo čtyřikrát prodloužit dobu výboje. Po politické změně v roce 1990 se pak do té doby rozsáhlá mezinárodní spolupráce ÚFP v oblasti termojaderné fúze se státy východní Evropy rychle přeorientovala na západoevropské laboratoře. Od roku 2000 tato spolupráce úspěšně pokračuje v rámci asociační dohody ČR s EURATOM. Zařízení CASTOR pracovalo v ÚFP do roku 2007, poté bylo předáno na ČVUT, Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou v Praze, kde se pod jménem GOLEM zdatně osvědčuje jakožto sofistikovaná pracovní pomůcka pro výchovu budoucích inženýrů. V dnešní podobě dokáže GOLEM provádět i experimenty na dálku, včetně mezinárodního programu vzdělávání, viz <http://golem.fjfi.cvut.cz>. Po dobu provozu CASTORu v ÚFP byla zahraničními pracovišti ceněna především flexibilita zařízení. Jak při testování některých diagnostik, tak i při vlastním fyzikálním studiu turbulentních procesů vedoucích k anomálním ztrátám energie plazmatu tokamaků (hlavního důvodu tak často vytýkané časové i finanční náročnosti termojaderného výzkumu) a v neposlední řadě i potenciál jednoho z mála takovýchto zařízení v Evropě pro výchovu studentů a doktorandů.

Asociační dohoda Association EURATOM IPP.CR, které se budeme blíže věnovat v kapitole o mezinárodní spolupráci, otevřela České



COMPASS je moderní flexibilní tokamak střední velikosti, díky němuž se Česko ještě hlouběji zapojilo do evropského fúzního programu. Tokamak COMPASS nahradil v Ústavu fyziky plazmatu tokamak CASTOR.

republiky také zajímavou oblast materiálového výzkumu – materiálů obalu plodícího tritium, respektive první stěny budoucího termojaderného reaktoru. Tematikou se začaly postupně zabývat Ústav fyziky plazmatu AV ČR, Ústav jaderné fyziky AV ČR, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT a Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s. (na který dnes navazuje Centrum výzkumu Řež, s. r. o.). V ÚFP se v souladu s bohatými zkušenostmi plazmového nástřiku vyvíjely materiály pro první stěnu reaktoru na bázi B<sub>4</sub>C, později nástřiky z wolframu a kompozitu wolfram-měď. V Ústavu jaderného výzkumu Řež, a. s., se studovalo vysokoteplotní chování tekutého Pb – 17% Li coby možné náplně plodícího obalu a jeho interakce s konstrukčními materiály, či tvorba tritia. V roce 2008 v ÚJV Řež, a. s., úspěšně testovali na zařízení BESTH spoj berylium-měď spolu se Sandia National Laboratory, New Mexico, a FZJ v Jülichu. Spoj se bude používat na první stěně obalu tokamaku ITER. Pro chlazení obalu heliem vyvinula turbocirkulátor firma ATEKO, a. s., z Hradce Králové. ÚJF ve spolupráci s ÚJV se zaměřil na studium aktivace slitiny CuCrZr (pro chladicí systém reaktoru), vývoj zkušebních metod v oblasti ozařování a aktivace materiálů. Později se připojil Ústav aplikované mechaniky Brno, a. s. V roce 1982 byl na katedře fyzikální elektroniky FJFI ČVUT spuštěn neodymový laser s energií

60 J a délkou impulzu 20 ns (nebo 10 J/2 ns), který sloužil k testování rentgenové a optické diagnostiky plazmatu později použité ve velkých evropských laboratořích. Současně se na katedře rozvíjela i teorie laserového plazmatu a inerciální fúze.

Během let 1980 až 1985 byl ve Fyzikálním ústavu AV ČR přestavěn jódový laser z Fyzikálního ústavu Akademie věd SSSR na „nový“ laser PERUN s energií 50 J v impulzu o délce 0,4 ns. Experimentálně byla studována interakce laserového svazku s terčí a některé dílčí problémy inerciální fúze. Konečně v roce 2000 zahájil provoz PALS – Prague Asterix Laser System, jehož základní část – generátor a zesilovací trasu – do Prahy z Ústavu kvantové optiky Maxe Plancka v Garchingu u Mnichova přestěhovaly společně Fyzikální ústav a Ústav fyziky plazmatu AV ČR. Oba ústavy také laser doplněný interakčními komorami provozují v Badatelském centru PALS. Ačkoli se jedná o laserový systém, který patří s energií 1 kJ při délce impulzu 0,4 ns do první desítky laserových systémů na světě, termojaderné ambice nemá. Největších úspěchů laboratoř dosahuje při výzkumu rentgenových laserů, nicméně část její kapacity je věnována studiu fyzikálních problémů spojených s inerciální fúzí. Více o PALS najdete v kapitole Významná termojaderná zařízení.

# VÝZNAMNÁ TERMOJADERNÁ ZAŘÍZENÍ

## TOKAMAKY

Velké tokamaky jsou sdruženy v Koordinační skupině Large Tokamak Facilities (LTF – Velká tokamaková zařízení) a zaměřují se na experimenty doplňující databázi, z které čerpá

projekt ITER. LTF funguje pod hlavičkou IEA (International Energy Agency). Do skupiny patří vedle tokamaku JET japonský tokamak JT-60U a americký TFTR. V programu se angažují také tokamaky DIII-D z USA a německý ASDEX U.

## PŘEHLED NEJVĚTŠÍCH SVĚTOVÝCH A EVROPSKÝCH TOKAMAKŮ

název	stát	$R_o$ [m]	$a$ [m]	$B_t$ [T]	$I$ [MA]	$Q$
ITER	Mezinárodní	6,2	2	5,3	17	10
JET	EU	2,96	1,25	4	7	0,65
JT-60/JT-60SA	Japonsko	3,4/2,96	1/1,18	4,5/2,25	5/5,5	
TFTR	USA	2,62	0,97	5,9	3	0,25
DIII-D	USA	1,67	0,67	2,1	3	
MAST	Spoj. království	0,85	0,65	0,5	2	
ASDEX U	Německo	1,65	0,8	3,9	2	
Tore Supra	Francie	2,25	0,7	4,5	2	
T-15	Rusko	2,43	0,7	3,5	2	
KSTAR	Korea	1,8	0,5	3,5	2	
EAST	Čína	1,8	0,5	3,5	2	
Alcator C-mod	USA	0,67	0,22	8,07	1,5	
TCV	Švýcarsko	0,88	0,24/1,39	1,43	1,2	
FT-U	Itálie	0,92	0,31	7,5	1,2	
NSTX	USA	0,85	0,67	0,6	1	
TEXTOR	Německo	1,75	0,5	2,8	0,8	

Největší a nejúspěšnější tokamak na světě – JET (Joint European Torus) v Culhamu u Oxfordu



název	stát	$R_o$ [m]	$a$ [m]	$B_t$ [T]	$I$ [MA]	$Q$
Alcator C	USA	0,67	0,22	8	2	
TRIAM-1M	Japonsko	0,8	0,12/0,18	8	0,42	
SST-1	Indie	1,1	0,2	3	0,22	
T-10	Rusko	1,5	0,39	5	0,45	
T-15	Rusko	2,34	0,42	3,6	1,7	
CASTOR	Česko	0,4	0,1	1,5	0,025	
COMPASS	Česko	0,56	0,35	2,1	0,4	

## DOSUD NEFINANCOVANÉ PROJEKTY

Ignitor	Itálie a Rusko	1,3	0,5	13	11	
FAST	Itálie	1,82	0,64	7,5	6,5	

$R_o$  = hlavní poloměr,  $a$  = vedlejší poloměr,  $B_t$  = magnetické pole,  $I$  = proud plazmatem,  $Q$  = poměr fúzního výkonu k výkonu ohřevu (u ITER uvedena projektová hodnota, u JET a TFTR dosažená rekordní hodnota)

## JET Joint European Torus

Největším a nejvýznamnějším tokamakem na světě je bezesporu anglický JET ležící u ves-

ničky Culham poblíž Oxfordu. Práce na návrhu zařízení byla zahájena v roce 1973. V roce 1979 se naplno rozběhla stavba a o čtyři roky později (1983) byl JET uveden do provozu. Již

## JET

Hlavní poloměr	2,96 m
Vedlejší poloměr – horizontální	1,25 m
Vedlejší poloměr – vertikální	2,10 m
Magnetické pole	3,45 T
Objem plazmatu	≈ 100 m <sup>3</sup>
Typický proud kruhovým plazmatem	3,2 MA
Typický proud plazmatem tvaru D	4,8 MA
Doba stacionární části výboje	typicky 20 s, max 60 s
Dodatečný ohřev – svazek rychlých neutrálních částic	35 MW
Dodatečný ohřev – iontová cyklotronní rezonance	32 MW
Dodatečný ohřev – dolní hybrid	12 MW

během prvních let experimentů zaujal vynikajícími fyzikálními výsledky (1985 dosahuje 5 MA proudu plazmatem, 1988 dokonce 7 MA, ač projekt počítal pouze s 4,8 MA) a stal se vůdčím zařízením směřujícím k termojadernému reaktoru. Experimenty se směsí těžších izotopů vodíku – s deuteriem a tritiem – v roce 1991 znamenaly vůbec první produkci termojaderné energie ve velkém (≈1,7 MW při teplotě paliva 200 000 000 °C!). Následovala odstávka a změny spodní části komory zahrnující instalaci divertoru Mark, který zlepšuje udržení energie v plazmatu a odstraňuje nečistoty. Takto upravený JET pokoril při kampani roku 1997 hned tři světové rekordy najednou: vyprodukoval 22 MJ fúzní energie v jednom výboji, zaznamenal špičkový výkon 16 MW a dosáhl poměru produkovaného fúzního výkonu a celkového příkonu  $Q = 0,65$ . Podařilo se také stabilně produkovat 4 MW fúzního výkonu po dobu čtyř sekund. O rok později JET demonstroval použitelnost technologie dálkově ovládané výměny divertoru (s použitím robotické paže). Potřetí JET použil tritium v roce 2004, to ovšem pouze ve stopovém množství asi 1 %, zbylých 99 % plazmatu tvořilo deuterium. Vzhledem k tomu, že fúze D-T má asi 100× větší reaktivitu než fúze D-D, probíhaly při experimentech v roce 2004 obě fúzní reakce se srovnatelnou četností. To dalo

vědcům jedinečnou možnost studovat oba procesy najednou, tj. za zcela shodných podmínek. JET také přinesl zásadní pokrok v našich schopnostech řídit vysokoteplotní plazma, protože umožňuje automaticky reagovat v reálném čase na chování plazmatu pomocí prakticky všech výkonových systémů, včetně systémů ohřevu. V roce 2011 byla dokončena velká přestavba vnitřních stěn vakuové nádoby tak, aby materiály přímo vystavené plazmatu (tzv. první stěna) byly identické s materiály použitými pro první stěnu ITER – jde o berylium a v oblasti divertoru wolfram. Výsledky experimentů s touto celokovovou první stěnou jsou odborníky z ITER netrpělivě očekávány tím spíše, že JET je svým tvarem tokamaku ITER podobný, a navíc je mu nejbližší i co do velikosti. JET se svými experimentálními výsledky rozhodující měrou podílí na výzkumu termojaderné fúze v zařízeních s magnetickým udržením částic a jeho data se využívají pro plánovaný tokamak ITER s předpokládaným fúzním výkonem 500 až 700 MW.

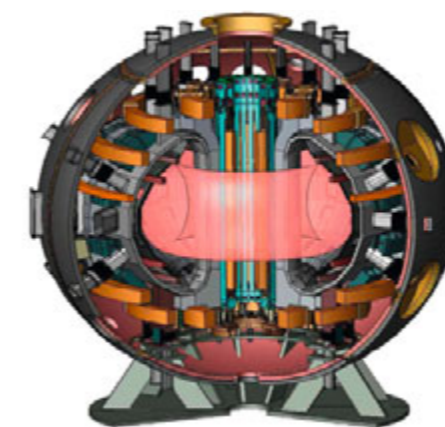
## JT-60U, JT-60SA

Japan Torus-60 (m<sup>3</sup> plazmatu) Upgrade, Japan Torus-60 Super Advanced

JT-60U byl největším japonským tokamakem, který donedávna (do roku 2008) pracoval ve středisku JAERI (Japanese Atomic Energy

## JT-60U/JT-60SA

Hlavní poloměr	3,4/2,96 m
Vedlejší poloměr	0,9/1,18 m
Magnetické pole	4/2,25 T
Proud plazmatem	5/5,5 MA
Doba výboje	15/100 s
Objem plazmatu	60/140 m <sup>3</sup>
Dodatečný ohřev – svazek rychlých neutrálních částic	40/34 MW
Dodatečný ohřev – elektronová cyklotronní rezonance	3/7 MW
Dodatečný ohřev – dolní hybrid	8/- MW



Celosupravodivý japonský tokamak JT-60SA

Research Institute) ve městě Naka. Písmeno U (jako Upgrade, zdokonalení) získal po instalaci divertoru. Šlo o jeden z nejlépe vybavených tokamaků z hlediska systémů ohřevu, řízení i diagnostiky. Drží rekord v ekvivalentním fúzním zisku  $Q \approx 1,25$  ( $Q$  odpovídající směsi 50 % deuteria a 50 % tritia ve stejném experimentu)<sup>25</sup>, tj. dosáhl tzv. ekvivalentní breakeven (to se podařilo ještě tokamaku JET). Japonský provozovatel se nicméně v souvislosti s výstavbou ITER rozhodl k dalšímu podstatnému vylepšení své vlajkové lodi mezi tokamaky, a sice na plně supravodivou

## TFTR

Hlavní poloměr	2,5 m
Vedlejší poloměr	0,85 m
Magnetické pole	6,0 T
Proud plazmatem	3,0 MA
Dodatečný ohřev – svazek rychlých neutrálních částic	39,5 MW
Dodatečný ohřev – iontová cyklotronní rezonance	14,4 MW

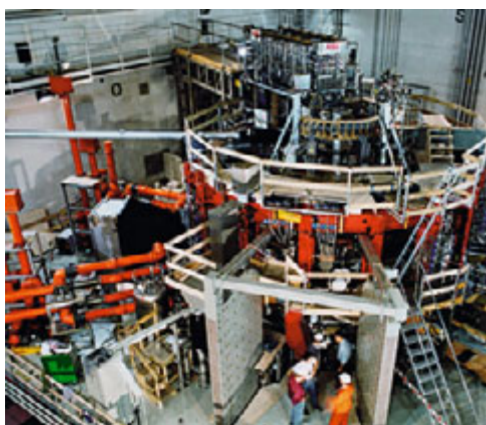
verzi s označením JT-60SA. V zásadě lze říci, že to znamená stavbu zcela nového zařízení, které má být ještě bohatší co do systémů ohřevu a řízení – mimo jiné má mít i 14 ohřevových svazků neutrálních atomů (!). Díky protažení plazmatu ve vertikálním směru (tzv. elongaci) bude mít jeho plazma více než dvojnásobný objem oproti svému předchůdci a překoná tak i dnešního rekordmana, tokamak JET. JT-60SA vyroste přímo na místě JT-60U, aby mohl využít veškerou existující infrastrukturu. Evropská unie považuje JT-60SA za tzv. satelitní tokamak k ITER, na kterém bude možné vyvíjet scénáře provozu reaktorů. Proto je JT-60SA součástí bilaterální smlouvy EU a Japonska o tzv. širším přístupu (Broader Approach) a EU ho podporuje jak finančně, tak vysíláním odborníků do Japonska. JT-60SA by měl být spuštěn v roce 2016 a vedle menší velikosti ho od ITER bude odlišovat i skutečnost, že nebude pracovat s tritiem.

## TFTR

## Tokamak Fusion Test Reactor

Největší tokamak USA byl v provozu v letech 1982–1997 v Princetonu. Po řadu let úspěšně konkuroval evropskému tokamaku JET. V roce

<sup>25</sup> Pokud by tokamak JT-60U změnil reakci D-D za reakci D-T, dosáhl by (možná) 200× většího fúzního výkonu, tj.  $Q \approx 1,25$ .



Celkový pohled na tokamak ASDEX Upgrade – Garching u Mnichova

### DIII-D

Hlavní poloměr	1,67 m
Vedlejší poloměr	0,67 m
Magnetické pole	2,1 T
Proud plazmatem	3 MA
Doba výboje	5–10 s
Dodatečný ohřev – svazek rychlých neutrálních částic	20 MW
Dodatečný ohřev – iontová cyklotronní rezonance	2,8 MW
Dodatečný ohřev – elektronová cyklotronní rezonance	2,1 MW

1995 tu byl objeven režim se zmenšeným transportem tepla a částic v centrální oblasti plazmatu (delší doba udržení energie). V tokamaku TFTR byla poprvé na světě jako palivo použita směs 50 % deuteria a 50 % tritia (JET 1991 – 89 % deuteria a 11 % tritia). Poměr deuteria a tritia 1 : 1 se předpokládá v budoucích fúzních elektrárnách. TFTR dosáhl centrální teploty 510 000 000 °C a koncem roku 1997 okolo 10,7 MW fúzního výkonu.

### DIII-D

#### Doublet III-Divertor

DIII-D je vlnkovou lodí současného fúzního programu Spojených států amerických.

### MAST (MAST UPGRADE)

Hlavní poloměr	0,85 m
Vedlejší poloměr	0,65 m
Magnetické pole (pro Upgrade)	0,84 T
Proud plazmatem	1,3 MA (2 MA)
Doba výboje	0,5 s (5 s)
Dodatečný ohřev	5 MW (12,5 MW)

### ASDEX UPGRADE

Hlavní poloměr	1,65 m
Vedlejší poloměr	0,5/0,8 m
Magnetické pole	3,9 T
Složení plazmatu	deuterium 2H/vodík 1H
Proud plazmatem	2 MA
Doba výboje	10 s
Dodatečný ohřev	27 MW
Objem plazmatu	13 m <sup>3</sup>
Hustota plazmatu	2 × 10 <sup>20</sup> m <sup>-3</sup>
Teplota	150 000 000 °C

Laboratoř General Atomics v San Diegu v USA ve spolupráci s Japonskem spustila v roce 1986 tokamak s originálním řešením divertoru (odchylovače). Divertorové sběrné desky (terče) jsou v tzv. otevřeném divertoru umístěny ve stejném prostoru jako plazma, což podstatně zmenšilo nároky na objem zabraný divertorem.

### ASDEX UPGRADE

#### Axially Symmetric Divertor Experiment

ASDEX Upgrade je největším německým tokamakiem a je v provozu od roku 1991 v Garchingu u Mnichova. Svým celkovým uspořádáním (tvarem komory, poloidálních cívek a divertoru) se velmi podobá budoucímu mezinárodnímu



Vnitřek vakuové komory tokamaku ASDEX Upgrade – Garching u Mnichova

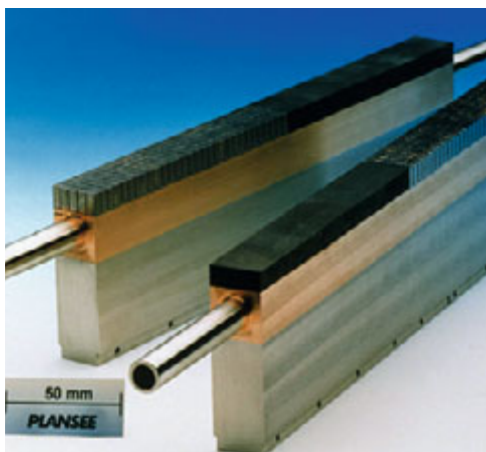
tokamaku ITER. Tokamak ASDEX Upgrade je navíc po tokamaku JET druhým největším evropským tokamakiem. Jeho vědecký program je zaměřen na optimalizaci výbojových režimů (bez nestabilit a s omezením turbulencí). Jedním z klíčových úkolů tohoto tokamaku je výzkum potlačování lokálních nestabilit plazmatu, zejména tzv. ELMů. ASDEX Upgrade hraje také klíčovou roli při výzkumu materiálů první stěny – v několika posledních letech úspěšně pracuje s plně wolframovou stěnou. Obavy z příliš velkých radičních ztrát při použití takto těžkého kovu se naštěstí nenaplnily a ASDEX Upgrade tak ukazuje, že budoucí fúzní reaktory mohou s wolframem počítat. ASDEX Upgrade navázal na velmi úspěšnou činnost tokamaku ASDEX, který stál na stejném místě, byl ale menší a méně vybavený. Právě na něm byl objeven v roce 1981 režim výboje se zlepšeným udržením částic,

tzv. H-mod. Tokamak ASDEX ukončil činnost v roce 1990 a byl převezen do Číny, kde se stal základem pro tokamak HL-2A, který pracuje dodnes.

### MAST

#### Mega-Amp Spherical Tokamak

Anglický kulový tokamak MAST je následovníkem úspěšného menšího projektu START (1991–1998). Zkoumá alternativní tvar komory a plazmatu tokamaků. Kulové uspořádání má co nejtenčí konstrukci osy tokamaku, obklopenou téměř kulovým plazmatem. V současné době probíhá podstatné technické zdokonalení tokamaku MAST na verzi „Upgrade“, ke které patří zejména zvýšení výkonu ohřevu, zvýšení magnetického pole a prodloužení výboje, a konfigurace nového, tzv. Super-X divertoru, který by měl prokázat výrazné odlehčení zátěže materiálů v této oblasti.



Části toroidálního limiteru „kontaktujícího“ plazma (tokamak TORE SUPRA): uhlíkový kompozit připevněný pomocí laseru a elektronového svazku (rakouská firma Plansee) na měděný blok chlazený tlakovou vodou je projektovaný na zátěž výkonem 10 MWm<sup>-2</sup>.

### TORE SUPRA

Hlavní poloměr	2,25 m
Vedlejší poloměr	0,70 m
Magnetické pole	4,5 T
Proud plazmatem	1,7 MA
Doba výboje (vlečený proud)	6:30 min.

### TORE SUPRA

Tore Supra je francouzský tokamak se supra-  
vodivými cívkami (slitina Nb-Ti v mědi chlazená  
supratekutým heliem o teplotě -271,45 °C,  
procházející proud 1400 A, průměr cívek  
2,4 m), který leží v komplexu Cadarache, čili  
v těsném sousedství staveniště ITER. Tokamak  
Tore Supra je v provozu od roku 1988. Snahou  
je dosažení stacionárních podmínek při velmi  
dlouhých výbojích a testování neinduktivních  
metod ohřevu. V roce 2003 Tore Supra dosáhl  
délky výboje 6 minut 30 sekund – bezkonku-  
renčního výsledku při stamilionové teplotě.  
Tomu odpovídala rekordní tepelná energie  
1000 MJ odvedená ze stěny reaktoru během



Celosupravodivý korejský tokamak KSTAR

### KSTAR

Hlavní poloměr	1,8 m
Vedlejší poloměr	0,5 m
Magnetické pole	3,5 T
Proud plazmatem	2 MA
Poměr svislého a vodorovného vedlejšího poloměru	2
Doba výboje	20–300 s
Neinduktivní buzení proudu	5 GHz LHCD
Dodatečný ohřev	3 NBI, 8 MW

jednoho výboje. V současné době se vážně  
uvažuje o přestavbě Tore Supra na tokamak  
s divertorem.

### KSTAR

**Korean Superconducting Tokamak Reactor**  
Stavba tokamaku KSTAR byla zahájena v roce  
1995 a dokončena v září 2007. Náklady dosáhly  
180 milionů eur. Supravodivý tokamak KSTAR  
byl navržen ke studiu moderních tokamakových  
režimů při dlouhých pulzech. Výzkum bude  
zaměřen na rozšíření databáze použitelné při  
návrhu průmyslového fúzního reaktoru. Jihoko-  
rejský národní fúzní program, v rámci kterého  
se tokamak staví, podporuje řada laboratoří



### EAST

Hlavní poloměr	1,75 m
Vedlejší poloměr	0,43 m
Magnetické pole	5 T
Proud plazmatem	0,5 MA
Dodatečný ohřev	0,5 MW ECH; 3 MW ICH
Neinduktivní buzení proudu	4 MW LHCD
Doba výboje	1000 s

Jeden ze dvou generátorů svazků  
vysokoenergetických atomů (NBI)  
na cestě k tokamaku COMPASS

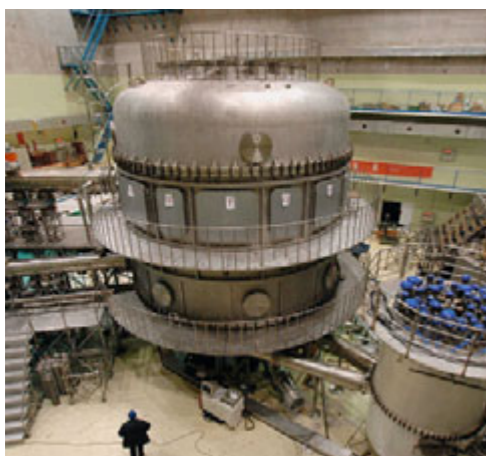
zejména ve Spojených státech: Princeton  
Plasma Physics Laboratory, General Atomic.  
Zkušenosti získané při stavbě KSTAR využívá  
Korejská agentura pro ITER při výrobě kompo-  
nent pro tokamak ITER. Ostatně KSTAR a ITER  
mají smlouvu o spolupráci. První plazma KSTAR  
zapsal 13. června 2008 a mnohem dříve, než se  
čekalo – 8. listopadu 2011 – zaznamenal H-mod.  
KSTAR spolu s čínským tokamaki EAST jsou  
zatím jediné celosupravodivé tokamaky na světě.

### EAST

Ústav fyziky plazmatu Čínské akademie věd byl  
založen v milionovém městu Hefei v roce 1978  
a hned zpočátku se věnoval tokamakovému  
programu. Nejprve vědci uvedli do provozu  
malý tokamak CT-6, pak rychle za sebou  
tokamaky HT-6B a HT-6M. V roce 1990 zahájil  
tokamak HT-7 supravodivou etapu. HT-7 byl  
přestavěn ruský T-7. Mimochodem supravo-  
divý tokamak T-7 byl koncem osmdesátých let  
nabídnut Praze. Ta však rozumně usoudila, že  
to je příliš velké sousto a nabídku s díky odmítla.  
Čínští fúzní vědci usoudili, že jejich zkušenosti  
budou stačit na světovou prioritu, a v létě 2000  
zahájili stavbu zcela nového celosupravodivého

tokamaku EAST. Zajímavé je, že Čína označova-  
la tokamak EAST jako tokamak HT-7U, což se  
běžně čte jako HT-7 upgrade. Jinými slovy EAST  
by měl být modernizovaný HT-7. Ovšem rozměry  
vakuové komory mají tokamaky HT-7 a EAST  
odlišné. Velký, respektive malý poloměr toka-  
maku HT-7 je 1,22, respektive 0,35 m, zatímco  
EAST se pyšní rozměry 1,7 a 0,4 m. Zdá se, že  
čínští vědci chápou „upgrade“ v duchovním  
smyslu slova. Tedy tokamak EAST je ideovým  
pokračováním tokamaku HT-7. Podobně tomu  
bylo ale i v sousedním Německu, kde tokamak  
ASDEX-U také ve skutečnosti představuje úplně  
nový, větší stroj, než byl tokamak ASDEX. Stav-  
ba EAST si vyžádala pouhých 37 milionů dolarů,  
a tak byla nesrovnatelně lacinější, než kdyby  
se stavělo například v USA – jedná se o 1/12  
až 1/15 nákladů. Konečně zástupce ředitele  
Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL)  
Richard Hawryluk prohlásil: „Co dokázali naši  
čínští kolegové v rámci svého finančního limitu,  
svědčí o jejich vůli a schopnostech!“ Věděl,  
o čem mluví. PPPL plánovaly také celosupravo-  
divý tokamak, ovšem 750 milionům dolarů řekl  
Kongres ne! Stavba EAST se stala z finančních  
i prestižních důvodů ryze čínskou záležitostí





Čínský EAST je první celosupravodivý tokamak na světě.



Vakuová komora švýcarského tokamaku TCV

### TCV

Hlavní poloměr	0,88 m
Vedlejší poloměr – horizontální	0,24 m
Vedlejší poloměr – vertikální	1,39 m
Magnetické pole	1,43 T
Proud plazmatem	1,2 MA
Maximální protažení plazmatu <sup>26</sup> (světový rekord)	2,9
Dodatečný ohřev na elektronové cyklotronní frekvenci	
• na 83 GHz	3 MW
• na 118 GHz	1,5 MW
Doba výboje	2 s

a zejména výroba kryogenní techniky včetně supravodivých cívek byla pro Čínu odvážným krokem do neznáma. Dnes je tým EAST přesvědčen, že zvládl to hlavní – vychladit 200 tun cívek na operační teplotu 4,5 kelvina. Mimočodem Čína je jednou ze čtyř zemí, které vlastní supravodivé termojaderné zařízení – další jsou Francie, Japonsko a Rusko. Na supravodivém tokamaku pracuje i Indie, ale zatím neúspěšně. Supravodivé cívky nepoužívají jen tokamaky, ale například Japonsko má supravodivý stellarátor Large Helical Device a další supravodivý

stellarátor se staví v Německu – Wendelstein W7-X. EAST bude mít nejméně deset let na to, aby plnil databanku údajů o dlouhožijícím plazmatu. Předpokládá se doba výboje kolem 1000 sekund podobně jako u ITER. Zásadní rozdíl od ITER, když pomíneme rozměry, je nemožnost tokamaku EAST pracovat s hořícím plazmatem, to je plazmatem, které k udržení fúzní reakce čerpá alespoň 50 % energie z vlastní fúze. Zatímco ITER bude pracovat s „nízkozápálnou“ směsí deuterium – tritium, EAST není zařízen na práci s radioaktivním tritiem

### TEXTOR

Hlavní poloměr	1,75 m
Vedlejší poloměr	0,50 m
Magnetické pole	2,8 T
Proud plazmatem	800 kA
Doba výboje	12 s
Dodatečný ohřev – svazek rychlých neutrálních částic	4 MW
Dodatečný ohřev – iontová cyklotronní rezonance	4 MW
Dodatečný ohřev – elektronová cyklotronní rezonance	0,5 MW
Tvar plazmatu	kruhový

a musí se spokojit s normálním vodíkem nebo deuteriem. První plazma dosáhl EAST 26. srpna 2006. Stacionární H-mod má datum prosinec 2010. V roce 2007 se zkusilo dálkové řízení experimentu ve spolupráci s General Atomic.

### TCV

#### Tokamak à Configuration Variable

TCV tokamak ve švýcarském Lausanne, zprovozněn v roce 1992, byl již svou konstrukcí (silně vertikálně protáhlá komora s možností modifikace tvaru magnetického pole) předurčen ke zkoumání vlivu tvaru plazmatu na jeho chování. Ukazuje se, že mírné odchýlení od původního kruhového průřezu plazmatu k průřezu ve tvaru písmene D vede k výhodnější konfiguraci plazmatu. Dlouhodobě se zde rovněž studuje neinduktivní generace proudu plazmatem pomocí směrovaného elektromagnetického vlnění a vysokofrekvenčního ohřevu (obojí na elektronové cyklotronní rezonanci).<sup>27</sup> Pozoruhodné jsou i výsledky studia rotace plazmatu. V současné době se na tokamaku TCV vážně uvažuje o instalaci systému ohřevu plazmatu neutrálním svazkem. Odborníci z tohoto pracoviště věnují značné úsilí i vývoji gyrotronů (výkonných zdrojů vysokofrekvenčních vln pro elektronový ohřev) pro ITER a základnímu výzkumu fyziky plazmatu jak teoreticky, tak experimentálně na malém zařízení TORPEX.

### TEXTOR

#### Tokamak Experiment for Technology Oriented Research

TEXTOR je další německý tokamak, umístěný v Jülichu. Vědci se na tokamaku TEXTOR snaží o detailní popis vzájemného působení horkého plazmatu se stěnami komory a optimalizaci první stěny pro další generace tokamaků. Proto je tokamak TEXTOR vybaven velkými diagnostickými přírubami a špičkovou diagnostikou k měření přístěnového plazmatu.

### TRIAM-1M

V menším japonském supravodivém tokamaku se použil na vinutí toroidálních cívek vodič Nb<sub>3</sub>Sn. Supravodivé cívky chránily před zářením štít chlazený tekutým dusíkem. Tokamak byl zaměřený na studium dlouhotrvajícího plazmatu a vyznamenal se neuvěřitelně velkými dobami výbojů – přes tři hodiny (poloidální pole bylo formováno proudem vlečeným dolní hybridní<sup>28</sup> frekvencí – spoluautoři teorie tohoto jevu pocházejí z pražského Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, kde také byla jejich teorie v roce 1976 experimentálně potvrzena).

### SST-1

Druhá nejlidnatější země světa, Indie, očekává velký nárůst poptávky po elektrické energii, a proto věnuje perspektivní řízené fúzi značnou

26 Poměr svislého a vodorovného vedlejšího poloměru v totech s neokruhovým poloidálním průřezem

27 Použité pojmy jsou vysvětleny v kapitole Princip tokamaku.

28 Viz Výkladový slovník



Limitér vymezující průměr plazmatu chrání před teplem stěny komory a patří tak k nejvíce tepelně namáhaným částem tokamaku. Toroidální variantu poprvé vyzkoušel francouzský Tore Supra. Limitér na snímku patří německému tokamaku TEXTOR v Jülichu.

### TRIAM-1M

Hlavní poloměr	0,8 m
Vedlejší poloměr	0,12/0,18 m
Magnetické pole	8 T
Proud plazmatem	0,42 MA
Doba výboje – ohřev proudem	0,2 s
Doba výboje – ohřev vysokofrekvenčním polem	> 3 hodiny

pozornost. Jde o další supravodivý tokamak ve stavbě, který se má stát prioritou, stejně jako v Číně, rychle se rozvíjejícího indického národního fúzního programu. Navazuje na menší tokamak Aditya. Indové si zakládají na tom, že mají vše své vlastní, původní konstrukce. Supravodivé cívky budou vytvářet jak toroidální, tak poloidální magnetické pole. Programem SST-1 je studium udržení energie a chování nečistot během výboje trvajících až 1000 s. Jinými slovy, na pořadu budou neinduktivní metody buzení toroidálního proudu, případně jejich kombinace.

### T-10

V tokamakovém boomu kolem roku 1975 bylo v moskevském Ústavu atomové fyziky I. V. Kurchatova postaveno několik zařízení. Největší

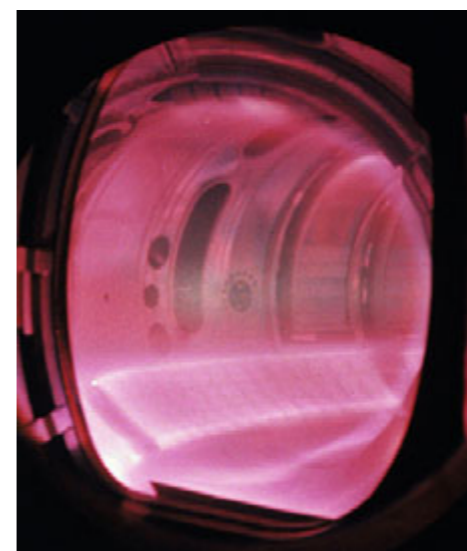
### SST-1

Hlavní poloměr	1,1 m
Vedlejší poloměr	0,2 m
Magnetické pole	3 T
Proud plazmatem	0,22 MA
Doba výboje	1000 s
Pomocný generátor proudu – dolní hybridní frekvence	1 MW
Dodatečný ohřev – svazek rychlých neutrálních částic	0,8 MW
Dodatečný ohřev – iontová cyklotronní rezonance	1 MW

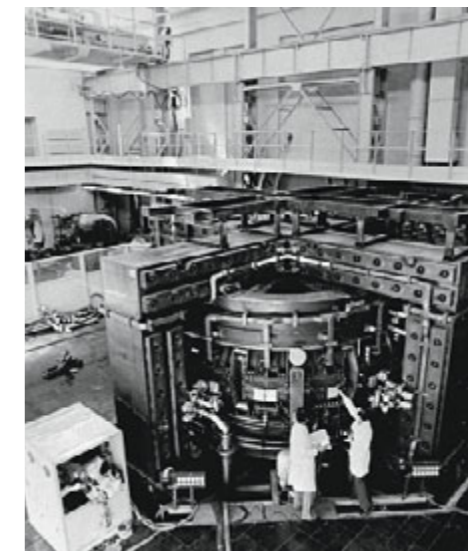
### T-10

Hlavní poloměr	1,5 m
Vedlejší poloměr	0,39 m
Magnetické pole	5,0 T
Činnost	1975 až současnost
Dodatečný ohřev – elektronová cyklotronní rezonance	2 MW

hlavní poloměr 1,5 m měl tokamak T-10. Byl určen pro rekordní iontové teploty získané Jouleovým ohřevem. Později se přidal dodatečný ohřev vysokofrekvenčním polem o elektronové cyklotronní frekvenci a studuje se také neinduktivní vlečení proudu. Provoz zahájil v roce 1975 a jako jedno z mála zařízení počátků zlaté éry tokamaků stále funguje. Pro společné experimenty na tomto tokamaku bylo z tehdejšího Československa dodáno v 80. letech přes 30 kusů unikátních heliových kryostatů (Ferox Děčín) pro supravodivé magnety ruských vysokofrekvenčních generátorů (gyrotronů), přičemž samotné supravodivé magnety byly vyrobeny (z ruského vodiče) v BEZ Bratislava a nalaďeny v Elektrotechnickém ústavu SAV tamtéž. Dodaná zařízení pracují spolehlivě dodnes! V současné



Výboj v tokamaku TEXTOR žhaví toroidální limitér.



Tokamak T-10; dodnes největší tokamak provozovaný v Ruské federativní republice

### T-15

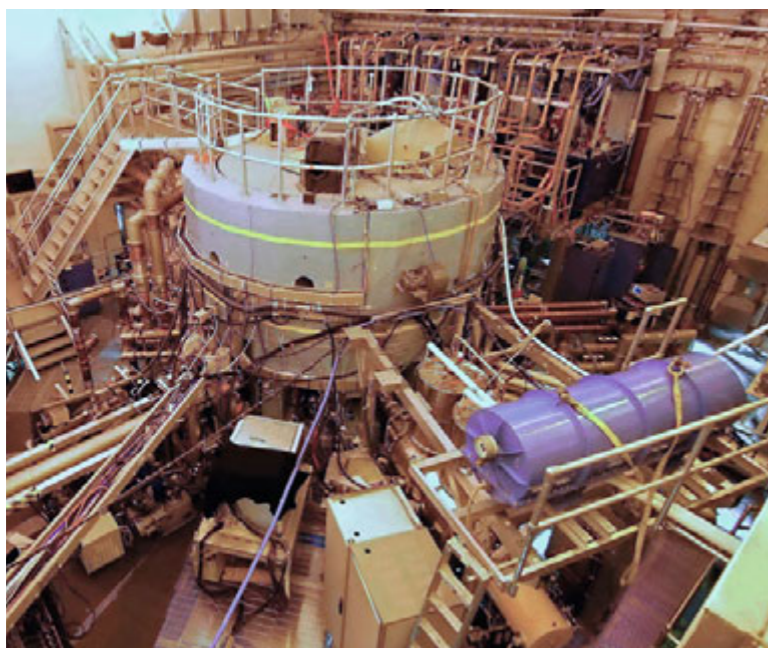
Hlavní poloměr	2,43 m
Vedlejší poloměr	0,42 m
Magnetické pole	3,6 T
Proud plazmatem	1,7 MA
Dodatečný ohřev	7 MW ECRH
Dodatečný ohřev	9 MW NBI
Dodatečný ohřev	4 LH
Doba výboje	1000 s

době je tokamak T-10 vlajkovou lodí ruského fúzního výzkumu. Jakkoli je skromný, drží posádku špičkových odborníků nad vodou v zemi, která světu myšlenku tokamaků darovala.

### T-15

Tokamak T-15 byl postavený v letech 1983–1988 jako Tore Supra, první plazma dosáhl v roce 1988. Nikdy nevyužil svoji plnou kapacitu. Vakuová komora má kruhový průřez, může pracovat se stopami deuteria, má kryogenní vakuové pumpy s tekutým heliem. S 24 supravodivými cívkami toroidálního pole z  $\text{Sn}_3\text{Nb}$  je stále nej-

větším na světě. Cívky poloidálního pole nejsou supravodivé. Projektovaný proud plazmatem 1,8 MA nedosáhl – pouze 1 MA. Používá dodatečný ohřev svazky neutrálních atomů a mikrovlnami (ECRH). Po sto výstřelech byl v bouřlivých devadesátých letech minulého století (přesně v roce 1995) zakonzervován – 12 milionů dolarů na roční činnost bylo příliš mnoho. V roce 2010 se oživily plány na modernizaci a nové jméno T-15 MD slibuje modifikovaný divertor! Originální limitér se vymění za grafitový divertor připravený na zátěž 20  $\text{MWm}^{-2}$  – podobně jako očekává ITER. Další modernizace se týká dodatečného



ALCATOR C-mod je největší univerzitní tokamak s nejsilnějším tokamakovým magnetickým polem.

ohřevu až do 20 MW a neinduktivního buzení proudu v plazmatu, což umožní pulzy až 1000 sekund dlouhé. V roce 2011 měla být modernizace dokončena, ale zdá se, že práce nabraly zpoždění. V plánu je zapálení prvního plazmatu v roce 2014 a v roce 2018 počítá T-15 MD s režimem ještě více podobným ITER. Ani T-15 se nevyhnul hit prvních let 21. století – koncept hybridního reaktoru. Místo toho, být jen zdrojem tepla, si klade hybridní reaktor za cíl být zdrojem neutronů pro ozařování přírodního uranu nebo thoria v obalu. Název hybridu již existuje: TIN-1 a projektové práce mají začít v roce 2011.

### ALCATOR ALto CAmpo TORus

V sedmdesátých letech Bruno Coppi pod dojmem přednášky L. A. Arcimoviče v MIT, Cambridge, postavil tokamak ALCATOR (ALto CAmpo TORus, latinsky „torus se silným polem“). V roce 1975 dosáhl součinu  $n\tau \approx 10^{13}$ , což bylo pětikrát lepší než světový rekord. Z té doby pochází jeho idea tokamaku IGNITOR, kterým se hodlal vydat jinou cestou než většina fúzní komunity: mělo jít o relativně malý tokamak s extrémně silným magnetickým polem. ALCATOR C byl pravděpodobně první toka-

mak, který dosáhl parametrů  $n$  a  $\tau$  potřebných pro fúzní reaktor. Zcela nový ALCATOR C-mod má nejsilnější tokamakové magnetické pole na světě devět tesel, celou vnitřní stěnu z molybdenu (tzv. all-metal-walls), cívky chlazené tekutým dusíkem a divertor.

### CASTOR/GOLEM Czech Academy Of Sciences Torus

Jediným tokamakem, o který se rozšířil jejich seznam v Evropské unii v roce 2004, byl pražský tokamak CASTOR. A to se k unii připojilo devět dalších zemí! CASTOR zcela určitě nepatřil mezi velká termojaderná zařízení, alespoň pokud se jedná o geometrické rozměry. Co se týče významu, zejména pro vědeckou komunitu evropského kontinentu, svoji roli si určitě našel. A velmi úspěšně ji nachází i na svém novém působišti, na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT, kde pracuje od roku 2008 pod jménem GOLEM (hrob rabína Löwa je přes ulici...). Kolektiv – nebo lépe řečeno komunita – mladých nadšenců dnes dokáže jednotlivé systémy tokamaku GOLEM vylepšovat takřka za pár korun a řídit z libovolného místa prostřednictvím internetu! A tak jeden z nejstarších tokamaků na světě, původně zapůjčený Praze moskevským Ústa-

### ALCATOR C-MOD

Hlavní poloměr	0,67 m
Vedlejší poloměr	0,22 m
Magnetické pole	8 T
Složení plazmatu	
Proud plazmatem	2
Dodatečný ohřev	4 MW LH; 6 MW ICH

### CASTOR/GOLEM

Hlavní poloměr	0,4 m
Vedlejší poloměr	0,1 m
Magnetické pole	1,5 T
Proud plazmatem	25 kA
Doba výboje	20 ms
Hustota plazmatu	$3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
Teplota elektronů	200 eV <sup>29</sup>
Teplota iontů	100 eV

vem atomové fyziky I. V. Kurčatova v roce 1977, stále svým způsobem představuje avantgardu práce na tokamacích.

### IGNITOR

Pokud se spustí, bude splněným snem Bruno Coppiho, který o něm uvažuje v MIT od sedmdesátých let. IGNITOR je prvním zařízením navrženým tak, aby dosáhl režimu zapálení plazmatu, to je okamžiku vypnutí vnějších zdrojů výkonu při probíhající fúzní reakci. Fúzní zesílení je v tomto režimu  $Q = \infty$ . Rozměry s ITER má nesrovnatelné (velký průměr 1,3 m oproti 6,2 m), avšak s více než dvakrát silnějším magnetickým polem (13 a 5 T) – to je návrh IGNITORu. Vedle hlavního cíle, jímž je zapálení, se počítá s intenzivním zdrojem neutronů pro testování materiálů. Po tokamacích TFTR, JET a ITER má jít o čtvrtý tokamak, který bude pracovat se směsí deuteria a tritia. Termojaderných teplot

29 Energie 1 eV odpovídá teplotě 11 600 °C.

### IGNITOR

Hlavní poloměr	1,3 m
Vedlejší poloměr	0,5 m
Magnetické pole	13 T
Složení plazmatu	
Aspekt ratio	2,8
Proud plazmatem	11,11 MA
Dodatečný ohřev	0, jen ohmický ohřev
Hustota plazmatu	$10^{21} \text{ m}^{-3}$
Teplota plazmatu ionty	10,5 keV
Bootstrap	0,86
Poznámka	24 MW IC

hodlá tokamak dosáhnout pouze ohmickým ohřevem a vysokofrekvenční zdroj 24 MW frekvence IC bude sloužit pro studium různých režimů zapálení i hoření. Jádro tokamaku dodá Itálie a tokamak se postaví v Trinitu (Troisk), kde na něho čeká zdroj schopný dodávat po dobu 100 sekund výkon 1 GW, tritiové hospodářství původně navržené pro tokamak T-14 a nedávno dokončená experimentální hala s mohutným biologickým stíněním.

Na druhou stranu je třeba říci, že zapálení v IGNITORU (na rozdíl od provozu ITER a předpokládaných fúzních reaktorů) má být „neudržené“ – tokamak IGNITOR je příliš malý na to, aby umožnil udržení nabitých fúzních produktů (částic alfa). Z toho důvodu nebude dosaženo tepelné rovnováhy mezi výkonem, který plazma ztrácí, a výkonem, který získává z fúze. Slovo „zapálení“ tak má spíše teoretický význam. Naopak v ITER budou částice alfa v objemu plazmatu zachycené, a tím pádem lze počítat s jejich energií při ohřevu plazmatu. Řada odborníků

## COMPASS

Hlavní poloměr vakuové komory	0,56 m
Vedlejší poloměr komory v horizontálním směru	0,2 m
Vedlejší poloměr komory ve vertikálním směru	0,35 m
Plazma udržující magnetické pole	0,8–2,1 T
Proud plazmatem	< 400 kA
Délka ohmického výboje	< 0,5 s
Ohmický příkon	< 500 kW
Příkon dodatečného ohřevu dvěma svazky neutrálních atomů s energií částic 40 keV	2 × 300 kW
Příkon pro neinduktivní generaci proudu (plánován pro pozdější fázi výzkumu)	2 × 300 kW
Doba udržení energie plazmatu	5–10 ms
Maximální hustota plazmatu v centru komory	< 10 <sup>20</sup> m <sup>-3</sup>
Maximální teplota elektronů v centru komory	< 1,5 keV
Maximální teplota iontů v centru komory	< 1,5 keV

navíc zpochybňuje, zda je vůbec tokamak s tak vysokým polem možné uvést do provozu. Vzhledem k velikosti polí rozhodně nelze použít pro hlavní cívky supravodiče a vzhledem k předpokládanému pulznímu provozu to ani není nutné. IGNITOR má používat chlazené měděné vodiče s výjimkou největších cívek vnějšího vinutí. Pro ně se má poprvé použít magnesium diborid MgB<sub>2</sub> jako supravodivý materiál. O vztahu k ITER prohlásil B. Coppi: „There is no COMPETITION, but we are COMPLEMENTARY!“ – „Nebudeme soutěžit, ale doplňovat se!“ Smlouvu o spolupráci při výstavbě IGNITORu podepsali v Miláně premiéři V. Putin a S. Berlusconi 26. dubna 2010. Projekt se ovšem obecně netěší podpoře italských odborníků, kteří by raději viděli svoji budoucnost ve spolupráci s Evropou, s ITER a s vybudováním vlastního tokamaku s vysokým polem FAST, který má poněkud konzervativnější parametry než IGNITOR.

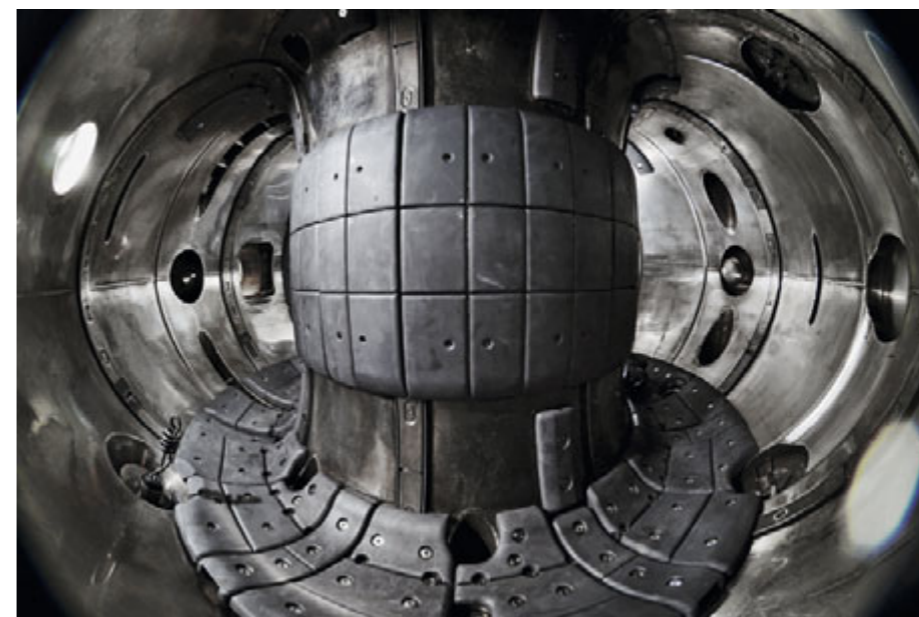
## COMPASS

## COMPact ASSEMBLY

Tokamak COMPASS se po svém uvedení do standardního provozu v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR opět řadí po bok jen několika ve světě

existujících zařízení, která díky své geometrické podobnosti s ITER mohou přinášet nové fyzikální poznatky, důležité pro upřesnění požadavků jak na definitivní geometrické parametry, tak i na charakter provozu teprve budovaného experimentálního reaktoru. Navíc charakterem a svými parametry se plazma v COMPASSu velmi podobá plazmatu okraje reaktoru. Studovat se budou tedy především jevy související s procesy odehrávajícími se na periférii plazmatu tokamaků, kde je lokalizována vrstva prudce narůstajícího kinetického tlaku plazmatu, přes kterou z horkého jádra plazmatu magnetické nádoby uniká drtivá většina energie. Protože se směrem od této vrstvy do středu tokamaku vytváří plato tlaku plazmatu, tvořící jakýsi podstavec či základ vnitřní horké oblasti (anglicky „pedestal“), mluví se o studiu „pedestal physics“.

Kromě své geometrické podobnosti s ITER má COMPASS ještě mnoho dalších předností odlišujících jej od mnoha jiných tokamaků. Je to především flexibilita vytváření nejrůznějších konfigurací udržujícího magnetického pole, neboť kromě cívek základního toroidálního pole zde existuje i systém více než 35 polo-



Vakuová komora největšího českého tokamaku COMPASS

dálních cívek se separátně (mimo tokamak) vyvedenými elektrickými přívody. Výběr té nejvhodnější konfigurace může kvalitu udržení energie plazmatu podstatným způsobem optimalizovat. V tokamacích je totiž za vhodných podmínek pozorován jev, při němž dochází ke skokovému přechodu stavu systému do režimů s lepším udržením energie plazmatu (tzv. H-mody, „high“ udržení). Po tomto přechodu se hromadí energie v centru plazmatu (což je jev žádoucí) a následuje prudký únik energie okrajem plazmatu na stěnu komory, což se děje formou časově velmi krátkých pulzů, které mají magnetohydrodynamickou povahu (tzv. ELMs, „Edge Localized Modes“) a opakují se po různě dlouhém časovém intervalu. Je-li interval příliš dlouhý, množství energie uniklé v jediném pulzu je tak vysoké, že může poškodit některé části první stěny zařízení (tedy jev nežádoucí). Také výzkum metod snižování energie ELM pulzů a všeobecně studium interakce plazmatu se stěnou zařízení bude proto další podstatnou částí budoucího programu zařízení v ÚFP. Bude k tomu sloužit i systém dodatečného ohřevu plazmatu svazky urychlených neutrálních atomů pracovního plynu (v reaktoru pak termojader-

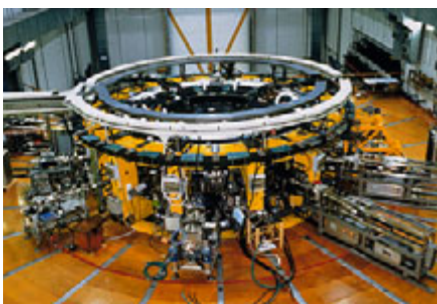
ného paliva) a dále pak na komoře tokamaku existující systém sedlových cívek, jejichž geometrii lze dokonce v jistých mezích přestavovat. Zavedení elektrického proudu vhodné velikosti do těchto cívek vytváří totiž lokální magnetická pole (jakési poruchy), která mohou s nežádoucími, samo se generujícími nestabilními magnetohydrodynamickými jevy rezonovat (proto nazývanými RMP vinutí – Resonant Magnetic Perturbation), a tím nepříznivě následky těchto jevů na udržení energie plazmatu do značné míry potlačovat.

## PINČE SE ZPĚTNÝM POLEM

## RFX

## Reversed Field Experiment

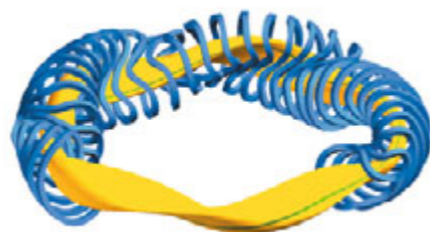
Na italském pinči RFX v Padově, který byl v provozu od roku 1992, se zkoumala fyzika spontánní reorganizace magnetického pole, velmi zajímavé vlastnosti právě tohoto druhu zařízení. Kvůli závadě na kondenzátorové baterii bylo zařízení v roce 1999 prakticky zničeno požárem. Naštěstí byl RFX dobře pojištěn a v roce 2004 se uvedl znovu do provozu, a to v dokonalejší verzi.



Na snímku je zařízení RFX (Reversed Field Experiment) v italské Padově. RFX byl spuštěn v roce 1984, v roce 1999 ho zničil požár; znovu otevřen byl 6. listopadu 2003. Italský RFX je největší zařízení tohoto druhu na světě.

### RFX

Hlavní poloměr	2 m
Vedlejší poloměr	0,5 m
Proud plazmatem	2 MA



Cívky magnetického pole a plazma stellarátoru Wendelstein W7-X. Zatímco tvar plazmatu tokamaku je rotačně symetrický a lze ho popsat dvěma souřadnicemi, plazma stellarátoru tuto symetrii postrádá a je třeba třídimenzionální popis.

### LHD

Hlavní poloměr	3,9 m
Vedlejší poloměr	0,6 m
Magnetické pole	1,5 T
Ohřev na elektronové cyklotronní rezonanci	150 kW

### W7-X

#### Wendelstein W7-X

V roce 1951 Spojené státy pod vedením astrofyzika Lymana Spitzera zahájily státem podporovaný výzkum fúze projektem Matterhorn. Spitzer byl totiž nejen autorem stellarátoru, ale i nadšeným horolezcem. Další alpský 1838 m vysoký šit poskytl jméno současnému stellarátoru Wendelstein – **wendel** (německy **šroubovice**) a **stein** je **kámen**...

Netradiční vlnovitý tvar střechy haly pro největší stellarátor světa W7-X, který Ústav fyziky plazmatu Maxe Plancka v Garchingu u Mnichova staví na severu Německa v hanzovním městečku Greifswald, jako by předznamenával to, co návštěvník uvidí uvnitř. Podivně zkroucené cívky jediného supravodivého vinutí budou mít na svědomí kompletní střížné magnetické pole, které tradiční stellarátory vytvářely dvěma sadami cívek. Modulární systém cívek – 20 plánárních a 50 „3D“ – byl navržen díky vyspělé výpočetní technice, která v době výstavby stellarátoru v roce 1951 zdaleka neexistovala. Systém byl vyzkoušen na stellarátoru W7-AS

## STELARÁTORY

### LHD

#### Large Helical Device

Největší stellarátor světa – japonský supravodivý LHD – stojí ve středisku NIFS v Toki. Byl zprovozněn v roce 1998.

### W7-AS

#### Wendelstein W7-Advanced Stellarator

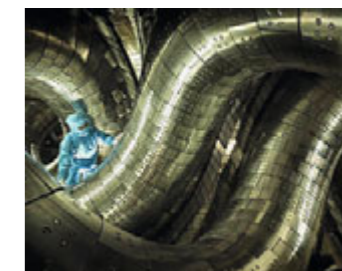
Tento německý stellarátor byl v provozu v letech 1988–2002 v Garchingu u Mnichova a jeho vynikající výsledky inspirovaly projekt stellarátoru nové generace Wendelstein W7-X.



Řídicí místnost japonského stellarátoru LHD v Toki připomíná kontrolní stanoviště NASA.



V současné době největší stellarátor na světě – japonský supravodivý LHD



Vakuová komora stellarátoru LHD

### W7-AS

Hlavní poloměr	2 m
Vedlejší poloměr	0,2 m
Magnetické pole	3,5 T
Doba výboje	5 s
Ohřev na elektronové cyklotronní rezonanci	150 kW

### W7-X

Hlavní poloměr	6,5 m
Vedlejší poloměr	0,65 m
Magnetické pole	3,0 T
Ohřev	15 MW
Doba výboje	30 min

a dobré výsledky udržení plazmatu se staly odrazovým můstkem pro projekt stellarátoru nové generace. Objem plazmatu 35 m<sup>3</sup> u W7-X odpovídá zhruba třetině objemu největšího tokamaku na světě – JET s 80 m<sup>3</sup>. Předpokládaná teplota 80 milionů °C ještě termojadernou reakci nezapálí, ale poskytne data pro odhad parametrů stellarátoru s termojaderným ohněm. Pro W7-X se vyvíjí osm až deset gyrotronů (zdrojů vysokofrekvenčního pole), z nichž na frekvenci 140 GHz každý poskytne výkon 1 MW. Dalšími zdroji energie budou svazky rychlých neutrálních částic. Doba pulzu plazmatu se poněkud vymyká číslům obvyklým u výkonných tokamaků – 30 minut! První plazma by se mělo objevit nejdříve v roce 2014 při osmiletém zpoždění a výsledky by měly poskytnout alternativu k tokamaku na cestě za průmyslovou termojadernou syntézou. Stavbu W7-X financuje federální Ministerstvo vzdělání, vědy, výzkumu a techniky 65 %, země Meklenbursko 5 %. 30 % celkových nákladů uhradí Evropská unie. Náklady oproti plánovanému půl milionu stouply dvakrát.

### TJ-II

Španělský stellarátor TJ-II byl zprovozněn v roce 1998. Jde o stellarátor typu „heliac“, pozoruhodné zařízení, ve kterém se vodiče neobtačí šroubovicově kolem plazmatu (jako je tomu u klasického stellarátoru), ale naopak plazma, včetně vakuové nádoby, se stáčí kolem vodiče. Věnuje se zejména základní problematice výzkumu, tj. udržení plazmatu magnetickým polem a měření (diagnostice) plazmatu.

## LASERY

### NIF

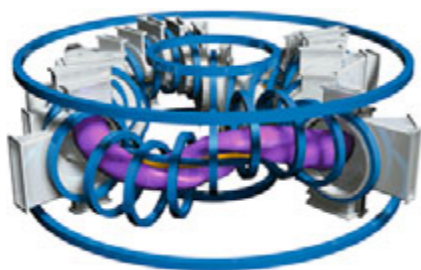
#### National Ignition Facility

NIF je 192svazkový neodymový laser. Svazky jsou sdruženy do čtveřic, každá čtveřice je společně konvertována do třetí harmonické frekvence<sup>30</sup> a fokusována na terč. Díky použití čtyřprůchodových výkonových zesilovačů má laser

30 Základní frekvence je třikrát zvětšena.



Hala v Greifswaldu na severu Německa pro stelarátor Wendelstein W7-X



Španělský stelarátor TJ-II

umístěný na ploše  $200 \times 130 \text{ m}^2$  (přibližně stejná jako u laseru NOVA) dosáhnout asi  $30\times$  větší energie, tj.  $1,8 \text{ kJ}$  na třetí harmonické frekvenci Nd-laseru. Laserový systém má proměnnou délku impulzu v rozsahu  $1\text{--}20 \text{ ns}$  s možností tvarování časového průběhu. Výkon  $500 \text{ TW}$  odpovídá  $10\,000$ násobku spotřeby Spojeného království. V polovině roku 2003 vystřelila první čtveřice svazků na terč umístěný v hliníkové sférické komoře o průměru  $10 \text{ m}$ . Plánovaný výzkum bude zaměřen jak na aplikace v oblasti jaderných zbraní, tak i na inerciální fúzi a fyziku systémů s vysokou hustotou energie. Celkové náklady přesáhnou čtyři miliardy dolarů, to je dvakrát plánovanou sumu.

Všech 192 svazků vystřelilo poprvé v červnu 2009. Dne 2. února 2010 vystřelilo opět všech 192 svazků do válce – hohlraumu. Skutečné termojaderné palivo simulovala plynem naplněná kapsle. Energie v pulzu přesáhla  $1 \text{ MJ}$  a ozáření kapsle bylo symetrické. Konečně 29. října 2010 vystřelilo všech 192 svazků do



Rozestavěný supravodivý stelarátor Wendelstein W7-X (rok 2011)

### TJ-II

Hlavní poloměr	1,5 m
Vedlejší poloměr	0,25 m
Magnetické pole	1 T
Doba výboje	30 min
Ohřev	15 MW

terčíku zmrzlé ( $\approx 20 \text{ K}$ ) směsi vodíku, deuteria a tritia. Výstřel sledovalo 26 diagnostik a znamenalo  $1000\times$  více neutronů než předchozí výstřely do plynného terče. Energie v pulzu znovu přesáhla  $1 \text{ MJ}$ !

V roce 2008 se zrodil projekt LIFE – Laser Inertial confinement Fusion-fission Energy, což měl být hybridní reaktor na bázi NIF. Plány byly velkolepé – gigawatty po 24 hodin bez emisí a jaderného nebezpečí. LIFE bude v obalu spalovat odpad štěpných atomových elektráren a projekty dlouhodobých úložišť bude možno zrušit! Připomeňme, že v obalu hybridního reaktoru je podkritické množství štěpného materiálu, a tudíž jaderný výbuch je v principu nemožný. V roce 2011 zkratka LIFE zůstala, ale název se změnil: Laser Inertial Fusion Energy má být mezistupněm mezi NIF a fúzní elektrárnou s reaktorem na bázi NIF. Koncept hybridního reaktoru byl opuštěn. V polovině dvacátých let má LIFE předvést všechny technologie požadované pro elektrárnu.



Stelarátor Wendelstein W7-X má 20 planárních a 50 třídímenzionálních cívek.



Terčíková komora laserového systému NIF

### LMJ

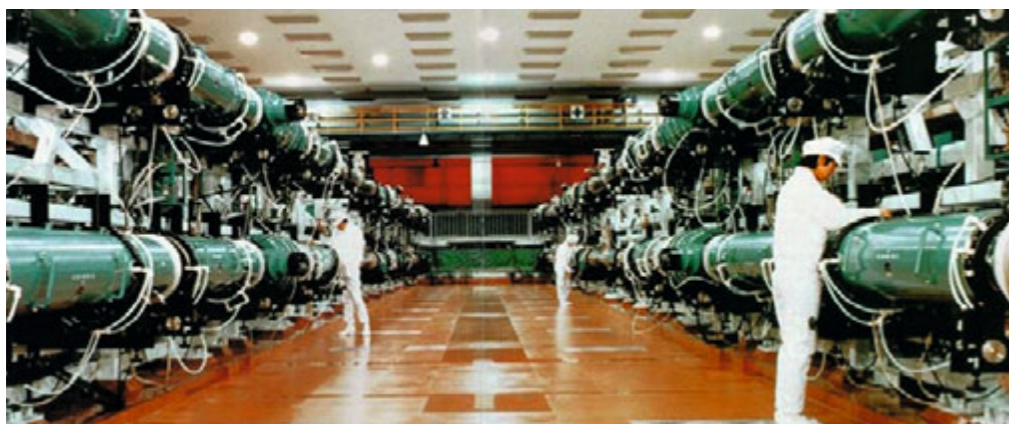
#### Laser Mégajoule

Celkem  $36 \text{ km}$  od letiště Gironde-Bordeaux leží městečko Le Barp, kde se staví neodmyslitelný LMJ (Laser Mégajoule) s úctyhodnými  $256$  svazky.  $4000 \text{ m}^2$  plochy zrcadel bude umístěno v hale o ploše  $300 \times 100 \text{ m}$ . Po  $100 \text{ m}$  optické dráhy by měl mít jeden svazek průměr  $40 \text{ cm}$  a celková energie všech svazků po konverzi na třetí harmonickou frekvenci o vlnové délce  $0,351 \mu\text{m}$  bude  $1,8 \text{ MJ}$ , což při délce pulzu  $15 \text{ ns}$  odpovídá výkonu  $120 \text{ TW}$ . Terčíková komora bude mít průměr  $12 \text{ m}$ . Francouzský vojenský rozpočet zaplatí za období amerického NIF  $1,5$  miliardy dolarů. CEA/CESTA (Atomic Energy Commission) začala stavět v roce 1999, na rok 2006 byl naplánován první experiment s energií  $600 \text{ kJ}$ , v roce 2010 výstřel s energií  $2 \text{ MJ}$  a konečně v roce 2012 zapálení D-T paliva. V současné době je z mimořádně kusých zpráv zřejmé, že LMJ má zpoždění. V roce 2011 se

píše o kompletaci zařízení v roce 2012. V roce 2002 byl zprovozněn LIL – Laser Integration Line, což je jeden svazek LMJ s plnými parametry.

### GEKKO

Rekordním laserem v produkci neutronů ( $10^{13}$  za výstřel v roce 1980) je japonský systém GEKKO XII fungující v Ústavu laserového inženýrství Ósacké univerzity s  $10 \text{ kJ}$  v druhé harmonické frekvenci (dvojnásobná frekvence vzhledem k základní), délkou impulzu  $2 \text{ ns}$  a s  $12$  svazky. GEKKO dokáže stlačit terčík D-T směsi na tisícínásobek hustoty pevné fáze ( $200 \text{ gcm}^{-3}$ ). Japoncům se vyplatila pečlivost při nastavování homogenity ozáření a dosahují mimořádných výsledků. Jeden ze svazků laseru byl v minulých letech uzpůsoben generaci velmi krátkého laserového pulzu o výkonu až  $1 \text{ PW}$  ( $500 \text{ J}$  v impulzu dlouhém  $0,5 \text{ ps}$ ). Díky synchronizaci s ostatními pulzy o nanosekundové délce lze zkoumat „rychlé zapálení“ inerciální



Laserový systém GEKKO XII v japonské Ósace

### PŘEHLED NEJVĚTŠÍCH SVĚTOVÝCH LASEROVÝCH SYSTÉMŮ K ROKU 2003

laser	laboratoř	počet svazků	energie [kJ]	délka pulzu [ns]	výkon [TW]
NIF	LLNL, USA	192	1800	5–15	360
LMJ	CEA, Francie	256	1800	5–15	360
GEKKO XII	ILE, Japonsko	12	30	1–3	30
NOVA	LLNL, USA	10	60	1–3	60
ISKRA-5	RFNC VNIIEF, Rusko	12	15	0,25	100
OMEGA	LLE, USA	24	30	0,5–3	60
Phébus	CEA, Francie	2	20	1	20
ISKRA-4	RFNC VNIIEF, Rusko	1	2	0,1	10
VULCAN	RAL, Spojené království	6	2,6	0,5–3	5
Pharos III	NRL, USA	1,5	5		
PALS	IPP AS CR, Česko	1	1,2	0,4	3
HiPER	MEZINÁRODNÍ	60	250/70	několik/0,015	4,7

fúze. Japonci jednoznačně míří k využití laserového plazmatu jako zdroje energie.

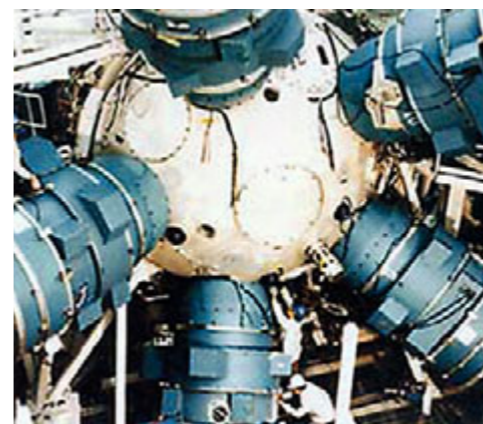
#### NOVA

Jeden z nejvýkonnějších laserů světa – americká NOVA – byl umístěn ve středisku LLNL v Livermoru v Kalifornii na ploše zvíci rozměrů fotbalového hřiště. Jednalo se o neodmyslitelný laser s impulzním výkonem 120 TW na vlnové

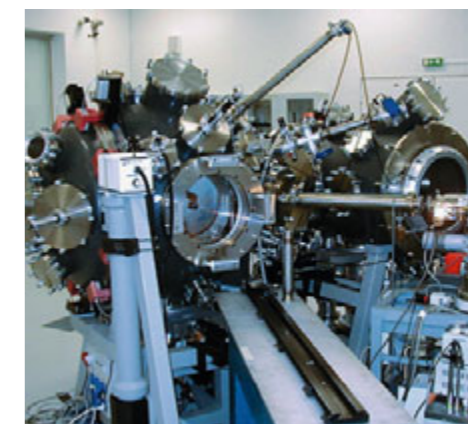
délce 350 nm (třetí harmonická frekvence Nd-laseru) s 10 svazky. Doba impulzu byla 2,5 ns. V současné době je NOVA již rozebrán.

#### ISKRA-5

Jaderné středisko ruské federace Všeruského vědeckého výzkumného ústavu experimentální fyziky (RFNC VNIIEF) leží na místě bývalého, sice významného, ale osamocené kláštera



NOVA byl nejmohutnější laserový systém na světě – Lawrence Livermore National Laboratory, USA.



Interakční komory laserového systému PALS ve společné laboratoři ÚFP AV ČR, v. v. i., a FZÚ AV ČR, v. v. i.

Sarovskij monastyr, 400 km od Moskvy. Po revoluci se klášter změnil nejprve na polepšovnu, později na gulag a konečně po válce na absolutně utajované sovětské výzkumné středisko označené jako Arzamas 16 – do roku 1992 nebylo uvedeno na žádné ruské mapě. Arzamas 16 se původně nazýval Arzamas 60, to je místo vzdálené 60 km od skutečného Arzamasu. Ovšem tak průhledné utajení si vojáci nemohli dovolit, a proto číslo 60 zaměnili za matoucí číslovku 16! Kolem torza kláštera vyrostlo město se 100 000 obyvateli. Jen v laserové části výzkumného ústavu pracovalo 25 000 lidí. VNIIEF je znám svým pionýrským výzkumem přímé přeměny energie štěpné jaderné reakce na světlo. Od roku 1989 VNIIEF provozuje největší evropský laserový systém ISKRA-5, což je jodový fotodisociační laser s 12 svazky a celkovou energií 15 kJ. ISKRA-5 dosahuje výkonu 100 TW. Zdrojové kondenzátory se nabíjejí na 67 MJ (což odpovídá účinnosti systému 0,022 %). Vlnová délka laserového paprsku je 1,315  $\mu\text{m}$ . Laserový systém je zaměřen na výzkum fúze.

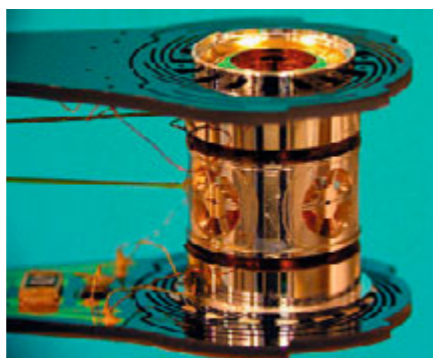
#### PALS

Pod touto zkratkou se skrývá jeden z největších evropských laserů, **Prague Asterix Laser System**, který v areálu akademických ústavů v Praze na Mazance slouží od roku 2000 výzkumu laserového plazmatu – tedy vlastně laserem

vytvářených malých obláčků husté a žhavé sluneční hmoty. Sama zkratka PALS obsahuje původní název laseru postaveného v Německu (Asterix), česky vyslovené „pals“ je anglicky „impuls“ a anglicky čtené „pelz“ znamená kumpáni, kamarádi nebo také chlapci. Však se také PALS již v roce 2010 úspěšně zařadil po bok velkým evropským laserům postaveným ve Spojeném království, Francii a Německu a v roce 2004 se dokonce stal zakládajícím členem konsorcia LASERLAB-EUROPE, které od té doby koordinuje evropský laserový výzkum. Jedním z hlavních úkolů konsorcia je umožnit vědcům ze všech evropských zemí přístup k velkým výkonovým laserům, z nichž každý je svým způsobem unikátní. Děje se tak na základě individuálních projektů, posuzovaných a vybíraných společnou mezinárodní komisí. Laser PALS patří v Evropě k nejžádanějším. Od září roku 2000 do roku 2011 jej využilo ke svým pracím v oblasti fyziky plazmatu a interakce záření s hmotou, materiálového i termojaderného výzkumu a laboratorní astrofyziky více než 250 zahraničních badatelů. Úspěšná desetiletá historie mezinárodní laboratoře PALS vedla k jejímu současnému zařazení mezi velké výzkumné infrastruktury České republiky. Její renomé v zahraničí přispělo významnou měrou k nedávnému jednomyslnému rozhodnutí zástupců 13 evropských zemí postavit v České republice ještě mnohonásobně výkonnější



Detail urychlovače těžkých iontů zařízení GSI v Darmstadtu



Hohlraum pro energii 1 MJ 192svazkového laserového systému NIF

### SROVNÁNÍ ROZMĚRŮ TŘÍ VELKÝCH LASEROVÝCH SYSTÉMŮ

	NIF	LMJ	HiPER
Počet svazků	192	240	60
Terčikové komory	1	1	alespoň 2
Délka	183 m	300 m	~ 200 m
Šířka	122 m	100 m	~ 75 m
Výška	26 m	35 m	~ 30 m

laser, zařízení ELI Beamlines, jež bude součástí celoevropského projektu ELI (Extreme Light Infrastructure).

#### HiPER

Koordinátorem projektu High Power laser Energy Research facility, do kterého je zapojena i Česká republika, je Spojené království. Konsorcium tvoří šest zemí, dvě regionální vlády a četné mezinárodní instituce. HiPER spolupracuje s programy v USA, Japonsku, Koreji, Rusku, Číně a Kanadě. Odhad hovoří o nákladech 735 milionů eur. Po přípravné fázi ukončené v roce 2013 má následovat v roce 2018 fáze konstrukční, která bude ovlivněná výsledky NIF, respektive LIFE. Spuštění se plánovalo na konec druhé dekády tohoto století, ale současná situace posunuje termín dále do budoucna. Cílem HiPER byla demonstrace ziskové termojaderné fúze v režimu rychlého zapálení (fast ignition) kdy jeden laser palivo-

vý terčik stlačí (délka mnoho ns, cca 250 kJ) a druhý nezávislý laser (15 ps, 70 kJ) stlačené palivo zapálí při opakovací frekvenci 1 Hz. Ukazuje se však, že metoda rychlého zapálení pro HiPER není vhodná. Významnou charakteristikou HiPER je jeho výhradně civilní využití, které zahrnuje vedle fúze také astrofyziku, atomovou a jadernou fyziku. Rozdělení stlačení a zapálení vede ke snížení nákladů – díky nižší potřebné energii laseru. Předskokanem HiPER je laser PETAL umístěný v Aquitaine (Francie). PETAL (Petawatt Aquitaine Laser: zapalovací pulz 0,5–5 ps; 3,5 kJ) je rovněž navržen pro studium rychlého zapálení.

#### ELI

##### Extreme Light Infrastructure

Jedná se o mezinárodní projekt stavby a provozování laserového zařízení s extrémní intenzitou laserového paprsku, o 2–3 řády vyšší, než se doposud podařilo dosáhnout. Centrálně řízená



Laserová hala Národního zapalovacího zařízení NIF

paneurovská výzkumná infrastruktura se bude skládat ze tří komplementárních pilířů v České republice, Maďarsku a Rumunsku. ELI Beamlines v České republice bude poskytovat novou generaci sekundárních zdrojů pro výzkum a mezioborové aplikace ve fyzice, medicíně, biologii a materiálových vědách. Attosecond Facility v Maďarsku se zaměří na fyziku ultrakrátkých impulzů v řádu attosekund. Photonuclear Facility v Rumunsku se bude zabývat fotonukleární fyzikou. ELI Beamlines se postaví do roku 2015 v Dolních Břežanech na jihovýchod od Prahy. V jeho pátém výzkumném programu **Fyzika plazmatu a vysokých hustot energie** se uvažuje o testování pokročilých konceptů laserové termojaderné fúze. ELI Beamlines k tomu použije ultrakrátké světelné impulzy. Laserový systém tvoří dva 10 PW bloky, které poskytnou energii 200 až 300 J v pulzech trvajících 20 až 30 fs s opakovací frekvencí 0,1 Hz.

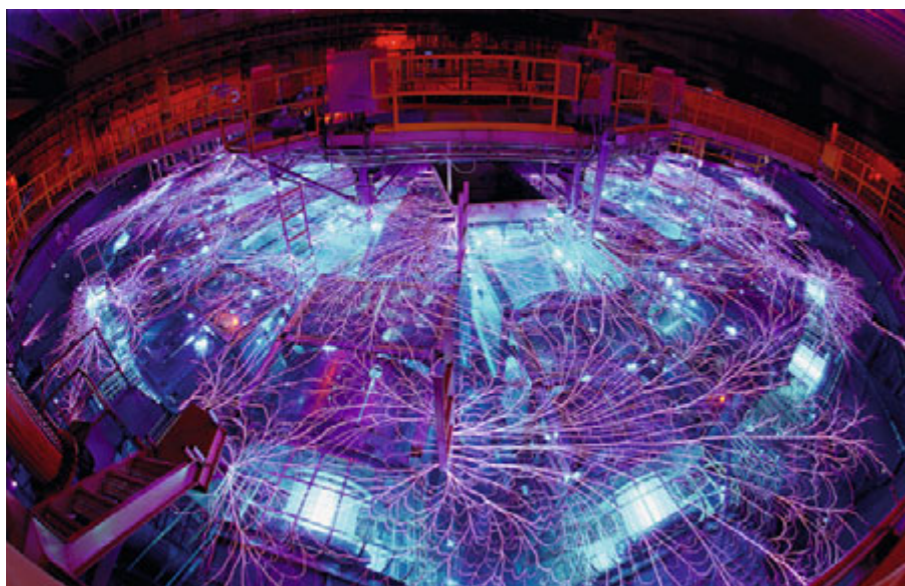
### SVAZKY LEHKÝCH IONTŮ/Z-PINČE

#### PBFA II

**Particle Beam Fusion Accelerator – Z-Machine** Největší ICF (Inertial Confinement Fusion – fúze s inerciálním udržením), dodavatel ener-

gie, jaký byl kdy postaven, vlastnila od roku 1983 laboratoř Sandia National Laboratory v Albuquerque, New Mexico, USA. Do terčiku byl schopen předat 1 MJ energie iontů lithia při plošné hustotě výkonu až 2 TWcm<sup>-2</sup>. V roce 1996 byla zahájena přestavba zařízení PBFA II na z-pinč nazvaný Z-machine. To proto, že proudový impulz se k terčiku přiváděl svislým směrem, což fyzikové a matematici nazývají souřadnicí z (na rozdíl od vodorovné roviny určené souřadnicemi xy). Terčik představuje váleček, na jehož plášti je 360 wolframových, 1 cm dlouhých drátků o síle desetiny průměru lidského vlasu. Tímto terčikem během impulzu trvajících 100 ns proteče 20 MA/50 000 GW. Terčik je ponořen do kovové schránky zvané hohlraum. Napětí je k terčiku přiváděno 36 lany délky 10 m připomínajícími obrovské loukoťové kolo. Z-zařízení dosáhlo rekordního výkonu rentgenového záření 300 000 GW. Uvažovalo se o výkonnějším zařízení X-1, které mělo začít fungovat v roce 2007. V roce 2010 mělo zapálit termojadernou fúzi. Projekt se neuskutečnil. Dosáhl-li Z-machine teploty 1,8 milionu stupňů, pak k termojaderné fúzi za podmínek Z-machine je třeba teploty tři milionů stupňů, které má nové zařízení v plánu. Výzkum fúze se tak vrací ke svým prvopočátkům, kdy se koncem čtyřicátých let pinče zdály nejschůdnějšími kandidáty řízené termojaderné fúze. Experimenty





Zařízení Z-machine v americké Sandia National Laboratory v Albuquerque státu New Mexico

s extrémně rychlým nárůstem proudu vrátily pinče znovu do hry. Návrat k prvopočátkům s sebou nese poznání, že pinče od začátku bojují s magneto-Rayleigh-Taylorovou (MRT) nestabilitou. Koncem roku 2010 se objevily zprávy o pokusu pochopit MRT pomocí experimentů s hliníkovým linerem (tenkostěnným válcem) místo drátěné klece, doprovázené optimistickým datem break-even. V roce 2013 má 100 kJ vstupujících do Z-machine vyprodukovat 100 kJ fúze.

## SVAZKY TĚŽKÝCH IONTŮ

### IRE Integrated Research Experiment

Virtual National Laboratory navrhuje vícekanálové experimentální zařízení IRE (něco jako ITER v magnetické fúzi) používající k ohřevu terčíku svazek cesiových iontů. Proud 100 A má mít energii nejméně 100 MeV, s plošnou hustotou výkonu  $3 \text{ TWcm}^{-2}$  a celkovou energií několika MJ. IRE by měl být předstupněm k ETF (Engineering Test Facility) se zhruba desetkrát

většími parametry – finálním krokem k demonstrační fúzní elektrárně.

Virtual National Laboratory of Heavy-Ion Fusion (HIF-VNL) byla založena v roce 1999 spojením „na dálku“ s laboratoří Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) a Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL).

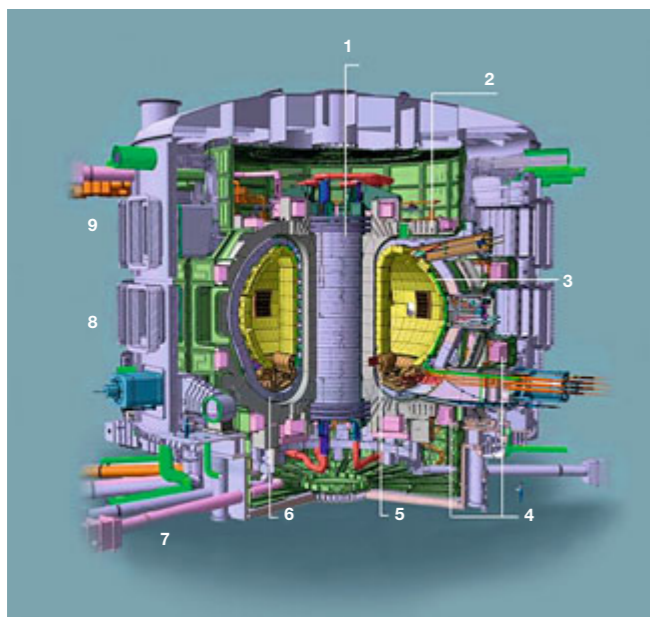
Návrh urychlovače IRE by měl být završením dílčích experimentů studujících jednotlivé problémy fyziky intenzivních svazků: zapalovač, výroba terčíků a jejich umístování, interakční komora a odvod tepla. Současně s přípravou návrhu, simulacemi a optimalizací IRE se mělo experimentovat na jednomodulovém zařízení Integrated Beam Experiment (IBX), respektive na mnohem menším, ale specializovanějším zařízení NDCX (Neutralized Drift Compression Experiment). Nakonec se postavil pouze NDCX-I a v roce 2011 je připravena stavba většího NDCX-II za 11 milionů dolarů od DoE FES s pulzem lithiových iontů o energii až 4 MeV a délky menší než 1 ns. Zařízení s těžkými ionty má větší účinnost, ale mnohem hůře se fokusuje než laser.

## ITER

Krok, či spíše by se hodilo říci skok, od největších tokamaků, jaké kdy byly postaveny – JET, TFTR, JT-60U a dalších – k termojadernému reaktoru dodávajícímu elektrickou energii do komerční sítě, je stále tak velký, že neznáme rozumnou předpověď jeho parametrů. Předpověď, podle které by se na základě výsledků získaných na stávajících experimentálních zařízeních daly spočítat parametry reaktoru, v němž by termojaderná reakce byla nejen zapálena, ale hořela by sama. To znamená nalézt vhodné materiály pro „první“ stěnu (stěna nejbliže k plazmatu), koncept plodícího obalu – blanketu (části reaktoru obklopující plazma, kde se přeměňuje pohybová energie produktů termojaderné reakce – neutronů – na teplo a kde se vyrábí z lithia palivo tritium) a v neposlední řadě naučit se řídit hoření plazmatu. Lze dokázat, že doba udržení energie je úměrná druhé mocnině rozměru magnetické nádoby. Jinými slovy – čím větší nádoba, tím snadněji dosáhneme požadovaného fúzního zesílení  $Q$  ( $Q$  je termojaderný výkon/vnější ohřevový příkon plazmatu). Samostatně hořící termojaderná reakce by měla mít  $Q$  nekonečné, neboť není třeba žádnou energii dodávat a jmenovatel  $Q$  je nulový. V současné době ještě neumíme postavit elektrárnu s termojaderným reaktorem; zároveň je nutné postavit zařízení větší než dosavadní tokamaky. Řešením je ITER – zkratka slov International Thermonuclear Experimental Reactor – mezinárodní termonukleární experimentální reaktor – a zároveň latinsky CESTA. V polovině osmdesátých let navrhl generální tajemník Komunistické strany Sovětského svazu

Michail Gorbačov francouzskému prezidentovi Françoisi Mitterandovi spolupráci na projektu mezinárodního termojaderného reaktoru. Gorbačovův poradce Jevgenij Velichov byl totiž ředitelem Kurčatovova ústavu v Moskvě. Mitterand jako správný Francouz vítal každou aktivitu, která by posunula Francii před zámořskou velmoc – Spojené státy. Nicméně o málo později v Ženevě (1985) sdělil stejný návrh Gorbačov americkému prezidentovi Ronaldu Reaganovi. V té Ženevě, kde se 27 lety předtím konala zlomová konference, která zpřístupnila výsledky do té doby přísně utajeného termojaderného výzkumu na obou stranách „železné opony“. Smlouvu o projektu ITER pod patronací Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA) se sídlem ve Vídni spolu podepsaly v roce 1987 USA, SSSR, Japonsko a Evropské společenství. Termojaderný ITER by měl prokázat vědeckou, inženýrskou a do jisté míry i ekonomickou schůdnost termojaderné elektrárny. Jako o potenciálním místě stavby se mluvilo například o západním Německu poblíž hranic s NDR. Zhroucení „železné opony“ znamenalo pro ITER více než dvouleté zpoždění. Německo muselo financovat sjednocení a „nové“ Rusko nemělo peníze ani pro sebe, natož pro ITER. Dlužno dodat, že ITER nebyl prvním mezinárodním projektem toho druhu. V roce 1977 již zmíněný Jevgenij Velichov inicioval mezinárodní projekt později nazvaný INTOR (International Tokamak Reactor). Na tomto projektu se fyzici vyučili spolupráci v dosud nebývalém rozsahu a i když INTOR skončil do ztracena bez jakéhokoli konstrukčního výsledku, byla to před





- 1 Centrální solenoid: USA, Japonsko
- 2 Vakuová nádoba: EU, Indie, Korea, Rusko
- 3 Obal: Čína, Rusko, USA, Japonsko, Korea, EU
- 4 Cívky poloidálního pole: EU, Rusko, Čína
- 5 Divertor: EU, Japonsko, Rusko
- 6 Cívky toroidálního pole: Japonsko, USA, EU, Rusko, Korea, Čína
- 7 Zesílené betonové základy: EU
- 8 Dodatečný ohřev mikrovlnami: EU, USA, Japonsko, Indie, Rusko
- 9 Dodatečný ohřev svazky neutrálních částic: EU, Japonsko, Indie

Schéma mezinárodního tokamaku ITER s vyznačenými výrobci jednotlivých částí tokamaku

zakázky pro firmy soupeře – se mijely účinkem. V listopadu 2004 se Evropská unie rozhodla pro samostatnou cestu, nicméně stále doufala, že se pro Cadarache podaří získat i protivníkovy hlasy. Skutečně: 28. června 2005 ministři partnerských zemí projektu ITER v Moskvě vydali dlouho očekávané prohlášení. ITER se bude stavět v Evropě, poblíž jihofrancouzského zámku Cadarache!

Co vezl 26. března 2005 ve své aktovce François Mitterand japonskému premiérově Junichiro Koizumimu, se možná dozvíme nejdříve za padesát let, až se otevrou archivy. Faktem je, že Japonci i v době, když už bylo rozhodnuto, bojovali, jak se sluší na potomky samurajů v zápase, ve kterém nemohli zvítězit. 28. června 2005 bylo v Moskvě oznámeno: „ITER se postaví v Evropě.“ I po letech bylo na setkání účastníků někdejších jednání při 7. interním semináři ITER 28. ledna 2010 v Cadarache cítit, jak byla vyjednávání pro všechny účastníky vyčerpávající. „Doslova na nás doléhala nesmiřitelná nálada tehdejších smlouvání a jen jsme odhadovali, kolik politiky tato jednání obsahovala,“ komentoval seminář přímý účastník Robert Arnoux. Zatímco Francii se dostalo statutu hostitele ITER, Japonsko jako „non host“ získalo tak-

zvané privilegované postavení mezi ostatními partnery, počínaje ředitelským postem, větším objemem zakázek, větším podílem vědeckého personálu a podporou přidělení místa pro demonstrační reaktor DEMO konče. Evropská unie také přislíbila přímou (finanční a personální) podporu japonskému fúznímu výzkumu v rámci dvoustranné smlouvy známé jako Broader Approach („širší přístup“), viz níže. Rozhodnutím o místě stavby začíná další etapa zahrnující založení ITER Organization (IO), právnícké osoby, která se bude starat o ITER od „narození“ do demontáže. Smlouva ITER Agreement o založení ITER Organization byla za účasti zástupců šesti partnerských států a Evropské unie podepsána 21. listopadu 2006 v pařížském Palais Elysée. Vstoupila v platnost ratifikací všemi partnery ITER dne 24. října 2007. Nejvyšším řídicím orgánem IO je **Rada ITER organization (ITER Council)**, které pomáhají dvě poradní a jedna kontrolní komise: **Poradní komise pro vědu a technologii**, **Poradní komise pro řízení** a **Finanční auditorský výbor**. Radu tvoří čtyři zástupci každého ze sedmi partnerů, Rada se schází dvakrát do roka a předseda, respektive jeho zástupce jsou voleni na čtyři roky z členů Rady. Současným předsedou (2011) je



Pokládání betonové desky do antiseismické jámy pro reaktor ITER

J. Velichov, čili sám otec myšlenky světové spolupráce na velkém fúzním experimentu. V mezidobí, kdy Rada nezasedá, řídí IO generální ředitel, dnes (2011) prof. Osamu Motojima. Ředitel „velí“ šesti oddělením a čtyřem kancelářím. Ředitel je jmenován na pět let s možností jednoho dalšího funkčního období. Cílový počet zaměstnanců IO je 700 osob. ITER je vůbec první fúzní zařízení, které potřebuje jadernou licenci. Žádost „Demande d’Autorisation de Création“, anglicky „the DAC files“ má 5243 stránek a po kladném posouzení by se mělo zaměřit slovo „demande“ za „décret“, čili „Décret d’Autorisation de Création“. Poprvé bude experimentální fúzní zařízení upřednostňovat výzkum technologie před fyzikou. V současné době se podepisují a realizují objednávky – PAs (Procurement Arrangements). Každý partner odpovídá za vybranou část zařízení – zpravidla za jednu část odpovídá více partnerů. Evropská unie financuje 45,5 % a zbývající partneři po 9,1 % všech zakázek. 90 % zakázek je plněno formou „in kind“, to je dodávkou výrobků či stavbou budov. Jinými slovy, IO se na uskutečňování zakázek až na výjimky přímo nepodílí. Kupříkladu supravodiče Nb<sub>3</sub>Sn pro CS (Central Solenoid, tj. primární vinutí transformátoru) a pro TFC (Toroidal Field Coils, tj. cívky

toroidálního magnetického pole) vyrábí sedm firem pěti států a EU. Dosud celý svět ročně vyráběl 15 tun a pro CS a TFC je zapotřebí 400 tun Nb<sub>3</sub>Sn. 94 balíčků představuje celkem 130 objednávek (PAs). K 1. lednu 2011 bylo podepsáno 48 PAs, to je 37 % celkové počtu. Zajímavá je vlastní měna IO – **ITER Units of Account (IUAs)**, ve které je vyčíslena hodnota všech zakázek. Vlastní měna – měřítko „in kind“ formy dodávek – má vyloučit závislost na čase zejména kvůli inflaci, běžné u jakékoli již zavedené měny. Všichni dodavatelé ITER musí splňovat přísné podmínky QA (normované kvality). Na výrobu vybraných částí tokamaku (supravodiče, divertor, vakuová komora) se musí výrobce kvalifikovat, to je prokázat technickou způsobilost výrobou kvalifikačních prototypů. Zvláštní režim má výroba obalu – blanketu. Na výrobě šesti verzí **Test Blanket Modules** se podílejí až na Indii všichni partneři. Způsob stavby pomocí PA dodávek je na jednu stranu unikátní, ale na stranu druhou klade obrovské nároky na koordinaci výroby. Kupříkladu výrobu supravodičů pro TFC zajišťuje šest domácích agentur a další dvě mají na starosti navíjení cívek. V únoru roku 2007 byla podepsána další důležitá dohoda, tak zvaný **Broader Approach**, mezi EURATOM a japonskou vládou – smlouva, která je v podstatě kompenzací Japonsku



Odhlení základního kamene. Zleva generální ředitel ITER, prof. Osamu Mojima, a vedoucí ruské delegace Igor Borovkov. Vzadu vpravo je vedoucí Rady ITER, Jevgenij Velichov.

Stavba haly pro montáž nepřepavitelných cívek poloidálního pole ● protější strana

za přenechání místa pro ITER Evropě. Širší přístup zahrnuje výstavbu IFERC – **International Fusion Research Centre** v Rokkasho-Muro za 340 milionů eur, které bude studovat návrhy demonstračního reaktoru DEMO, IFMIF (**International Fusion Material Irradiation Facility**) testující materiály neutronovou zátěží v programu EVEDA (**Engineering Validation and Engineering Design Activities**), nové výpočetní středisko a stavbu nového velkého, plně supravodivého tokamaku JT60-SA v Naka. Kromě toho 50 % evropských zakázek věnuje EU japonským firmám a Japonec je i ředitelem ITER Organization.

V lednu 2007 byly archeologickým průzkumem zahájeny pozemní práce stavby pro administrativní a laboratorní budovy zařízení ITER. Začala se pomalu rozbíhat jednání o objednávkách „procurement arrangements – PAs“ jednotlivých částí ITER. Jednání o dodávkách vedou agentury „domestic agencies“ (DA) – každý partner ITER má svoji DA – s dodavateli převážně domácí provenience. Evropská agentura se jmenuje Fusion for Energy (F4E, Fúze pro energii), má sídlo v Barceloně, ale s řadou zaměstnanců přímo v Cadarache. Byly zahájeny pozemní úpravy platformy pro ITER i úpravy 100 kilometrů dlouhé silnice z přístavu Fos sur Mer nedaleko Marseille do Cadarache – zpevňovaly se krajnice a mosty,

rozšiřovaly tunely. Tyto práce plně zajišťuje hostitelská země, tj. Francie prostřednictvím své vlastní agentury ITER France. Itinerář byl dokončen v lednu 2011. Počítá se s 300 konvoji o průměrné hmotnosti 900 tun a šířce devíti metrů. Dopravní zkušenosti s nadměrnými náklady ITER hledal v nedalekém Toulouse, kam se vozí k montáži části největšího dopravního letadla na světě – Airbusu A-380. ITER jakožto budoucí unikátní zařízení pátral po radě i v řadě dalších „spřátelených“ institucí. S evropským střediskem částicové fyziky CERN má podepsanou smlouvu o pomoci při návrzích supravodivých magnetů a chladicího systému, probíhají jednání o spolupráci na diagnostice. K prozařování vzorků supravodičů pro CS použil ITER neutronový difraktometr VULCAN ze zařízení Spallation Neutron Source v Oak Ridge National Laboratory v USA. Pochopitelná je úzká spolupráce se všemi tokamaky, co jich na světě je, včetně největšího tokamaku JET v britském Culhamu. V únoru 2011 podepsala IO dohodu s provozovatelem japonského Large Helical Device (LHD) – zatím největšího stelarátoru na světě – s National Institute for Fusion Research (NIFS). Není přitom žádným tajemstvím, že současný ředitel ITER získal bohaté zkušenosti právě při stavbě LHD. V době, kdy jsme chystali třetí vydání této publikace, byl položen základní kámen administrativ-



ním budovám včetně ředitelství ITER a stavěla se montážní hala pro cívky poloidálního magnetického pole. Ty jsou totiž tak obrovské, že je nelze převážet a musí se navinout na místě. V únoru 2011 byly dokončeny odstřely v jámě pro vlastní reaktor. Jáma má rozměry 87 × 124 metrů a v hloubce 17 metrů se dno pokryje betonovou deskou o síle 1,5 metru. Zbrusu nová mezinárodní škola v nedalekém Manosque pro děti a středoškoláky od tří do osmnácti let dvaceti sedmi národností získala akreditaci v rigidním systému francouzského školství a jmenuje se „International School of Provence-Alpes-Côte d’Azur“. Vedle francouzštiny se vyučuje v dalších šesti jazycích! Konečně spolupráce sedmi partnerů představujících zhruba dvacet států nemá na úrovni ITER ve světě obdoby. V roce 2010 pracovalo v IO 59 % zaměstnanců z EU, po 8 % z Japonska, Ruska a USA, 7 % byla zastoupena Korea a 5 % Čína a Indie.

První plazma se očekává v roce 2019 a pak bude postupně následovat instalace dalších komponent v kombinaci s prvními experimenty. Prvních deset let ve fázi základního provozu bude věnováno spíše fyzikálním problémům: vyladění provozních scénářů reaktoru na deuteriových experimentech, diagnostika fúzních reakcí, přechod do stacionárního (asi hodinu trvajícího) provozu. Kupříkladu pojem vyladění

tu má mnohem širší význam, než jsme „zvyklí“ u malých tokamaků. Centrální solenoid – jinak primární vinutí základního transformátoru – je složen ze šesti částí, z nichž každá může pracovat samostatně. V honbě za požadovaným průběhem elektrického proudu v plazmatu pak nastupuje skutečný elektromagnetický balet: v předmagnetizačním intervalu teče ve všech šesti modulech po dobu šesti minut proud 40 kA. Jakmile je ve vakuové komoře vybudováno plazma, každý modul pracuje samostatně, se svým vlastním průběhem proudu. V některých modulech proud spadne na nulu okamžitě, aby opět nastartoval, tentokrát v opačném směru. V jiných modulech proud klesá pomaleji, zatímco v dalších se orientace proudu mění dvakrát. Pouze dva vnitřní moduly pracují jako pár. Na konci cyklu proud v některých modulech dosáhne hodnoty 46 000 ampérů. V roce 2026 se plánují první experimenty se směsí deuteria a tritia. ITER tím pádem začne uvolňovat velké množství fúzní energie, podle předpokladu přes 500 MW. Na efektivní výrobu elektrické energie to sice ještě nestačí, ale je to velmi významný výkon z hlediska inženýrského výzkumu pro budoucí fúzní elektrárny. V druhé fázi, trvající rovněž deset let, bude proto věnována hlavní pozornost technologiím: testování součástí a materiálu, zejména posouzení šesti koncepcí lithiového obalu (blanketu) plodícího

## JAK ROSTE FÚZE

Tokamak	JET	ITER	DEMO
Objem plazmatu [m <sup>3</sup> ]	80	800	1000–3500
Fúzní výkon [MW]	16	500	2000–4000
Typická délka experimentu [s]	20	600	kontinuálně (?)

tritium. Přibližně v roce 2034 se ITER podle současných předpokladů odstaví. Pak už bude na řadě jen DEMO – demonstrační reaktor produkující elektrickou energii – a bude-li úspěšný, nic nebude bránit stavbě první skutečné průmyslové elektrárny s termojaderným pohonem. Než se s ITER rozloučíme, stručně si zopakujeme, jaké úžasné dílo se na soutoku řek Durance a Verdun staví.

Celkem 31 **napáječů** (feeders) dodává chladicí kapalinu a elektrickou energii supravodivým magnetům. „Elektrické“ napáječe propojují supravodiče tokamaku a běžné vodiče od zdrojů pomocí vysokoteplotního (jsou vychlazené „jen“ na teplotu kapalného dusíku) supravodiče. Celkem 18 **cívek toroidálního pole** vytváří magnetické pole uvnitř torusu, kde brání úniku částicím plazmatu. Cívky jsou navrženy pro energii magnetického pole 41 GJ a maximální intenzitu pole 11,8 T. Hmotnost všech cívek je 6450 tun. Šest **cívek poloidálního pole** odtlačuje plazma od stěn vakuové komory a dává mu také tvar a zajišťuje jeho stabilitu. „Díky“ obrovským rozměrům jsou cívky nepřepavitelné a pět z nich se bude navíjet ve speciální, 250 m dlouhé hale přímo v místě ITER. Hala bude později sloužit pro systémy chlazení.

Systém cívek uvnitř vakuové nádoby má dvě části. **Cívky vertikální stability** a tak zvané **ELM cívky**. Dvě cívky zajišťující svým poloidálním polem vertikální stabilitu plazmatu jsou umístěné nad střední rovinou tokamaku. Sada 27 ELM cívek vytváří rezonanční poruchy magnetického pole umožňující kontrolu některých typů nestabilit plazmatu.

Pátým systémem je systém korekčních cívek. Úkolem **korekčních cívek** je pacifikovat chyby magnetického pole způsobené nepřesným umístěním a geometrií cívek zabezpečující udržení, ohřev a tvar plazmatu.

Zbývá poslední cívka – **centrální solenoid**.

Centrální solenoid je skutečnou páteří magnetického systému tokamaku. Primární vinutí vzduchového transformátoru se skládá ze šesti nezávislých cívek navinutých ze supravodiče Nb<sub>3</sub>Sn. Počítá s magnetickým polem až 13 T. Změnou tohoto magnetického pole se induktivním způsobem budí elektrický proud v plazmatu. Centrální solenoid přispívá k tvarování magnetických siločar v oblasti divertoru a k řízení vertikální stability plazmového provazce.

Děravý sud, který vidíme na obrázku supravodivých tokamaků, je **kryostat**. Kryostat ITER je 31 m vysoká a 36,5 m široká konstrukce z nerezové oceli a bude největší vakuovou nádobou světa. Čerpaný prostor 8 500 m<sup>3</sup> je omezen „válcem“ vysokým 29 m o průměru 28 m a představuje tak největší vysokovakuovou komoru na světě. Prostor mezi vnějším a vnitřním pláštěm bude naplněn heliem o tlaku o málo větším než atmosféra sloužící jako tepelná bariéra. Kryostat sám tepelně izoluje supravodivé magnety vychlazené na teplotu 4,5 K.

**Tepelný štít** mezi vakuovou komorou a cívkami toroidálního pole a také mezi cívkami a kryostatem je tvořen jednotlivými panely z oceli s naváženými chladicími trubkami. Bude chlazen na teplotu kapalného dusíku a tak bránit přenosu tepla zářením a vedením od vakuové komory a od stěn kryostatu na supravodivé systémy.



Celkový pohled na staveniště tokamaku ITER. Vlevo nahoře hala pro montáž cívek poloidálního magnetického pole a před ní jáma pro reaktor. Snímek z balonové sondy pořízený v září 2011.

**Vakuová komora tokamaku**, ve které probíhá v plazmatu termojaderná reakce, je na vysoké vakuu vyčerpaný toroidální tunel z dvouplášťové oceli, vysoký 11 m, málo přes 19 m napříč o hmotnosti 8000 t, což nemá ani Eiffelova věž! Stěny devíti sektorů vakuové komory jsou první bezpečnostní bariérou. Každá ocelová stěna má tloušťku šest centimetrů! V prostoru mezi stěnami je stínění z oceli promývané chladicí vodou.

Vnitřní stěny vakuové komory kryje **obal** (blanket), chránící komoru a chlazené magnety před teplem a neutrony. V obalu se kinetická energie neutronů mění v teplo, které je odváděné chladivem mimo tokamak. V elektrárně to bude primární okruh parogenerátoru. Obal tvoří 440 segmentů 1 × 1,5 m, každý o hmotnosti 4,6 t. Před každým segmentem bude ještě upevněna tzv. první stěna, která je přímo vystavena záření plazmatu. Její povrch bude z berylia.

V několika speciálních testovacích segmentech bude lithium, které fúzní neutrony štěpí na tritium, jednu ze dvou složek termojaderného paliva. Ověření možnosti výroby tritia z lithia, a hlavně otestování několika možných technologií včetně volby mezi kapalnou a pevnou

fází lithia, patří mezi hlavní výzkumné úkoly experimentu ITER.

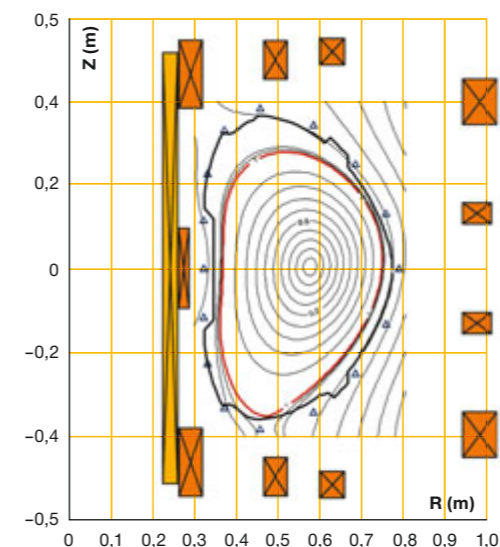
Zařízení, které jediné ve vakuové komoře bude v přímém kontaktu s plazmatem, je **divertor** umístěný v dolní části vakuové komory. 54 kazet, každá o hmotnosti přes 10 tun, je možno vyměňovat dálkově řízenou paží. Kazety mají vnitřní a vnější terč (na který přímo vedou silokřivky pole uzavírající plazma) a „deštník“, jenž je přímo pod uzavřeným plazmatem a kryje mohutné průduchy pro čerpání částic opouštějících plazma (včetně helia, produktu fúzní reakce). Kritická místa musejí vydržet hustotu dopadajícího výkonu 10 až 20 MWm<sup>-2</sup>, přičemž se rozžhaví na teplotu až 3000 °C.

Spuštění fúzních reakcí v ITER lze přirovnat k prvním startům letadel, která mohou létat „sama“, zatímco dnešní tokamaky připomínají spíše jen bezmotorové větrone, co bez pomoci neodstartují. JET má malý dodatečný motor (možnost použít tritium), který dovolí jen výzkum vlivu pohonu na pilotáž. Je dobré si připomenout, že první letadlo bratří Wrightů také nemělo eleganci letu dnešních strojů a daleko nedoletělo – ovšem bez něho by dnes dvoupalový Airbus nelétal.

# MĚŘENÍ PARAMETRŮ PLAZMATU TOKAMAKU COMPASS – DIAGNOSTIKA

## PŘEHLED POPSANÝCH DIAGNOSTIK

Měřený parametr plazmatu	Diagnostické zařízení
elektronová teplota	Thomsonův rozptyl (D), radiometr (B), pneumatická Langmuirova sonda
iontová teplota	mřížkový spektrometr (I)
elektronová hustota	Thomsonův rozptyl (D)
střední elektronová hustota	mikrovlňná interferometrie (B)
lokální hustota plazmatu	mikrovlňná reflektometrie (B), pneumatická Langmuirova sonda (J)
hustota plazmatu – prostorové rozložení	diagnostické svazky (K)
magnetické pole	Hallův detektor (A)
změny/absolutní magnetické pole	diagnostická cívka (A)
celkové záření plazmatu	bolometr (G)
měkké rtg záření (teplota, poloha, profil plazmatu; koncentrace nečistot)	polovodičové detektory s filtrem (H)
rychlost rotace plazmatu	mřížkový spektrometr (I)
zobrazení časového vývoje plazmatu	2D/1D vysokorychlostní kamera (E)
časový vývoj zesíleného signálu	fotonásobič (E)
spektrální interval	disperzní prvek (E), filtr (H)
potenciál plazmatu	ball-pen sonda (J), pneumatická Langmuirova sonda (J), diagnostické svazky (K)
elektrický proud na okraji plazmatu	diagnostické svazky (K)
neutrony (časová závislost)	štěpná komora (L), proporcionální a scintilační detektory (L)
neutrony (bez časové závislosti)	aktivační analýza (L)
runaway elektrony	Čerenkovovy detektory (L)



Rekonstrukce tvaru plazmatu (magnetických povrchů) na tokamaku COMPASS. Trojúhelníky označují polohu jednotlivých diagnostických cívek, oranžové obdélníky pak silové cívky. Tučnou černou barvou je vytažen povrch vakuové komory. V něm je pak červeně naznačen poslední uzavřený magnetický povrch, uvnitř něhož se nachází udržované horké tokamakové plazma.

Při zkoumání mechanismů fúzních reakcí a vlastností tokamakového plazmatu se využívá mnoho měřicích metod a přístrojů, které souhrnně nazýváme diagnostika vysokoteplotního plazmatu. Můžeme je rozdělit na diagnostiky pasivní, tedy měření nezasahující přímo do plazmatu a neovlivňující jeho vlastnosti, a aktivní, které naopak interakci s měřeným plazmatem využívají. Typickým příkladem pasivní diagnostiky je pozorování vyzařování vypovídající o zastoupení jednotlivých prvků v plazmatu; aktivní diagnostikou je například diagnostika pomocí svazku, kdy se hustota elektronů v plazmatu určuje z intenzity záření vznikajícího při srážkách mezi elektrony plazmatu a atomy svazku vstřelenými do tokamaku urychlovačem. Jiné možné dělení vyplývá z fyzikální oblasti či principu daného měření. Rozlišujeme pak magnetickou, mikrovlňnou, spektroskopickou a sondovou diagnostiku, diagnostiku částic či diagnostiku na svazku a dle principu měření např. Thomsonův rozptyl, mikrovlňnou interferometrii a reflektometrii a mnohé další. Moderní diagnostické metody můžeme dobře ilustrovat na příkladu českého tokamaku COMPASS, kde byla vybudována široká báze diagnostických metod, které pomáhají ve výzkumu vlastností a chování vysokoteplotního plazmatu. Odhalují se na něm zejména

zákonitosti přechodu tokamakového výboje do režimu s vyšším udržením energie a částic (H-mod).

### (A) MAGNETICKÁ DIAGNOSTIKA

Hallův detektor	magnetické pole
diagnostická cívka	změny/absolutní hodnota magnetického pole

Magnetické pole může být vytvářeno jak permanentními magnety, v tokamacích se využívají jen velmi zřídka, tak elektrickým proudem. Elektrický proud tekoucí libovolným vodičem totiž kolem sebe indukuje pole magnetické. Magnetická diagnostika tato pole umožňuje měřit a následně určovat s nimi spojené fyzikální veličiny, které podávají základní informace o vlastnostech výboje v tokamaku: magnetické pole udržující plazma v komoře tokamaku, celkový proud plazmatem a jeho rozložení, polohu sloupce plazmatu a jeho tvar, vodivost plazmatu, celkovou energii obsaženou v plazmatu a mnoho podrobností o jeho nestabilitách. Přímé měření magnetického pole umožňují Hallovy detektory využívající odklonu elektrického proudu tekoucího polovodičem do kolmého směru. Velikost tohoto Hallova efektu je úměrná



Mikrovlnná anténa radiometru • nahoře  
16kanálový přijímač radiometru • dole

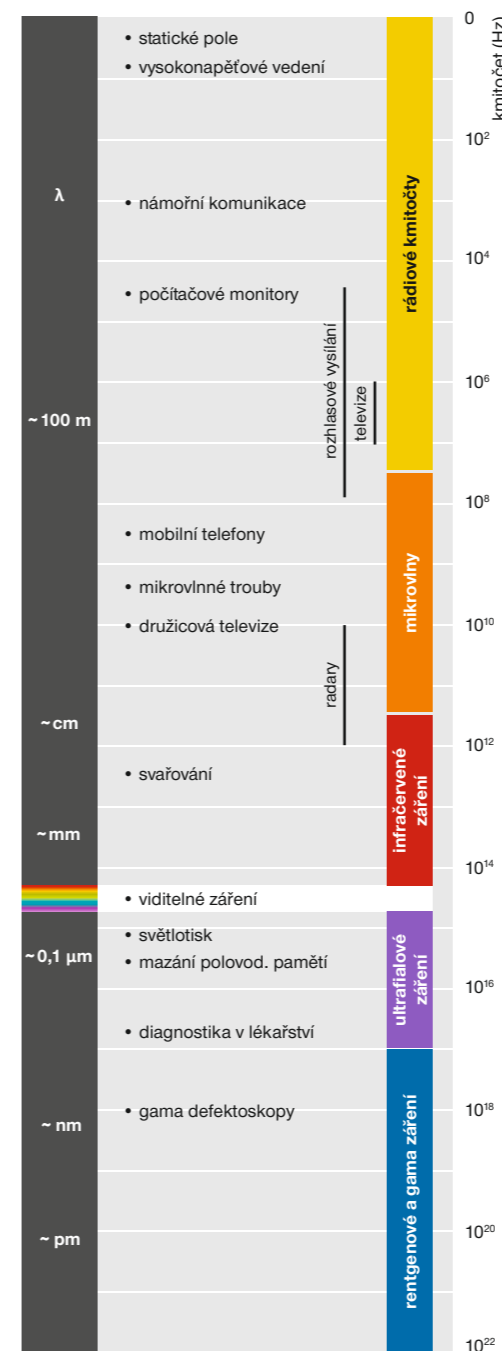
intenzitě okolního magnetického pole. Několik takových detektorů je na tokamaku COMPASS umístěno v blízkosti cívek, které vytvářejí magnetické pole pro udržení nabitých částic uvnitř vakuové komory nebo pole pro tvarování a polohování plazmatu. Měřená magnetická pole se pohybují od několika setin do několika tesel. Pro porovnání: magnetické pole Země je v řádu stotisícin tesly. Změny magnetického pole, a tím v tokamacích i jeho absolutní hodnotu, lze zase určit z proudu indukovaného v diagnostických cívkách. Tokamak COMPASS je vybaven více než 400 diagnostickými cívečkami pokrývajícími vakuovou komoru v poloidálním i toroidálním směru a umožňujícími měření výše uvedených veličin.

### (B) MIKROVLNNÁ DIAGNOSTIKA

radiometr	elektronová teplota
-----------	---------------------

Vyzařování tokamakového plazmatu v oblasti mikrovln, případně jeho interakce s mikrovlnným zářením, pomáhá určovat jinak jen těžko

zjistitelné základní parametry plazmatu, jakými jsou jeho teplota a hustota. Pasivní měření mikrovlnného vyzařování (elektronová cyklotronní emise) pomocí radiometrů umožňuje stanovit elektronovou teplotu, neboť v této části spektra se plazma chová jako absolutně černé těleso a množství vyzařování je tedy úměrné teplotě. Hustota plazmatu se naopak měří aktivními metodami. První metoda, mikrovlnná interferometrie, využívá změny fáze mikrovln při jejich interakci s elektrony plazmatu. Referenčním vlnovodem necháme šířit mikrovlny vytvářené vnějším generátorem; druhým ramenem vlnovodu o stejné délce se stejné vlnění šíří skrze měřené plazma. Rozdíl fáze mezi vlněním z těchto dvou ramen pak odpovídá počtu interagujících elektronů, a tedy elektronové hustotě plazmatu ustředněné po délce průchodu mikrovln plazmatem. Lokální hustota plazmatu se měří druhou metodou, mikrovlnnou reflektometrií, a to pomocí odrazu mikrovln od plazmatu (stejný jev se využívá pro šíření televizního a rádiového signálu při odrazu rádiových vln od ionosféry). Místo, kde se mikrovlny o dané frekvenci



Spektrum elektromagnetického záření

Na tokamaku COMPASS funguje dvoupásmový radiometr (26,5–40 GHz a 60–90 GHz) a dále dvoufrekvenční mikrovlnný interferometr (131 a 133 GHz) pro zpětnovazební řízení hustoty a vícepásmový reflektometr pokrývající oblast 18–90 GHz. Tyto přístroje umožňují měřit elektronovou teplotu v řádu stovek elektronvoltů a hustotu v rozsahu přibližně  $(0,4-10) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ .

### (C) SPEKTROSKOPICKÉ DIAGNOSTIKY

Spektroskopické diagnostiky, jak už sám název napovídá, zkoumají spektrum elektromagnetického záření plazmatu, a to od infračervené oblasti přes viditelné světlo, ultrafialové a rentgenové záření až po paprsky gama. Mikrovlnné záření se v případě plazmatu často vyděluje samostatně, zejména kvůli výrazně odlišnému způsobu detekce i míře interakce s plazmatem. Tokamakové plazma je pro většinu elektromagnetického záření (až na jistou část mikrovlnného spektra) opticky tenké, a tedy průhledné. Prakticky zde nedochází k absorpci záření, a tak lze snadno pozorovat jak jeho okrajové části, tak centrální plazma. Zatímco chladnější, okrajové plazma září výrazně ve viditelném světle, přístředové oblasti vyzařují díky své teplotě v řádu několika kiloelektronvoltů zejména v oblasti tvrdšího, rentgenového záření. Častou komplikací spektroskopických metod je skutečnost, že pozorované záření nepochází pouze z jednoho místa plazmatu (není lokální), ale je podobně jako u mikrovlnné interferometrie součtem vlivu plazmatu po celé délce

budou od plazmatu odrážet, totiž závisí právě na hustotě plazmatu (a na magnetickém poli, které je ovšem známo).

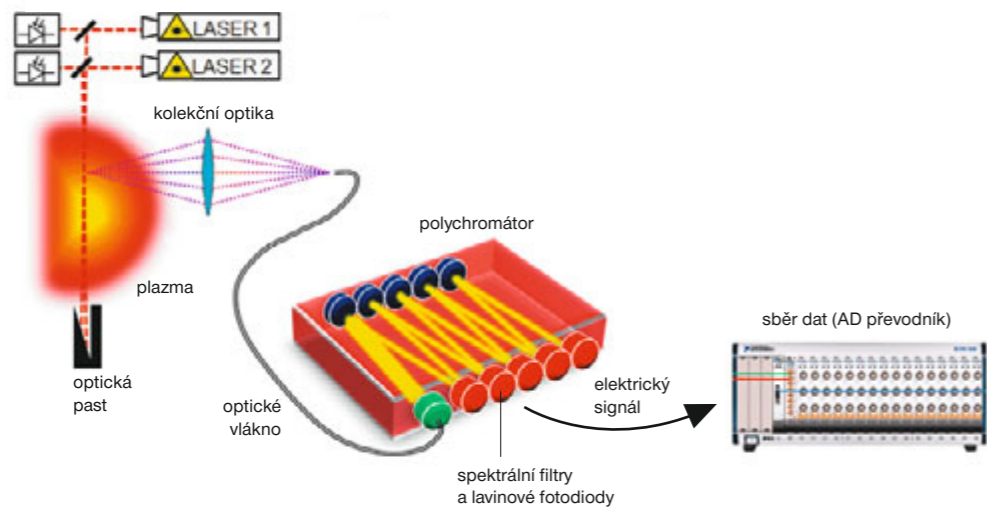


Schéma systému pro měření Thomsonova rozptylu na tokamaku COMPASS

pozorování (po chordě). Pokročilé matematické postupy, např. Abelova inverze či tomografie, však při pozorováních plazmatu z různých směrů dokážou částečně nebo úplně rozložení vyzařování zrekonstruovat.

#### (D) DIAGNOSTIKA THOMSONOVA ROZPTYLU

Thomsonův rozptyl	elektronová teplota a hustota
-------------------	-------------------------------

Jednou z nejdůležitějších, avšak velmi složité, aktivní spektroskopické diagnostiky je využití metody Thomsonova rozptylu. Jedná se o rozptyl laserového paprsku na elektronech plazmatu a následné pozorování Dopplerovým jevem rozšířeného spektra rozptýleného záření. V případě nekoherentního Thomsonova rozptylu (rozptyl na volných elektronech – nejčastější případ v tokamacích) je počet rozptýlených fotonů, a tedy intenzita rozptýleného záření, úměrný počtu elektronů v daném místě plazmatu. Velikost Dopplerova posuvu, a tedy spektrálního rozšíření původní laserové čáry, zase udává energii rozptylujících elektronů, tedy elektronovou teplotu.

Na tokamaku COMPASS jsou v provozu dva výkonné infračervené Nd:YAG lasery (1064 nm), každý o energii 1,5 J v pulzu o délce 7 ns a s opakovací frekvencí 30 Hz. O detekci rozptýleného záření se stará 28 čtyřpásmových polychromátorů analyzujících infračervené a viditelné záření z 56 prostorových bodů v plazmatu. Výběr spektrálního pásma v každém polychromátoru určují použité interferenční filtry, které toto záření dále propouštějí na lavinové fotodiody. Místo těchto polychromátorů by stejně dobře bylo možné použít jedinou difrakční mřížku v kombinaci s vhodným typem kamery (podrobněji dále). Systém Thomsonova rozptylu umožňuje změřit teploty plazmatu v rozsahu 10 eV–5 keV a hustotu v řádu  $10^{18}$ – $10^{19}$  m<sup>-3</sup>.

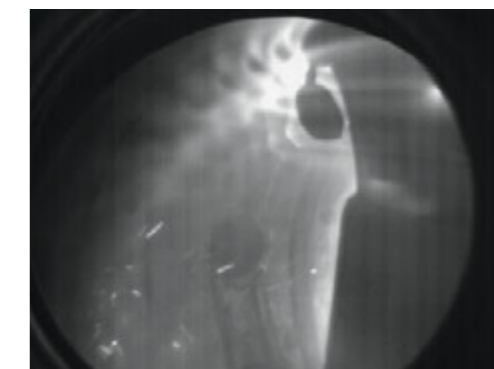
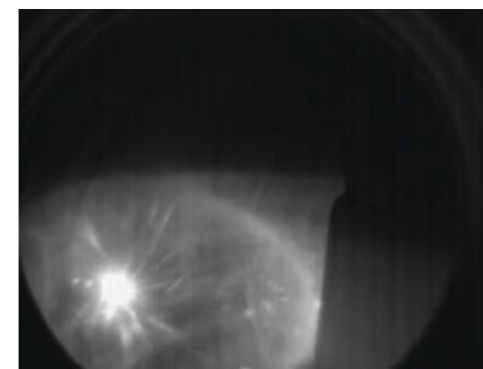
#### (E) RYCHLÉ KAMERY PRO DETEKCI VIDITELNÉHO ZÁŘENÍ

vysokorychlostní kamera (řádková)	fotografie časového vývoje plazmatu
fotonásobič	časový vývoj zesíleného detekovaného signálu
disperzní prvek	spektrální interval



Rychlá CMOS kamera připojená tangenciální přírubou COMPASSu (příruba v toroidálním směru, tj. podél plazmatu)

Interakce plazmatu se stěnou vakuové nádoby pozorovaná rychlou kamerou. Rozlišení snímků bylo 800 × 600 bodů, expozice 0,6 ms. ● dole vlevo a vpravo



K získání přehledu o vývoji tokamakového výboje a o vzájemném ovlivňování mezi horkým plazmatem a stěnou vakuové nádoby se často používají vysokorychlostní kamery snímající viditelné světlo vyzařované plazmatem. Největší záběr plazmatu dosahují při pohledu tečně k jeho ose, tedy v toroidálním směru. Mnohdy však velikost kamery či v ní použitý detekční prvek, zpravidla polovodičový chip, neumožňují její umístění přímo do diagnostického portu, který je pro pozorování vyhrazen. Kamera pak bývá umístěna až za pomocnou optikou (endoskopem), která je schopna použitím čoček, zrcadel nebo optických vláken vyvést měřené světlo dále od komory. Zatímco standardní kamery mívají rychlost snímání 25 nebo 30 snímků za sekundu, děje v plazmatu jsou mnohem rychlejší, a tak kamery používané na tokamacích musí být schopny exponovat jeden až sto tisíc snímků za sekundu! Kamery, u nichž je potřeba velká účinnost detekce a nepožaduje se extrémně rychlé vypočítání signálu, mívají

senzor typu CCD. Naproti tomu vysokorychlostní kamery, u nichž je absolutní prioritou jejich rychlost a možnost výběru výřezu (oblasti zájmu) ze snímku v reálném čase, jsou výhradně osazovány senzory typu CMOS. Fyzikálním principem detekce záření v libovolných polovodičových detektorech (včetně CCD a CMOS senzorů) je tvorba tzv. elektron-děrových párů, které vznikají při pohlcení energie záření v polovodiči. Velikost takto vytvořeného náboje je přímo úměrná pohlcené energii, a proto i intenzitě záření dopadajícího na detektor. Zatímco CCD prvek představuje dvourozměrné pole elektricky vytvořených potenciálových jam v polovodiči, v nichž se při expozici akumulují elektrony, které jsou posléze postupně po řádcích přesouvány k okraji detektoru a tam vyčteny, CMOS senzor si lze představit jako dvourozměrné pole paměťových buněk, které jsou adresovatelné, a proto vyčitatelné v libovolném pořadí. CMOS tak vyniká mnohem vyšší rychlostí přístupu k datům,





Dvoustupňový zesilovač integrovaný s řádkovou kamerou a koncovkou optických vláken

a to na úkor zmenšení pokrytí plochy senzoru v důsledku vyšší složitosti jeho technické realizace.

Pro tokamak COMPASS byly vyvinuty dvě speciální vysokorychlostní kamery (1,3 megapixelový CMOS senzor) s plným rozlišením 1280 × 1024 body při 450 snímcích za sekundu nebo až 116 000 snímcích za sekundu při nižším rozlišení 16 × 16 bodů.

### MNOHAKANÁLOVÝ SYSTÉM PRO MĚŘENÍ ZÁŘENÍ V OBORU VIDITELNÉHO SVĚTLA

Ještě rychlejší optickou diagnostikou než kamery s dvourozměrným senzorem jsou jejich jednodušší polovodičové předchůdkyně, tzv. řádkové kamery. Ty obsahují velký počet detektorů pouze v jednom směru a v závislosti na způsobu vyčítání signálu mohou dosahovat časového rozlišení až zlomků mikrosekundy. U aplikací, kde se požaduje rychlost ještě vyšší, anebo kde je rozhodující extrémně vysoká účinnost detekce, se jako detektory používají fotonásobiče.

Na vstupním okně fotonásobiče je přilétající světelné kvantum přeměněno na elektron, který je dále na soustavě elektrod (dynod) vysokým napětím urychlován a zmnožen. V závislosti na počtu dynod a přiloženém napětí může být signál z jediného detekovaného světelného kvanta (fotonu) na vstupu reprezentován milionem až stovkou milionů elektronů na výstupu a vytvořit tak již měřitelný elektrický proud.



Pole AXUV detektorů s keramickou patičí

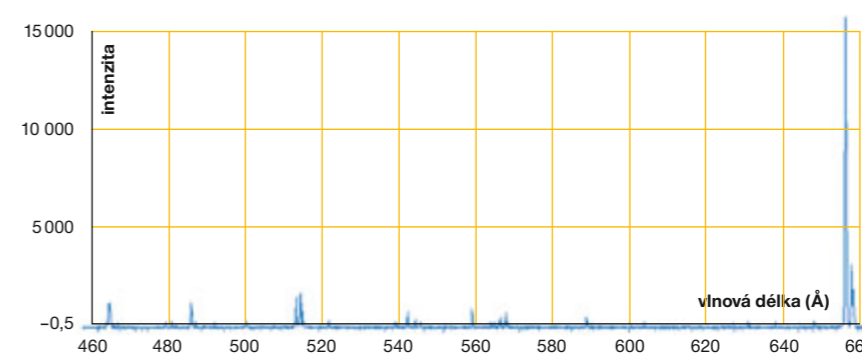
Zařazením disperzního prvku (difrakční mřížka, optický hranol, interferenční filtr) mezi zdroj záření a detektor můžeme světlo rozložit podle vlnových délek, či propustit a následně detekovat pouze vybranou část spektra. Toho se využívá například tehdy, když je třeba měřit charakteristické záření pouze určitého druhu atomu či iontu.

Na tokamaku COMPASS se s prostorovým rozlišením kolem jednoho centimetru monitoruje vyzařování vodíku na vlnové délce 656,28 nm, což je nejintenzivnější spektrální čára vodíku ve viditelném světle, tzv.  $H_{\alpha}$ , a charakteristické čarové spektrum příměsí plazmatu, jakými jsou uhlík, kyslík, železo, wolfram a další. Děje se tak pomocí variabilního optického systému, který začíná zobrazujícím objektivem, do něhož lze vložit interferenční filtr a který pokračuje 20 m dlouhými celokřemennými optickými vlákny o průměru 200  $\mu\text{m}$  a končí zvoleným typem detektoru. Tím může být několik fotonásobičů, řádková kamera či spektrometr.

### (G) BOLOMETRICKÁ DIAGNOSTIKA

bolometr	prostorové rozložení/časový vývoj celkového záření plazmatu
----------	---

Tokamakové plazma ztrácí vlivem vysoké teploty značnou část své energie zářením. Podobný jev lze pozorovat u rozžhavených předmětů, které mívají červenavé zabarvení při teplotě okolo 1000 °C nebo žlutavé jako povrch Slunce při 6000 °C. Plazma je však ještě teplejší,



V čase ustředěné spektrum viditelného světla vyzařeného během typického výboje tokamaku COMPASS

a většina vyzařování tak spadá do ultrafialové a rentgenové oblasti.

K měření celkových radiačních ztrát plazmatu a ke zjištění prostorového rozložení vyzařovaného výkonu slouží bolometry. Ty mohou být realizovány například jako absorbéry (tenké zlaté destičky) s teplotním čidlem, jejichž teplota se zvyšuje při absorpci dopadajícího záření, nebo jako pyroelektrické prvky (krytal  $\text{LiTaO}_3$ ) či polovodičové detektory bez vstupního okna (AXUV diody) vytvářející elektrický proud při absorpci záření. Typická časová odezva prvních dvou typů bolometrů je v řádu milisekund. Polovodičové bolometry dosahují časové rozlišení až stovky nanosekund, daní je však snížená citlivost detekce v ultrafialové části spektra. Jelikož je tokamakové plazma opticky tenké – zanedbatelná absorpce záření pro většinu vlnových délek – a září v celém objemu vakuové komory, měření nevypovídají přímo o vlastnostech plazmatu v daném místě, ale jsou součtem záření z celého prostorového úhlu pozorování. Informace o lokálním vyzařování vyžadují zpracování naměřených údajů pomocí speciálních transformací. Pokud předpokládáme osovou symetrii plazmatu, k rekonstrukci postačuje jedno pole detektorů a lze použít jednoduchou proceduru, tzv. Abelovy inverze. Jinak je třeba použít více detektorových polí a zvolit relativně komplikované tomografické rekonstrukce.

Na tokamaku COMPASS může být instalováno celkem šest dvacetikanálových detektorů na bázi AXUV diod detekujících fotony o ener-

giích 7 eV–6 keV (vlnové délky od 0,2 nm do 180 nm). Jejich zorná pole pokrývají celý poloidální řez plazmatu s prostorovým rozlišením 1–2 cm a díky rychlému zesilovači jsou schopny sledovat změny záření plazmatu v mikrosekundových časech.

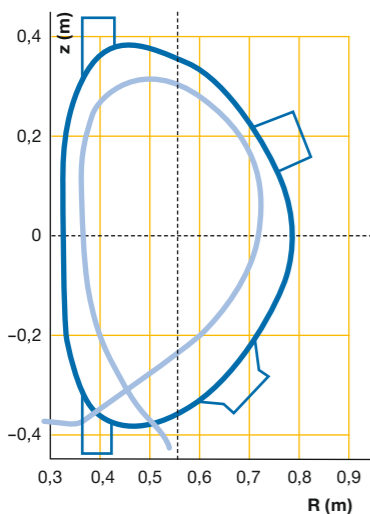
### (H) DIAGNOSTIKA MĚKKÉHO RENTGENOVÉHO ZÁŘENÍ

polovodičové detektory s filtrem	měkké rtg záření (teplota, poloha profil plazmatu; koncentrace nečistot)
----------------------------------	--

U velkých tokamaků spadá většina vyzařování do měkké rentgenové oblasti spektra, v níž nejvíce září nejteplejší část plazmatu. Diagnostika měkkého rentgenového záření (SXR) je proto vhodná k monitorování aktivity středu plazmatu, výpočtu teploty plazmatu, pozorování záření nečistot a odhadu jejich koncentrace. Navíc poskytují prostorově rozlišená měření informací o poloze a profilu plazmatu.

K měření SXR se často používají chlazené polovodičové detektory s velmi tenkým vstupním oknem, které jsou oproti diodám pro bolometrii navíc kryty tenkým filtrem nepropustným pro viditelné a ultrafialové záření a tlustším materiálem polovodiče, aby byl detektor citlivý i na tvrdší záření.

Na tokamaku COMPASS mohou být instalovány maximálně dva 35- a dva 20kanálové nechlazené polovodičové detektory kryté



Zorné pole instalovaného měkkého rentgenového detektoru (vakuová komora je znázorněna tmavě modře, poslední uzavřený magnetický povrch světle modře, diagnostické porty modře)

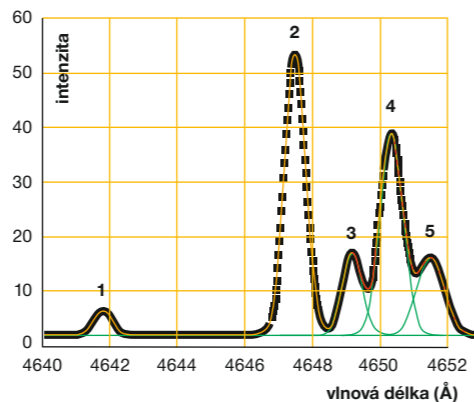
beryliovou fólií o tloušťce 5  $\mu\text{m}$  detekující fotony o energiích 0,5–10 keV. Jejich zorná pole pokrývají středové plazma s prostorovým rozlišením 1–2 cm a díky rychlému zesilovači jsou detektory schopny sledovat změny záření plazmatu v mikrosekundových časech.

### (I) MĚŘENÍ RYCHLOSTI ROTACE PLAZMATU

mřížkový spektrometr	iontová teplota, rychlost rotace plazmatu
----------------------	---

Měření poloidální a toroidální rychlosti rotace plazmatu v tokamacích má pro pochopení fyziky termojaderného plazmatu velký význam, neboť s těmito veličinami je přímo spojena doba udržení plazmatu. Rychlost rotace lze měřit pomocí Dopplerova posuvu spektrálních čar ve spektrometru s velmi vysokým spektrálním rozlišením. Dopplerův posuv je vlastně zkrácení nebo prodloužení vlnové délky záření v důsledku vysoké rychlosti zdroje záření (podobně se v astronomii mluví o tzv. modrém a rudém posuvu ve spektru hvězd). Jelikož i neuspořádaný tepelný pohyb iontů způsobuje Dopplerův posuv, lze ze šířky spektrální čáry,

1 O II – 4641,81 Å      4 C III – 4650,25 Å  
2 C III – 4647,42 Å      5 C III – 4651,47 Å



Pozorované spektrum vybraných spektrálních čar pro měření rotace plazmatu na tokamaku COMPASS

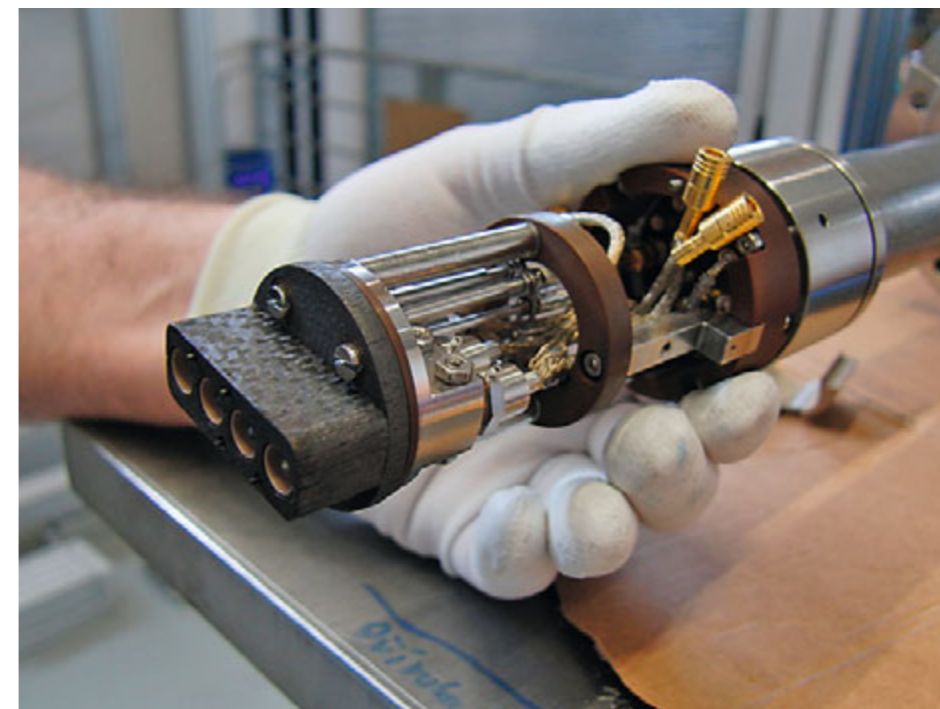
kteří vzniká složením záření mnoha chaoticky se pohybujících zdrojů, odhadnout iontovou teplotu plazmatu.

Na tokamaku COMPASS je nyní nainstalován spektrometr s vysokým spektrálním rozlišením, který je navržen pro pozorování jen velmi úzké spektrální oblasti okolo  $\sim 2$  nm, a to okolo vlnové délky záření iontů uhlíku (nejčastější nečistota v tokamacích) 465 nm. Mřížkový spektrometr je na výstupu vybaven vysokorychlostní spektroskopickou, Peltiírovým článkem chlazenou (opak topné spirály – průchodem elektrického proudu se článek ochlazuje) kamerou s vysokou kvantovou účinností detekce, což umožňuje měření s časovým rozlišením až 2 ms.

### (J) SONDOVÁ DIAGNOSTIKA

pneumatická Langmuirova sonda	potenciál plazmatu, hustota plazmatu, elektronová teplota
ball-pen sonda	potenciál plazmatu

Tokamakové plazma je prostředí velmi horké, a tak se jeho teplota pohybuje od několika tisíců stupňů na okraji plazmatu až po stovky



Hlavice se čtyřmi ball-pen a Langmuirovými sondami na konci horizontálního reciprokého manipulátoru

milionů stupňů v jeho středu. A právě v důsledku takto vysokých teplot se jedná o prostředí složené téměř jen z elektricky nabitých částic. Změřením jejich toků v daném místě lze například určit lokální hustotu plazmatu a z jejich změn pak odhadnout velikost a charakter turbulencí. Takové měření by bylo možné provést vnořením vodivého drátku do plazmatu, tzv. Langmuirovy sondy. Jenže žádný materiál nemůže dlouhodobě vzdorovat v plazmatu panujícím teplotám! Přesto lze provést experiment, kdy se taková sonda, obvykle z materiálů s velmi vysokým bodem tání (nad 2000 °C), jako je uhlík nebo wolfram, pomocí pneumatického systému vstřelí na krátký čas do okrajového plazmatu a v časech okolo 100 ms opět rychle vytáhne mimo plazma. Nepřipojí-li se přitom na sondu žádné napětí (potenciál vůči komoře), měří se plovoucí potenciál sondy, který je svázán s potenciálem plazmatu. Připojí-li se na sondu dostatečně velké záporné napětí, které nedovolí elektronům z plazmatu dopadat na sondu (řádově 100–200 V), měří se iontový

saturační proud úměrný hustotě plazmatu. Proměřením celé voltampérové charakteristiky (nejčastěji připojením střídavého napětí) pak lze zjistit elektronovou teplotu plazmatu. Další druhy sond jsou modifikací výše uvedeného principu, kdy se kombinuje větší počet sond, mění se jejich tvar či je rozdělena stínicí a sběrná elektroda sondy apod. Za zmínku stojí například nový typ, tzv. ball-pen sonda, která umožňuje přímé měření potenciálu plazmatu a jejíž koncept byl vyvinut v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. Tokamak COMPASS je vybaven sadou 39 fixních uhlíkových Langmuirových sond nacházejících se v oblasti divertoru, které ční do plazmatu jen několik milimetrů. Hlubšího zasunutí (pouze však k úrovni posledního uzavřeného magnetického povrchu) lze dosáhnout se sondami umístěnými na jednom ze dvou reciprokých pneumatických manipulátorů (jeden vertikální a jeden horizontální), které při zasouvání dosahují zrychlení o velikosti až několiknásobku zrychlení gravitačního. Na jejich

konce lze umístit hlavice s různými druhy a počty sond – dvojitou či trojitou Langmuirovou sondu, U-sondu či ball-pen sondu.

### (K) DIAGNOSTIKA POMOCÍ SVAZKU

diagnostické svazky	prostorové rozložení elektronové hustoty, potenciál plazmatu, elektrický proud na okraji plazmatu
---------------------	---

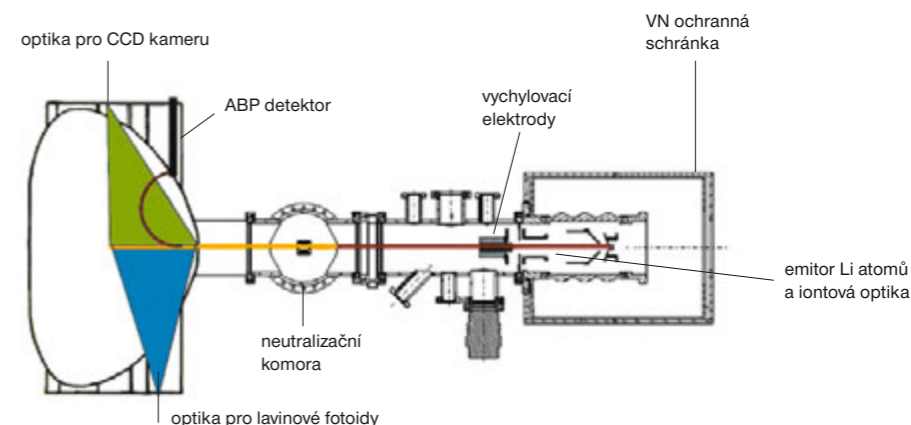
Tento druh diagnostiky plazmatu využívá ohřevový (z vodíku nebo z jeho izotopů) nebo diagnostický (často z alkalických kovů jako Li, Na, K, Rb nebo z těžkých prvků jako Cs, Tl) svazek neutrálních atomů, které jsou velkou rychlostí vstřelovány do plazmatu. Tam se tyto atomy excitují (deexcitace je pak pozorována jako charakteristické záření těchto atomů) a ionizují (rekombinace nebo nábojová výměna je opět spojena s typickým vyzařováním). Záření vznikající při následných procesech studuje emisní spektroskopie na svazku a spektroskopie nábojové výměny. Tyto metody jsou vhodné k určení rozložení elektronové hustoty v plazmatu. Potenciál plazmatu je zase možné měřit pomocí sondy s těžkými ionty (HIBP = heavy ion beam probe), přičemž se sleduje dráha svazku po ionizaci v plazmatu. Proud tekoucí na okraji plazmatu například během nestability typu ELM (edge localized mode = nestabilita lokalizovaná na okraji plazmatu) pak lze měřit novou diagnostickou metodou, která je modifikací HIBP, tzv. atomovou sondou (ABP = atomic beam probe). Dráha lehkých iontů ze

svazku (Li) je totiž ovlivňována nejen toroidálním magnetickým polem, ale v kolmém směru i lokálním poloidálním magnetickým polem, které je právě proudy v plazmatu vytvářeno. K tokamaku COMPASS bude připojen diagnostický lithiový svazek o energii urychlených atomů 40 keV a proudu několika miliampérů. Deexcitaci lithiových atomů svazku budou pozorovat rychlé lavinové fotodiody (monitorování změny hustoty) a CCD kamera (měření profilu hustoty plazmatu). Pro měření s ABP detektorem se použije vyšší energie svazku okolo 100 keV a detektor tvořený dvourozměrným polem snímacích elektrod. Do budoucna se také uvažuje o stavbě diagnostického systému pro spektroskopii nábojové výměny pomocí ohřevového svazku a diagnostického systému HIBP.

### (L) DIAGNOSTIKA ČÁSTIC

šťěpná komora, proporcionální a scintilační detektory	neutrony (časová závislost)
aktivační analýza	neutrony (bez časového rozlišení)
Čerenkovovy detektory	runaway elektrony

Tokamakové plazma je uvnitř vakuové komory drženo silným magnetickým polem, a proto se částicová diagnostika soustřeďuje na částice neutrální, na něž magnetické pole téměř nepůsobí, nebo na ty, které díky své vysoké pohybové energii přece jen mohou z tohoto pole vylétnout.



Systém diagnostického svazku (vpravo) a svazkové diagnostiky BES a ABP (vlevo)

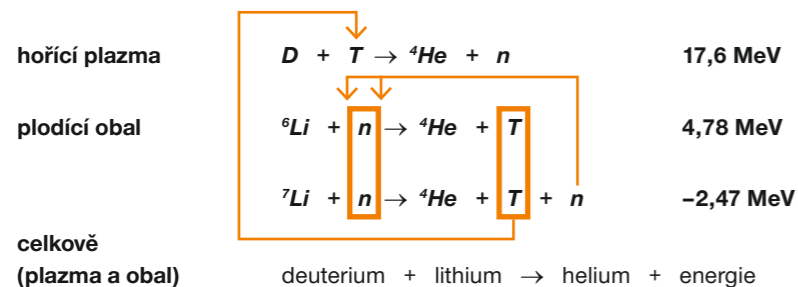
V prvním případě se jedná o fúzní neutrony (pouze u velkých tokamaků s termojadernými teplotami nebo u tokamaků s ohřevem pomocí urychlených neutrálních částic) nebo neutrální atomy vzniklé pomocí nábojové výměny mezi ionty plazmatu a neutrálními atomy zbytkového plynu. Detekce neutronů je relativně obtížná, neboť jde o částice bez elektrického náboje rychle ubíhající z plazmatu do všech směrů; pozorovatelné jsou tak až jejich interakce s dalšími částicemi (v materiálu detektoru). Tak v reálném čase měří například štěpné komory a proporcionální či scintilační detektory, bez časového rozlišení se pak používá aktivační analýza. Neutrální atomy se zase dají rozlišit v hmotnostních spektrometrech, kde se za účelem změření ionizují a v poli magnetu spektrometru se sleduje poloměr jejich zakřivené dráhy, který souvisí s jejich hmotností.

Ve druhém případě jde o tzv. ubíhající (runaway) elektrony, které jsou při nízkých hustotách plazmatu, kdy se při náhodných srážkách částic již nestíhají termalizovat, urychlovány toroidálním elektrickým polem více a více (toto pole je primárně určeno k vytváření proudu plazmatem a tím i k jeho induktivnímu ohřevu), až mají nakonec tak vysokou energii, že je magnetické pole tokamaku neudrží a tyto elektrony vylétávají z plazmatu ven na stěnu vakuové komory. Tam mohou být odhaleny pomocí Čerenkovových detektorů, v materiálu radiátoru (diamant či krystal AlN) se tyto elektrony šíří rychleji než světlo a vysílají tak Čerenkovo záření. Jiná metoda využívá emise tzv. synchrotronního záření již při samotném urychlování těchto elektronů. Na tokamaku COMPASS se uvažuje o stavbě detektoru fúzních produktů (neutronů) a vícekanálového systému Čerenkovových detektorů.

# TERMOJADERNÉ TECHNOLOGIE

Zatímco fyzikové netrpělivě čekají na první výsledky z připravovaného mezinárodního experimentálního termojaderného reaktoru ITER, který bude dvakrát větší než současný nejmodernější tokamak na světě JET, před inženýry a techniky stojí výzva, se kterou se doposud nesetkali. Na rozdíl od štěpných atomových reaktorů musí budoucí fúzní reaktor počítat s odvodem mnohem větší plošné hustoty tepelného výkonu. Tím, že chladicí médium ve štěpném reaktoru protéká jeho vnitřkem, má k dispozici mnohem větší kontaktní plochu než fúzní reaktor, ve kterém bude moci chladicí médium využít pouze jeho stěny. Vnitřní objem fúzního reaktoru je totiž zaplněn plazmatem. Zkrátka a dobře, doposud při krátkých pulzech bylo třeba chránit plazma před materiálem stěn, v ITER bude třeba chránit materiál stěn před plazmatem. Návrh a výroba komponent odolávajících vysokým teplotám a neutronovému záření je úkolem, na jehož vyřešení bude záviset úspěch řízené termojaderné syntézy. Celý deuterio-lithiový cyklus by měl vypadat takto:

Výroba paliva včetně jeho skladování – v první fázi se počítá s izotopy vodíku deuteriem a tritiem – je více méně zvládnutá. Deuterium lze získat poměrně snadno extrakcí z vody. Tritium se tvoří přímo v reaktoru reakcí neutronů – produktů termojaderné reakce – s lithiem v tzv. plodícím obalu (blanketu) obklopujícím první (ve směru od plazmatu) stěnu vakuové komory. Pro plodící obal jsou v současnosti zvažovány různé koncepce – např. oxidy lithia a berylium ve formě „oblázků“, tekutá slitina olova s lithiem v ocelové struktuře, lithium ve struktuře z vanadu nebo karbidu křemíku. Další neutrony pro výrobu tritia lze získat reakcí primárních neutronů s beryliem (násobení neutronů). Základním mechanismem ohřevu plazmatu je Jouleovo teplo vznikající průchodem elektrického proudu plazmatem. Zahřát plazma v tokamacích na potřebnou teplotu pouze tímto mechanismem není možné. Pro další ohřev je nutné vyvinout injektory svazku vysoce energetických neutrálních částic a generátory elektromagnetického vlnění vhodné frekvence. ITER bude supravodivý tokamak – to znamená, že zatímco ve vakuové komoře bude



Komora největšího tokamaku na světě JET v anglickém Culhamu • vlevo  
Test třídímenzionálního prototypu supravodivé cívky pro stellarátor W7-X ve Forschungszentrum v Karlsruhe. Na obrázku je cívka před zapojením vsunována do kryostatu, ve kterém se ochladí na -269 °C. • vpravo

zůřit plazmová bouře o teplotě stovek milionů stupňů Celsia, za stěnou reaktoru bude teplota blízka absolutní nule. Jen při teplotě tekuté helia 4,5 K (-269 °C) nabývají totiž slitiny na bázi niobu tvořící magnetické cívky, uzavřené v konstrukci z nerez oceli, supravodivých vlastností. S podobnými teplotními skoky se nesetkali ani kosmonauti v mrazivém vesmíru. Aby toho nebylo málo, první stěna reaktoru bude bombardována neutronovými toky takové intenzity, že jejich účinky konstruktéři dosud neznají. Projektuje se rozměrné zařízení IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility) za půl miliardy eur, které bude konstruční materiály testovat neutronovým zářením intenzity očekávané v průmyslovém reaktoru, to je větším než v ITER. Štěpné reaktory, které by eventuálně mohly sloužit jako zdroj testovacích neutronů, totiž poskytují toky neutronů na jednotku výkonu čtyřikrát menší, než budou toky v ITER, navíc s odlišným energetickým spektrem. V roce 2007 Evropa a Japonsko podepsaly smlouvu „Broader Approach“, v rámci které se staví dvojice urychlovačů neutronů pro testování materiálů pro DEMO, respektive fúzní elektrárny. 125 mA deuteriových iontů o energii 40 MeV

bude generovat v lithiové smyčce proud neutronů stokrát intenzivnější, než dokáže ITER, a o málo silnější, než bude mít DEMO. Testované vzorky budou efektivně „stárnout“ o 20 až 40 % rychleji než v současném stacionárním fúzním reaktoru. Takže IFMIF bude fungovat jako urychlovač času! V roce 2010 byla v JAEA Oarai Centre dokončena lithiová smyčka ELiTE (EVEDA Lithium Test Loop) a v květnu 2011 byl v CEA Saclay spuštěn injektor prototypu urychlovače deuterionů LIPAc (Linear IFMIF Prototype Accelerator). Intenzita injektoru LIPAc byla v roce 2011 více než stokrát větší než intenzita nejmodernějšího deuterionového zdroje a energie větší než energie u SNS (Spallation Neutron Source) v Oak Ridge. Stejně tak konstrukce supravodivých cívek dosud nevidaných rozměrů nebude jednoduchou záležitostí. Pravdou je, že inženýři se opírají o zkušenosti získané na zařízeních podobného typu, i když ne takových rozměrů jako budoucí ITER. V měřítku 1 : 1 byl odzkoušen segment vakuové komory podle původního projektu z roku 1998 (tedy větší než jeho redukováná varianta 2001), dále modely supravodivých toroidálních cívek: cívky toroidálního pole v měřítku



Model supravodivých korekčních cívek v Ústavu fyziky plazmatu Čínské akademie věd v Hefei

1 : 1/3 a cívky centrálního solenoidu v měřítku 1 : 2/3, dálkově ovládaná mechanická paže pro práci ve vakuové komoře se sekundární radioaktivitou a systémy pro ohřev a udržování proudu. Původní záměr činil tým v evropském Garchingu odpovědným za vše uvnitř vakuové komory, tým v japonském Naka měl na starosti všechna zařízení vně komory. Nicméně z hlediska umístění ITER v Evropě je důležité, že až na centrální solenoid se na vývoji všech ostatních komponent – ať už to jsou cívky toroidálního magnetického pole, vakuová nádoba, materiály zachycující první tepelný a neutronový nápor plazmatu, dálkově ovládané mechanické paže a dokonce i radiofrekvenční generátory a zdroje záporných iontových svazků – podílejí evropské laboratoře a společnosti. Charakteristické pro výrobu první stěny (PFW – Primary First Wall), to je stěny „vidící“ plazma, je sendvičové uspořádání. To proto, že na PFW jsou kladeny různé požadavky, které jeden typ materiálu není schopen zajistit: vysoká tepelná odolnost, odolnost proti erozi a současně dobrá tepelná vodivost. Na limiter vymezující průřez plazmatic-

kého provazce jsou kladeny z hlediska zátěže větší požadavky než na stěny vlastní vakuové komory. Prstencový limiter byl zkoušen na francouzském tokamaku Tore Supra v Cadarache, kde se bude ITER stavět. Francouzský prstencový limiter se skládá z 576 chlazených dlaždic. Tepelnou odolnost dlaždic zajišťují destičky uhlíkového kompozitu přecházejícího na dobře tepelně vodivou Cu slitinu protékající vodou. Kritickým procesem je vodivé spojení kompozitu a Cu slitiny. Pro spojování rozdílných materiálů byla vyvinuta řada technologií – sváření, pájení, hipování (HIP – Hot Isostatic Pressing – vysokotlaké lisování za tepla), difúzní spojování, plazmové stříkání apod. Odváděné teplo se v budoucnu použije k výrobě elektrické energie pomocí parogenerátoru jako v klasické elektrárně. Zpravidla se všechny vnitřní části vakuové komory tokamaků pokrývají uhlíkem, prvkem s nízkým atomovým číslem, většinou ve formě dlaždic z grafitových kompozitů (stejný materiál se používá na raketoplánech). Čím nižší je totiž atomové číslo, tím nižší jsou ztráty zářením

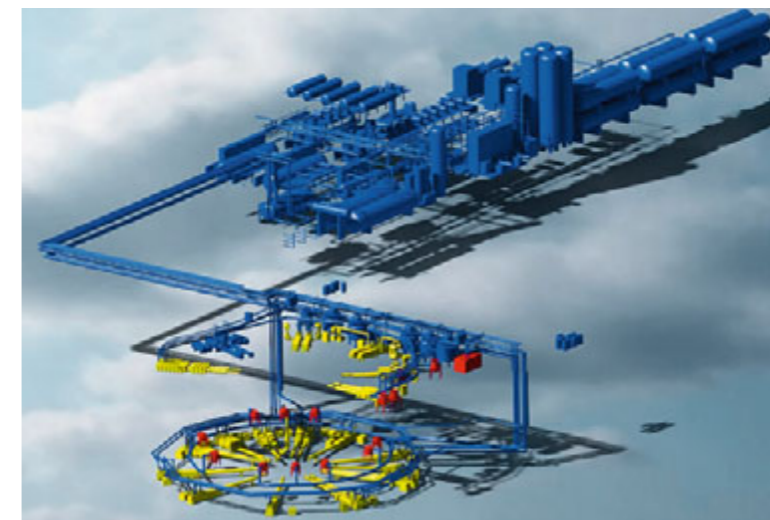


Schéma kryogenního systému pro ITER ● nahoře  
Zkušební lithiová smyčka pro urychlovač neutronů, který bude používat IFMIF – Mezinárodní fúzní zařízení pro ozařování materiálů neutrony. ● dole

tohoto prvku, který se jako nečistota může objevit v plazmatu. Při růstu energie plazmatu rostla i tepelná zátěž grafitových desek limiterů a grafit s relativně velkým koeficientem rozprašování se uvolňoval do plazmatu úměrně velikosti zaváděného dodatečného výkonu. Výboj brzy skončil radiačním zhroucením – „uhlíkovou katastrofou“ – vyzářený výkon byl větší než výkon dodaný. Až v letech 1989–1990 bylo na JET uhlíkové pokrytí doplněno nástřikem berylia, prvku s ještě nižším atomovým číslem, než má uhlík.

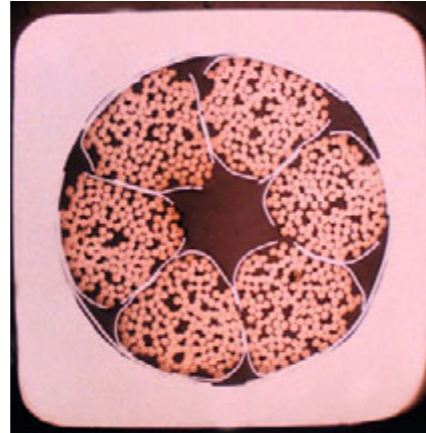
Pravda, berylium se na rozdíl od uhlíku tolik nerozprašuje, ale na druhou stranu je toxické, takže vyžaduje přísné bezpečnostní procedury. Okamžitě se dramatickým způsobem snížily ztráty energie vyzařováním a uhlíková katastrofa byla zažehnána. To je jen malý příklad, jakými cestami se ubírá technologie největšího vědeckotechnického projektu na světě. Nicméně se zkouší i wolfram, který nepodléhá erozi v takové míře jako berylium, ale má velmi velké atomové číslo. Tokamak ASDEX Upgrade má už většinu první stěny z wolframových dlaždic.



Generátor vysokofrekvenčního elektromagnetického pole pro dodatečný ohřev plazmatu tokamaku – gyrotron



Unikátní dálkově ovládaná „paže“ umožňuje práci v komoře tokamaku JET i po „termojaderné“ kampani, která vyvolá sekundární radioaktivitu vnitřních stěn komory.



Průřez supravodičem

ITER použije jak wolfram, tak berylium. A při nejmenším v počáteční fázi i uhlíkový kompozit. Tokamak JET pracuje od roku 2011 s uspořádáním první stěny totožným s projektem ITER, tj. s wolframem v divertoru a s beryliem na všech ostatních vnitřních površích vakuové komory.

Velmi namáhaná součást uvnitř vakuové komory je divertor. Právě v divertoru ITER budou zpočátku na kontaktní – terčové – stěny použity uhlíkové destičky a velmi nadějný se v tomto směru jeví málo erodující wolfram, který navíc neabsorbuje tritium jako uhlík.

Nádoba reaktoru musí zajistit vysoké vakuum, proto je zde důležitá pevnost a možnost svaření rozměrné konstrukce, aniž by došlo k nepřípustně velké deformaci. Konstrukce bude z nemagnetické a nízkoaktivovatelné nerez oceli a bude mít dvojitou stěnu vyztuženou žebry, na

něž budou připevněny vnitřní součásti. Vakuová nádoba musí též obsahovat okna (porty) pro dodávku a ohřev paliva, instalaci diagnostiky a výměnu vnitřních součástí. Už dnes je ITER inspirací pro řadu jiných odvětví: tepelně namáhaný materiál pro kosmický průmysl, anemometry pro větrné turbíny, zobrazování pomocí magnetické rezonance v lékařství, iontová implantace v polovodičovém průmyslu, magnety pro CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire – Evropské sdružení pro jaderný výzkum), brzdy pro letadla a vlaky, sterilizace plazmatem, ale i software pro předpověď kolapsu energetické sítě.

Neméně důležitý bude při stavbě ITER jeho místní ekonomický přínos, to je nabídka obrovského množství smluv v ceně přes několik miliard eur výrobním firmám a tisíců pracovních míst.

## MEZINÁRODNÍ SPOLUPRÁCE ČESKÉ REPUBLIKY V OBLASTI TERMOJADERNÉ FÚZE

Internacionální výměna informací je nedílnou součástí jakéhokoli výzkumu kdekoli na světě. Není důvod, proč by studium termojaderné fúze v Česku mělo být výjimkou.

Historie mezinárodní spolupráce Česka v oblasti termojaderné syntézy je historií oddělení tokamak Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i. Světově prioritní teoretické a experimentální výsledky generování elektrického proudu vysokofrekvenční vlnou v ÚFP v sedmdesátých letech a vynikající výsledky sovětského expe-

rimentálního zařízení tokamak na sklonku let šedesátých vyústily v roce 1977 v přestěhování jednoho z prvních tokamaků na světě TM-1 MH z Kurčatovova ústavu v Moskvě do pražského Ústavu fyziky plazmatu. Později přestavěný na CASTOR (Czechoslovak Academy of Sciences TORus, 1984) byl pražský tokamak dostavěním předních vědců východní Evropy: NDR, Rumunska i SSSR. Po listopadu 1989 se dokázalo oddělení tokamak velmi rychle přizpůsobit novým možnostem a navázalo pracovní

Mapa asociací k EURATOM

- asociace na území EU
- asociace mimo EU
- fúzní laboratoře



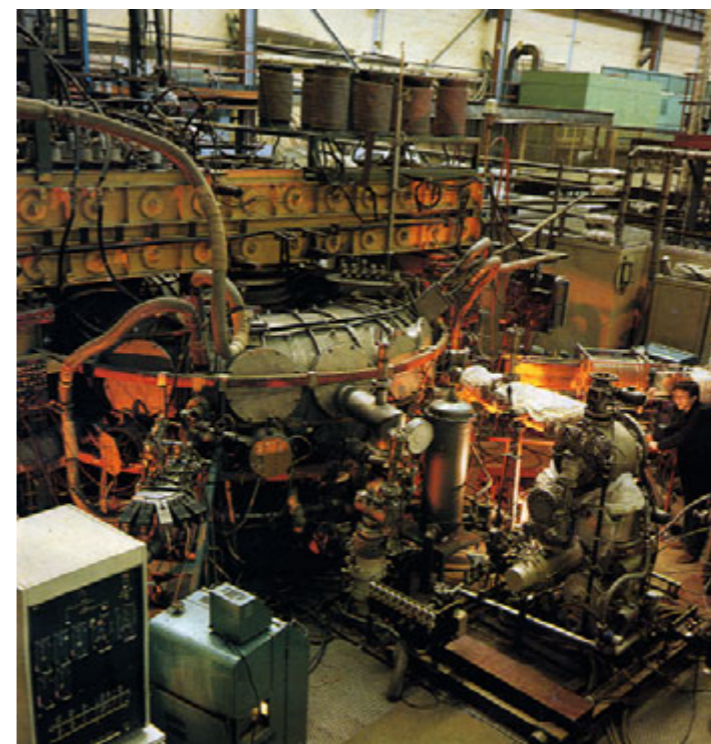


Účastníci VI. zasedání  
Poradního výboru Association  
EURATOM IPP.CR v roce 2003  
před budovou Ústavu fyziky  
plazmatu AV ČR

kontakty s předními evropskými laboratořemi na západ od našich hranic. Vyvrcholením těchto snah byl rok 1999, kdy byla podepsána asociační dohoda EURATOM IPP.CR, kterou Česko vstoupilo do „termojaderné Evropské unie“. Více než 80 % programu asociace dnes zajišťuje ÚFP. Na zbývajících úkolech asociace se podílejí další vědecké ústavy a vysoké školy: Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s., Ústav fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského AV ČR, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, Ústav jaderné fyziky AV ČR (zejména prostřednictvím Centra výzkumu Řež, s. r. o.), Matematicko-fyzikální fakulta UK, Ústav fyziky materiálů AV ČR a Ústav aplikované mechaniky Brno, s. r. o.

Podepsáním asociační dohody se Česku otevřely dveře k největším termojaderným evropským experimentálním zařízením. Vzhledem k tomu, že Evropa je současným lídrem světové fúze, platí, že jednička v Evropě je jedničkou světovou. Ať se jedná o evropský tokamak JET nebo supravodivý tokamak Tore Supra ve Francii, sférický tokamak MAST v Anglii či variabilní tokamak TCV ve Švýcarsku. Řada mladých členů oddělení tokamak ÚFP využívá programu „Mobility“ a absolvuje měřicí kampaně na jmenovaných zařízeních. Na druhé straně do Prahy přijíždějí přední odborníci – ať

už využít programovou pružnost na tokamaku COMPASS nebo přednášet v nejrůznějších vysokoškolských či postgraduálních kurzech. Příkladem programové flexibility Prahy budiž Experimentální letní škola SUMTRAIC, jejíž první ročník pro maďarské studenty proběhl v roce 2003, druhý v roce 2004 již hostil studenty z pěti evropských zemí plus studenty z Indie a Egypta. Naproti tomu zasedání Poradního výboru Association EURATOM IPP.CR lze nazvat tradičním. V roce 2011 se při neformální oponentuře činnosti asociace sešli přední evropští termojaderní odborníci již po čtrnácté. Rozsáhlá je spolupráce oddělení tokamak s ostatními asociacemi: CEA (Francie), ENEA (Itálie), ERM/KMS, ULB, SCK/CEN (Belgie), CIEMAT (Španělsko), IST (Portugalsko), HAS (Maďarsko), VR (Švédsko), OAW (Rakousko), Tekes (Finsko), FZK (Německo), UKAEA (Spojené království), CRPP (Švýcarsko). Na přínosné předlistopadové vztahy s vědeckými centry bývalého SSSR a další navázala obnovená spolupráce s Kurčatovovým ústavem a Ústavem vysokých hustot energií v Moskvě, Ioffeho Fyzikálně technickým ústavem v Petrohradě, Budkerovým Ústavem jaderné fyziky v Novosibirsku, Fyzikálním ústavem v gruzínském Tbilisi a konečně s univerzitou ve Lvově na Ukrajině.



Na prvním supravodivém tokamaku na světě – moskevském T-7 – generovala v roce 1982 vlnovodná aparatura vyrobená v Ústavu fyziky plazmatu ČSAV proud 200 kA. Tehdy to byl světový rekord.

Bezespору největším počinem světové termojaderné komunity je příprava a stavba Mezinárodního termojaderného experimentálního reaktoru ITER. Od samého počátku se na ambiciózním projektu podíleli odborníci z Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. V letech 1998 až 1994 byly vyvinuty modely pro numerické simulace interakce dolně hybridních vln s elektrony a alfa částicemi, to je s reaktorovým plazmatem. Dalším příspěvkem je vývoj speciálních Hallových sond pro měření změn magnetického pole v tokamaku ITER.

Technologická témata týkající se neutronové zátěže konstrukčních materiálů zpracovávají vedle Ústavu fyziky plazmatu AV ČR ústavy v Řeži: Ústav jaderné fyziky AV ČR a Centrum výzkumu Řež, s. r. o. Přímo do zakázek pro ITER zasáhly dvě české instituce. Centrum výzkumu Řež, s. r. o., který na zařízení BESTH prováděl zátěžové testy spojení berylia a mědi použitých v první stěně obalu (blanketu) ve vakuové komoře ITER a zařadil se tak po bok

prominentních institucí jako Sandia National Laboratory, Albuquerque (Nové Mexiko) a Forschungszentrum Jülich. Centrum výzkumu Řež, s. r. o., v rámci nově schváleného projektu SuSEN své aktivity pro ITER výrazně rozšířil. Shodou okolností na konstrukci obalu se podílí i druhá česká firma. Hradecké ATEKO, a. s., po úspěšné prezentaci zkapalňovačů helia na LHC v CERN vyrábí pro ITER heliové turbocirkulátory pro chlazení obalu. Členové Oddělení tokamak Ústavu fyziky plazmatu AV ČR pravidelně pracují na JET. Z poněkud jiného soudku je účast Oddělení tokamak v Public Information Network, sdružení vybraných zaměstnanců asociací, zabývajících se v rámci EFDA popularizací řízené termojaderné fúze v Evropě. Česká republika jako jediná země z desítky nových členů Evropské unie rozšířila její tokamakový seznam. Do evropského termojaderného programu je zapojena studiem fyziky vysokoteplotního plazmatu i výzkumem termojaderné technologie.

# BUDOUCNOST TERMOJADERNÉ FÚZE

Stojíme na prahu termojaderné éry? Věříme, že ano, i když je těžké odhadnout, zda její nástup bude bouřlivý nebo spíše nenápadný. Vývoj lidské civilizace nelze dlouhodobě předvídat. Můžeme ovšem vykreslit perspektivy termojaderné fúze až na horizont viditelný dnešní vědou. Zásadním mezníkem se stane bezesporu ITER. Tento supravodivý tokamak s fúzním výkonem až 500 MW ověří, zda jsme skutečně dospěli na požadovanou technologickou úroveň.

Zároveň podstatně obohatí naše zkušenosti s řízením plazmatu a zásadně přispěje k optimalizaci materiálů pro fúzní reaktory. Bude také zdrojem hlubšího poznání fyziky a jako takový určitě přinese mnoho nových vodítek pro další projekty. Zkušenosti z ITER by se měly uplatnit v demonstrační elektrárně DEMO, která se má zaměřit na spolehlivost, robustnost konstrukce a ověřit ekonomickou konkurenceschopnost termo-

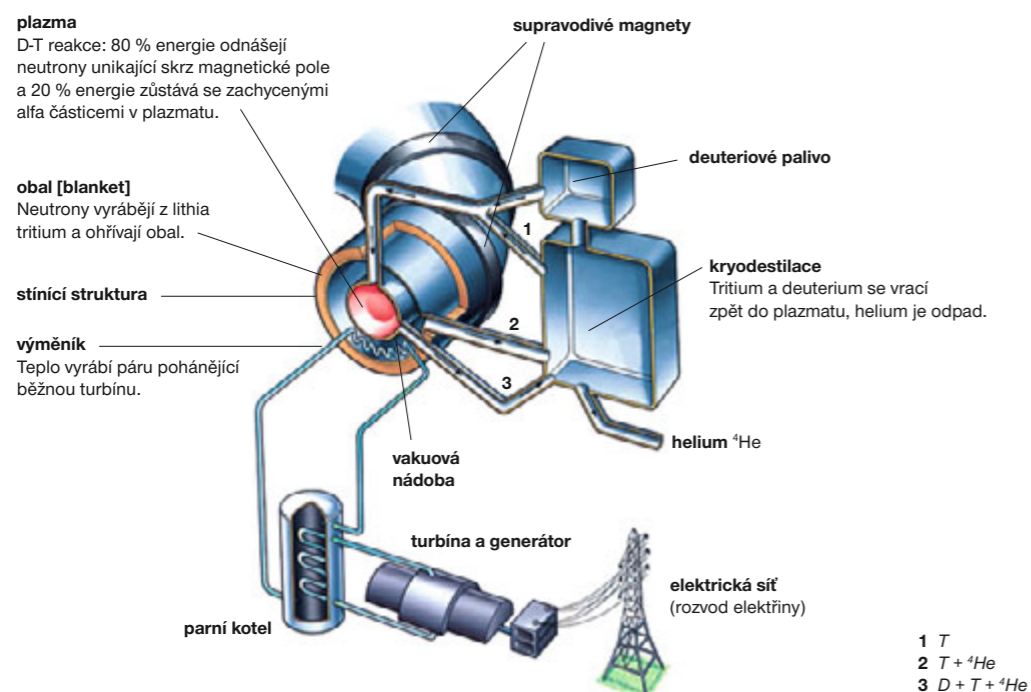
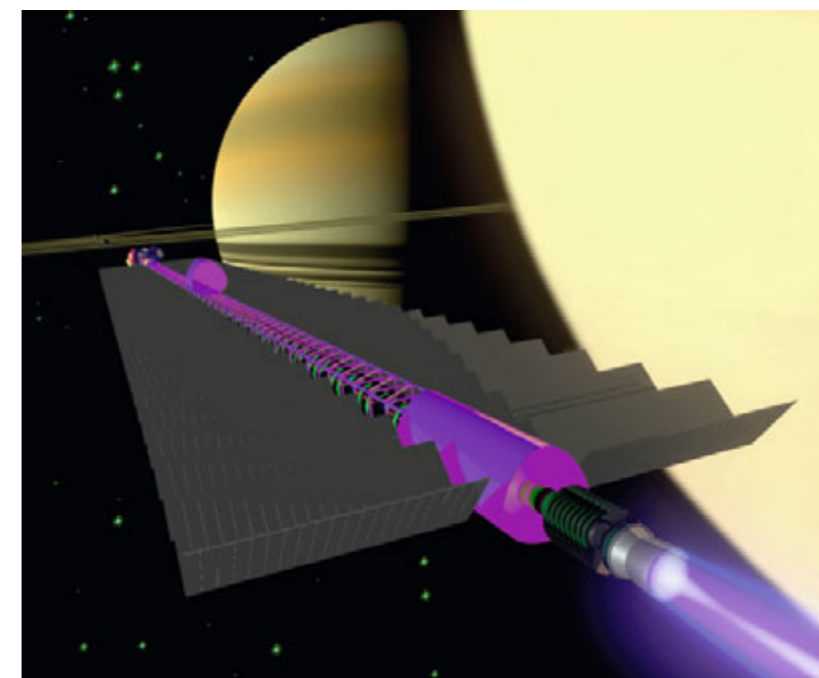


Schéma termojaderné elektrárny



Jaderné palivo nahradí palivo chemické a pošle člověka mimo Sluneční soustavu!

jaderné elektrárny. Předpokládá se, že bude pracovat v kontinuálním provozu. Elektrárna DEMO je nyní na samém počátku detailních projektových studií, finální úprava projektu bude vázána na výsledky ITER a pravděpodobně i IFMIF. V optimistickém scénáři je možné, že stavba DEMO bude realizována v několika různých státech, a to kolem roku 2040. Těžisté dalšího vývoje přejde ze základního výzkumu do průmyslové energetiky. Průmyslové využití termojaderné energie by mohlo obohatit už životy našich dětí. Podle současných představ se bude termojaderná fúze podílet na zajištění základní dodávky energie, a to hlavně pro velká města a průmyslová centra. Jednou z hlavních výhod termojaderných elektráren bude geograficky neomezená dostupnost zdrojů. Toto hledisko je dnes zásadní hlavně pro Čínu, Indii a Japonsko, nabývá ale na významu i pro Evropu. Přestože se termojaderná fúze projektuje jako bezpečný a k přírodnímu prostředí přátelský zdroj energie, z hlediska distribuce a diferenciací zdrojů doufáme, že se lidé zároveň dopracují k široké-

mu uplatnění menších jednotek obnovitelných energetických zdrojů. Termojaderné reaktory mohou také zásadním způsobem podpořit tzv. vodíkové hospodářství. Vodík by se mohl v blízké době stát novým palivem pro motory automobilů i letadel. Cenné a omezené zásoby ropy by se tak ušetřily pro ušlechtlejší účely než pro spalování, např. na výrobu olejů či plastů. Vodík se vyrábí z vody – a při spalování z něj voda zpátky vzniká, výfukovými plyny jsou vodní páry. Produkce vodíku je ale nesmírně energeticky náročná, zpravidla se dnes vyrábí elektrolýzou. Efektivnější přímá tepelná disociace vody na vodík a kyslík nastává až při mnohatisícových teplotách. Termojaderné reaktory budou ovšem schopny takovou teplotu poskytnout. I když je dnes zvládnutí fúze reálné díky tokamakům, není jisté, jaká koncepce se nakonec dočká širokého uplatnění. Technologický pokrok nejspíš nakonec umožní, aby se reaktory vrátily ke kompaktnějším řešením. Vědci a konstruktéři proto nezapomínají na alternativní technická uspořádání, jako jsou stelarátory, lineární mag-

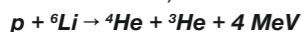


netické pasti nebo inerciální udržení, a nepřestávají hledat nové koncepce. O zajímavé, zdaleka ne nové, myšlenky hybridních reaktorů jsme se zmínili. Fúze nemusí být zdrojem energie, ale mohou se využít jiné produkty reakce – neutrony. Perspektivou využití fúzních neutronů se zabývá několik soukromých společností. Privátní kapitál je další šancí jak rozšířit možnosti termojaderné fúze. Pokroky termojaderné fúze ostře sledují i konstruktéři kosmických plavidel. Například NASA za tímto účelem buduje vlastní experimenty studující jak udržení, tak tok horkého plazmatu tryskami. Opravdu těžko si lze totiž představit, že by lidé dolétli dále než k Marsu bez použití termojaderného pohonu, klasické palivo zabírá příliš mnoho místa.

Naše potomky čeká i další velká výzva: zvládnutí termojaderných reakcí, ke kterým není potřeba tritium (například reakce slučování deuteria s deuteriem).



Nejen, že odpadne složitá výroba a přísné skladování tritia, ale navíc bude větší část produkované energie zahřívat plazma a jen menší část bude unášena neutrony na stěny. Až se podaří ovládnout mnohonásobně vyšší zápalné teploty, začnou být zvláště zajímavé reakce, jejichž produktem nejsou neutrony vůbec (například fúze protonu a lithia či bóru nebo deuteria a helia).



Pak by bylo dokonce možné uvažovat o přímé výrobě elektrické energie z plazmatu bez použití parních turbín. Tím by se podstatně zvýšila účinnost elektráren a zjednodušilo jejich schéma. Bohužel jde zatím pouze o vizi – současné experimentální výsledky ani dostupné technologie takové řešení vůbec nedovolují.

Zvláštní zmínka patří metodám jaderné fúze za studena. Snad každý by chtěl, aby byl fúzní reaktor malý a jednoduchý, aby se obešel bez stamilionových teplot. Jedinou jistou cestou je podle našich znalostí použití mezoatomů. Pokud se totiž nahradí elektron ve vodíkovém atomu mnohem těžší částicí zvanou mezon  $\mu$  (mí), rozměr takového atomu bude mnohem menší a pravděpodobnost sloučení dvou jader takových atomů se stane nezanedbatelnou i při pokojové teplotě. Mezon  $\mu$  se bohužel rozpadá za pár miliontin sekundy a za tuto dobu si v současných experimentech zdaleka nestihne „vydělat“ na energii, která byla nutná k jeho vyrobení. Teorie ovšem takovou situaci nevylučuje, tak snad jednou...

Před deseti lety se rozhořelo a záhy uhaslo nadšení pro fúzi za studena v krystalické mřížce paladiových elektrod, nedávno se pak v odborných kruzích mluvilo o jaderné fúzi ve zvukových rázových vlnách (bubble fusion). Přestože nezávislé experimenty nepotvrdily naděje vkládané do těchto netradičních řešení, stále mají své stoupence. A samozřejmě nelze nikdy vyloučit úplně nové myšlenky a objevy.

**Šťěstí přeje připraveným.**

## DOSLOV

Vážení přátelé, pokud jste dočetli až k této stránce, snad vás naše publikace o termojaderné fúzi alespoň trochu obohatila. Víte, ona fyzika nejsou jen suché vzorce, ale je to často dobrodružství se vším všudy. Tedy i se strachem, radostí, pochybnostmi a zklamáním. Ne vždy se podaří a ne vždy, když se podaří, je to právě nejlepší řešení. Snad nejdůležitější je pochybovat. Pochybujte vždy a všude a o všem. Vyplatí se vám to. Tak jako všem před vámi, kteří svým nadšením, zápallem a umem umožnili naplnit obsah této knížky o Slunci na Zemi.

Milan Řípa, editor



# FÚZE NA INTERNETU

## DŮLEŽITÉ ADRESY

European Commission Directorate Energy  
[http://ec.europa.eu/energy/nuclear/euratom/euratom\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/nuclear/euratom/euratom_en.htm)

EFDA (asociace EURATOM)  
<http://www.efda.org> – na této adrese je spojení na všechny asociace

Francie	Association EURATOM – CEA
Španělsko	Association EURATOM – CIEMAT
Švýcarsko	Association EURATOM – Confédération Suisse
Irsko	Association EURATOM – DC
Itálie	Association EURATOM – ENEA
Nizozemí	Association EURATOM – FOM
Belgie	Association EURATOM – Etat Belge
Německo	Association EURATOM – FZJ
Německo	Association EURATOM – KIT
Německo	Association EURATOM – IPP
Maďarsko	Association EURATOM – HAS
Řecko	Association EURATOM – Grece
Česká republika	Association EURATOM – IPP.CR
Portugalsko	Association EURATOM – IST
Lotyšsko	Association EURATOM – University of Latvia
Rumunsko	Association EURATOM – MEdC
Rakousko	Association EURATOM – ÖAW
Dánsko	Association EURATOM – RISØ
Finsko	Association EURATOM – TEKES
Spojené království	Association EURATOM – CCFE
Švédsko	Association EURATOM – VR
Slovinsko	Association EURATOM – MHEST
Slovensko	Association EURATOM – CU
Bulharsko	Association EURATOM – INRNE
Polsko	Association EURATOM – IPPLM
Litva	Association EURATOM – LEI

JET	<a href="http://www.jet.efda.org">http://www.jet.efda.org</a>
ITER	<a href="http://www.iter.org">http://www.iter.org</a>

## TOKAMAKY (EU = EVROPSKÁ UNIE)

ASDEX Upgrade (EU)	<a href="http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/pr/forschung/asdex/">http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/pr/forschung/asdex/</a>
TEXTOR (EU)	<a href="http://www.fz-juelich.de/ief/ief-4/textor/">http://www.fz-juelich.de/ief/ief-4/textor/</a>
TCV	<a href="http://crppwww.epfl.ch/tcv">http://crppwww.epfl.ch/tcv</a>
Tore Supra (EU)	<a href="http://www-fusion-magnetique.cea.fr">http://www-fusion-magnetique.cea.fr</a>
COMPASS (EU)	<a href="http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/">http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/</a>
MAST (EU)	<a href="http://www.ccfe.ac.uk/MAST.aspx">http://www.ccfe.ac.uk/MAST.aspx</a>
GOLEM (EU)	<a href="http://golem.fjfi.cvut.cz/">http://golem.fjfi.cvut.cz/</a>
FTU (EU)	<a href="http://www.fusione.enea.it/FTU/">http://www.fusione.enea.it/FTU/</a>
ISTTOK (EU)	<a href="http://www.cfn.ist.utl.pt/eng/Prj_Tokamak_main_1.html">http://www.cfn.ist.utl.pt/eng/Prj_Tokamak_main_1.html</a>
TFTR	<a href="http://www.pppl.gov/projects/pages/tftr.html">http://www.pppl.gov/projects/pages/tftr.html</a>
JT-60SA	<a href="http://www.jt60sa.org">http://www.jt60sa.org</a>
NSTX	<a href="http://nstx.pppl.gov/">http://nstx.pppl.gov/</a>
KSTAR	<a href="http://www.nfri.re.kr/english/">http://www.nfri.re.kr/english/</a>
Alcator C-MOD	<a href="http://www.psfc.mit.edu/research/alcator/">http://www.psfc.mit.edu/research/alcator/</a>
DIII-D	<a href="https://fusion.gat.com/global/DIII-D">https://fusion.gat.com/global/DIII-D</a>
SST-1	<a href="http://www.ipr.res.in/sst1/SST-1.html">http://www.ipr.res.in/sst1/SST-1.html</a>

## PINČE SE ZPĚTNÝM POLEM (EU = EVROPSKÁ UNIE)

RFX (EU)	<a href="http://www.igi.pd.cnr.it">http://www.igi.pd.cnr.it</a>
----------	---

## STELARÁTORY (EU = EVROPSKÁ UNIE)

W 7-X (EU)	<a href="http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/for/projekte/w7x">http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/for/projekte/w7x</a>
TJ-II (EU)	<a href="http://www-fusion.ciemat.es/New_fusion/en/TJII/">http://www-fusion.ciemat.es/New_fusion/en/TJII/</a>
LHD	<a href="http://www.lhd.nifs.ac.jp/en/">http://www.lhd.nifs.ac.jp/en/</a>

## PINČE

Z	<a href="http://www.sandia.gov/z-machine/">http://www.sandia.gov/z-machine/</a>
---	---

## SVAZKY TĚŽKÝCH IONTŮ

NDCX	<a href="http://www-afrd.lbl.gov/fusionibt.html">http://www-afrd.lbl.gov/fusionibt.html</a>
------	---

# VÝKLADOVÝ SLOVNÍK

## LASERY

NIF	<a href="http://www.llnl.gov/nif/nif.html">http://www.llnl.gov/nif/nif.html</a>
Mégajoule	<a href="http://www-lmj.cea.fr/">http://www-lmj.cea.fr/</a>
GEKKO XII	<a href="http://www.ile.osaka-u.ac.jp/index.html">http://www.ile.osaka-u.ac.jp/index.html</a>
ISKRA-5	<a href="http://www.vniief.ru">http://www.vniief.ru</a>
PALS	<a href="http://www.pals.cas.cz">http://www.pals.cas.cz</a>

## DALŠÍ ADRESY

Weizmann Inst. of Sci.	<a href="http://plasma-gate.weizmann.ac.il">http://plasma-gate.weizmann.ac.il</a>
International Energy Agency	<a href="http://www.iea.org">http://www.iea.org</a>

## AERE – Atomic Energy Research Establishment

Laboratoř v Harwellu, Spojené království, sídlo legendárního zařízení – toroidálního pinče ZETA

## ALCATOR C-MOD

Největší univerzitní tokamak patřící Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston, se silným magnetickým polem protaženým průřezem výbojové komory a divertorovým plazmatem. Patří mezi tři největší tokamaky USA (DIII-D a NSTX).

## Alfa

Toroidální pinč, Leningrad (dnes Petrohrad, bývalý SSSR), analogie toroidálního pinče ZETA (Harwell, Spojené království)

## Alfa částice nebo $\alpha$ částice, He<sup>4</sup>

### [Alpha particle nebo $\alpha$ -particle, He<sup>4</sup>]

Jádra atomu helia, složená ze dvou protonů a dvou neutronů, jsou jedním ze dvou produktů fúzní reakce D-T (dalším produktem je neutron). Ohřev plazmatu pomocí energie  $\alpha$  částic, zachycených v magnetické nádobě, bude v termojaderném reaktoru podstatný pro dosažení tak zvaného zapálení plazmatu [ignition]. Oproti energii neutronů, které z plazmatu volně unikají a svoji energii budou ukládat do tak zvaného obalu [blanketu], odělujícího plazma od stěn vakuové komory.

## Anomální transport

Turbulentní přenos tepla a ztráty částic jsou anomálně velké ve srovnání s předpovědí srážkové teorie přenosu tepla v toroidálním plazmatu.

## ASDEX Upgrade

Středně veliký tokamak v Garchingu (Association EURATOM-IPP, Německo) s protaženým průřezem plazmatu a divertorovým plazmatem. První stěna je celá pokryta wolframem.

## ASIPP

### [Academia Sinica, Institute of Plasma Physics]

Ústav fyziky plazmatu Čínské akademie věd

## Aspect ratio

Poměr mezi velkým a malým poloměrem toroidální vakuové nádoby tokamaku. Aspect ratio má JET i COMPASS přibližně 3 (stejný bude na ITER).

## Association Euratom-Hellenic Republic, Řecká republika Partner EFDA

## Austenitická nerezová ocel

### [Austenitic stainless steel]

Nemagnetická slitina se složením Fe-Ni-Cr, která má více než 16 % Cr. Korozivzdorné vysokoteplotní oceli obsahující molybden zastoupené typem 316L jsou konstrukčním materiálem vybraným pro ITER, protože jejich vlastnosti splňují v dostatečné míře podmínky současných potřeb tokamaku. Nicméně křehnutí austenitických ocelí po ozáření brání jejich použití v budoucích fúzních elektrárnách.

## AV ČR – Akademie věd České republiky

### [Academy of Sciences of the Czech Republic]

Vědecká instituce sdružující 54 veřejných výzkumných pracovišť. Nejstarší učencou společností byla Královská česká společnost nauk (1784–1952). Od roku 1952 do roku 1992 fungovala ČSAV.

## Beryllium

Lehký kov, který by mohl být použit ve fúzní elektrárně jako materiál první stěny „vidící“ plazma a v blanketu jako násobič neutronů, které jsou třeba pro výrobu dostatečného množství tritia.

## BETA ( $\beta$ )

Poměr tlaku plazmatu ke tlaku udržovacího magnetického pole. Jeden ze základních bezrozměrných parametrů magnetického udržení plazmatu. Poněvadž fúzní reaktivita roste s tlakem plazmatu, znamená

velká hodnota  $\beta$  velký fúzní výkon. Hodnota  $\beta$  pozorovaná v tokamacích se pohybuje v řádu procent.

**Bezpečnostní faktor („zásoba“ stability systému) [Safety factor]**

S rostoucím elektrickým proudem tekoucím v tokamacích v toroidálním směru roste i tímto proudem generované poloidální magnetické pole, zvyšuje se tedy i úhel rotační transformace a celý systém plazma – magnetické pole se stává stále náchylnější k nestabilitě. Tato náchylnost je charakterizována tzv. bezpečnostním faktorem  $q$ , rovným převrácené hodnotě úhlu rotační transformace vyjádřenému v násobcích  $2\pi$ . Název vyplývá ze skutečnosti, že dle MHD teorie je plazma stabilní jen pro hodnoty větší než 1.

**Biologické stínění [Bioshield]**

Thustá betonová stěna obklopující kryostat tokamaku, určená k pohlcení zbytkového neutronového i HXR záření proniklého blanketem, konstrukcí reaktoru i kryostatem. Stěna stíní okolí zařízení od vlastního reaktoru tak, aby se v tomto okolí mohli pohybovat lidé (biologické objekty).

**Blanket [obal]**

Vrstva materiálu obsahující lithium oddělující plazma fúzního reaktoru od stěny vakuové komory. Účelem obalu je plodit tritium štěpením lithia neutrony vznikajícími fúzní reakcí v plazmatu a absorbovat energii z plazmatu těmito neutrony odnášenou.

**Bohmova difúze [Bohm diffusion]**

Pohyb (a tedy i difúze) nabitých částic ve směru napříč magnetického pole je tímto polem silně omezen. Zatímco teorií předpovídaný koeficient difúze v magnetickém poli klesá přímo úměrně druhé mocnině tohoto pole, reálně pozorovaný koeficient však klesá mnohdy jen s první mocninou pole (taková difúze je

nazývána Bohmovou difúzí). Za příčinu takto zvýšené difúze je obecně považována turbulence plazmatu.

**Bootstrap proud [Bootstrap current]**

V důsledku existence částic zachycených v tokamacích v tzv. banánových trajektoriích (mezi „zrcadly“ do středu narůstajícího udržovacího magnetického pole) dochází v oblasti zvýšeného gradientu tlaku plazmatu k samovolnému vzniku toroidálního elektrického proudu. Tento samobuzený proud protéká i v nepřítomnosti elektrického napětí a může být tedy využit k vytváření poloidálního magnetického pole nutného pro vznik magnetické nádoby.

**Buzení proudu (neinduktivní)**

**[Current drive (non inductive)]**

V tokamaku je toroidální elektrický proud, potřebný pro vytvoření magnetické nádoby, buzen transformátorem, tedy induktivně. Neinduktivní metodou buzení proudu může být např. vstřík částic s uspořádaným momentem v toroidálním směru, urychlení elektronů plazmatu elektromagnetickými vlnami v téže směru, eventuelně samobuzený proud (bootstrap).

**Buzení transformátorem [Transformer drive]**

Použití účinku transformátoru při vytváření elektrického proudu plazmatem. Základní proces budování a ohřevu plazmatu v tokamaku.

**CAPEX – Kapilární experiment**

**[Capillary Experiment]**

Rentgenový laser s vlnovou délkou 46,8 nm v ÚFP AV ČR, v. v. i. Rentgenové záření je generováno rychlým výbojem v kapiláře plněné argonem.

**CASTOR**

Torus Akademie věd České republiky [Czech Academy of Sciences Torus]: malý tokamak ( $R/a = 0,4/0,1$  m) pracující v letech 1977 až 2007 v ÚFP AV ČR, Praha. Byl převzat z Ústavu atomové

energie v Moskvě, v ÚFP rekonstruován, dnes pracuje na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské, ČVUT Praha, pod jménem GOLEM.

**CCFE – Culham Centre for Fusion Energy**

Místo provozu tokamaků JET a MAST a dříve také tokamaku COMPASS, který je dnes provozován v ÚFP Praha – Asociaci EURATOM-IPP.CR.

**CDX-U – Current Drive Experiment-Upgrade**

Sférický tokamak v PPPL (Princeton), poněkud menší než tokamak START v anglickém Culhamu

**CEA – Commissariat à l'Energie Atomique, Francie**

Francouzský úřad pro atomovou energii, partner EFDA v Association EURATOM-CEA, která provozuje tokamak TORE SUPRA.

**Centrální solenoid [Central solenoid]**

Primární vinutí tokamakového transformátoru, které generuje toroidální proud v plazmatu.

**CIEMAT – Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas, Španělsko**

Španělský partner EFDA v Association EURATOM-CIEMAT. Provozuje flexibilní helikální stelarátor TJ-II.

**CLEO**

Stelarátor v anglickém Culhamu, později přestavěn na tokamak. Poprvé zde bylo použito k ohřevu plazmatu svazku neutrálních částic.

**COMPASS – COMPact ASSEMBLY**

Tokamak činný v letech 1989–2001 v Culhamu (Spojené království). Jeho první verze COMPASS-C měla kruhový průřez komory, COMPASS-D má průřez komory ve tvaru písmene D. V roce 2007 byl COMPASS-D převezen do Prahy a v roce 2008 v něm bylo opět „zažeháno“ plazma. Tokamak má geometrii magnetického pole podobnou tokamaku JET a je lineárně zhruba desetkrát menší než ITER.

**CRPP – Centre de Recherches en Physique des Plasma**

Fúzní laboratoře patřící Association EURATOM-Swiss Confederation v École Polytechnique Fédérale de Laussane

**CU – Comenius University, Slovensko**

Partner EFDA v Association Euratom-CU

**CXRS – Spektroskopie záření vznikajícího**

**rekombinační výměnou náboje**

**[Charge Exchange Recombination Spectroscopy]**

Jedná se o aktivní diagnostickou metodu, při níž neutrální atomy do plazmatu vstříkovaného svazku při srážce předávají plně ionizovaným atomům nečistot elektron, vytvářejíce z nich tak vodíku podobné ionty, tj. ionty mající na oběžné dráze jen jeden elektron. Tento elektron, nacházející se po srážce ve vzbuzeném stavu, při deexcitaci svou energii vyzáří (ve formě charakteristické čáry dané nečistoty). Z vlastností tohoto záření v daném místě lze pak pomocí konvenční spektroskopie určit v tomto místě jak teplotu, tak i hustotu vyzářující nečistoty, případně z Dopplerova posunu i rychlost jejího pohybu.

**Cyklotronová frekvence**

**[Cyclotron frequency]**

Nabitě částice vykonávají v magnetickém poli rotační pohyb s tzv. cyklotronní frekvencí, a to v rovině kolmé na směr magnetického pole. Velikost této frekvence je přímo úměrná velikosti magnetického pole a náboji částice a nepřímo úměrná hmotnosti částice. V poli 1 tesly je cyklotronová frekvence elektronů rovna 28 GHz, deuteriových iontů 7,6 MHz.

**Cyklotronový (Larmorův) poloměr [Gyro radius]**

Poloměr kruhové dráhy nabitě částice rotující kolem siločáry magnetického pole. Pro plazma 10 keV

v magnetickém poli 1 tesly je cyklotronový poloměr  $D$  iontů zhruba 14 mm a elektronů 1/3 mm. Fúzní alfa částice (3,5 MeV) mají cyklotronový poloměr 27 cm.

#### Čerpaný divertor [Pumped divertor]

Divertor s magnetickými siločarami končícími na terčových plochách uvnitř intenzivně čerpaného prostoru komory

#### ČSAV – Československá akademie věd

#### [Czechoslovak Academy of Sciences]

Instituce sdružovala 60 vědeckých pracovišť.

#### Atomové číslo prvku $Z$

Číslo rovné počtu protonů v jádře prvku a tedy i počtu elektronů v atomovém obalu neutrálního atomu daného prvku (např. 1 pro vodík a 92 pro uran)

#### Dálková manipulace [Remote Handling]

Manipulace s nářadím či komponentami zařízení jejich ovládním ze vzdáleného místa. V tokamaku je nutno používat dálkové manipulace uvnitř vakuové komory již po první D-T kampani, která vybudí sekundární radioaktivitu komory již pro člověka nebezpečnou.

#### DCU – Dublin City University, Irsko

Partner EFDA v Association EURATOM-DCU

#### Demonstrační reaktor

#### [DEMO – Demonstration Reactor]

První zařízení v evropské fúzní strategii, které bude vyrábět významné množství elektřiny. DEMO bude po ITER posledním krokem ve vývoji fúzní elektrárny pracující v komerčním režimu. DEMO bude již vyrábět elektřinu na úrovni několika stovek MW pomocí technologií nezbytných pro komerční zařízení.

#### Deuterium

Stabilní izotop vodíku, jehož jádro se skládá z jednoho protonu a jednoho neutronu. V těžké vodě je normální vodík nahrazen deuteriem. Mořská voda obsahuje 34 gramů deuteria v krychlovém metru.

#### Diagnostika Thomsonovým rozptylem

#### [Thomson scattering diagnostic]

Přímé měření teploty a hustoty elektronů detekcí intenzity a Dopplerova posuvu laserového světla, rozptýleného elektrony plazmatu

#### Difúze tepla (nebo částic)

#### [Thermal (or particle) diffusion]

Tok tepla (nebo částic) proti směru gradientu tepla (nebo gradientu hustoty částic) v důsledku tepelné vodivosti (nebo difúze částic)

#### DIII-D

Největší, v současné době funkční americký tokamak provozovaný General Atomic, San Diego, s intenzivním dodatečným ohřevem. Tokamak DIII-D je podobných rozměrů a tvaru jako německý tokamak ASDEX Upgrade.

#### Disrupce, disrupční nestabilita

#### [Disruption, Disruptive instability]

Magnetohydrodynamická nestabilita, která má za následek náhlý únik energie na stěnu vakuové nádoby a ukončení výboje.

#### Divertor [Divertor]

Divertor je magnetickou alternativou materiálního limiteru používaného k vymezení hranice plazmatu, danou posledním uzavřeným magnetickým povrchem (tzv. separatrixou). Divertorové magnetické pole odklání nečistoty a heliový popel na divertorové plochy v terčové komoře. Očekávaná tepelná zátěž je 10 až 20 MWm<sup>-2</sup>.

#### Doba udržení [Confinement time]

Ve fúzním plazmatu nejsou ani částice ani energie udržovány dokonale. Doba udržení částic je doba, během které částice, v průměru, zůstávají v magnetické nádobě. Doba udržení celkové energie plazmatu (tj. ztrát energie nejen únikem částic, ale

i vedením tepla a zářením), která je obecně kratší než doba udržení částic, je definována v ustáleném stavu jako poměr obsahu energie k celkovému ohřevovému příkonu, a je tedy mírou rychlosti, kterou by plazma chladlo, pokud by se přestalo ohřívat.

#### Dodatečný ohřev [Additional heating]

Dodatečným ohřevem plazmatu v tokamacích, které je zpočátku ohříváno pouze ohmicky indukovaným elektrickým proudem, nazýváme další způsob ohřevu plazmatu, např. rezonanční cyklotronní absorpci elektromagnetických vln elektrony ECR, ionty ICR nebo vstřikem svazku neutrálních částic termojaderného paliva NBI.

#### DOE – Ministerstvo pro energii

#### [Department Of Energy]

Instituce financující výzkum fúze v USA – následník ERDA a ještě dříve AEC

#### Dohoda o činnosti zařízení JET [JET Implementing Agreement, JET Operation Contract]

Smlouva uzavřená v rámci EFDA, která zajistila pokračování činnosti zařízení JET po zániku JET Joint Undertaking k 31. 12. 1999 a umožnila tak další využití JET pro společný evropský fúzní program.

#### Doplňování paliva do horkého plazmatu

#### [Warm plasma refuelling]

„Vyhořelé“ palivo musí být v reaktoru spojitě nahrazováno palivem novým, za současného odčerpávání „popela“, tj. produktů fúze. Dodávka čerstvého paliva do plazmatu může být realizována buď jednoduše napouštěním plynu od stěn komory či lépe „vstřelováním“ peletů zmrazeného paliva s rychlostí i několika km/s (palivo proniká mnohem blíže oblasti, v níž fúze probíhá) či pomocí NBI (vstřik atomů paliva s energií daleko převyšující i teplotu horkého plazmatu).

#### Dpa – Posunutí na atom [Displacement per atom]

Pro posouzení možného poškození materiálu neutronovým tokem je zavedena jednotka  $dpa$  (počet posunutí jednoho atomu). Je to hodnota odvozená z výpočtů transportu neutronů a modelu jejich rozptýlu odrazem. Konstrukční materiály fúzních reaktorů by měly pro dosažení dostatečné životnosti vydržet celkovou dávku neutronového toku způsobícího poškození kolem 100 dpa. Ačkoli tato hodnota doslovně znamená, že každý atom bude „vyražen“ a posunut ze svého místa v krystalické mřížce v průměru stokrát, rychlý návrat téměř všech právě „vyražených“ atomů na uvolněná místa (vakance) vede v každém okamžiku pouze k malému počtu párů posun-vakance (tzv. Frenkelových párů).

#### Driftové orbity [Drift orbits]

Pohyb částic je svázán se siločarami magnetického pole. Nicméně elektrická pole, gradienty magnetického, odstředivá síla a další způsobují drift částice kolmý na magnetické pole. Dráha středu rotace je nazývána driftová orbita.

#### DTE1

Experimentální kampaň na tokamaku JET v roce 1997 s použitím směsi D-T, tzn. kampaň se skutečným termojaderným palivem, a tudíž i významným uvolněným termojaderným fúzním výkonem. Reakci se podařilo udržet v nestacionárním pulzu při neustále narůstajícím výkonu až do hodnoty cca 16 MW po dobu necelých 2 s a ve stacionárním pulzu při téměř konstantním výkonu cca 4 MW po dobu 5 s (s celkovou uvolněnou energií 21 MJ), limitovanou pouze možnostmi dodatečného ohřevu.

#### Dvoutekutinový a mnohotekutinový model

#### [Two-fluid model and multi-fluid model]

Rozšířená soustava rovnic, která popisuje plazma

jako směs více vzájemně promíchaných elektricky nabitých tekutin či plynů (elektronů, iontů, ionizovaných nečistot, neutrálních atomů atd.).

**EAST – Moderní experimentální supravodivý tokamak [Experimental Advanced Superconducting Tokamak]**

První celosupravodivý tokamak na světě. Ústav fyziky plazmatu Čínské akademie věd, Hefei.

**ECCD – Buzení proudu elektronovou cyklotronovou frekvencí [Electron Cyclotron Current Drive]**

Technika neinduktivního buzení proudu pomocí vhodně nasměrovaných elektronových cyklotronových vln

**ECRH – Rezonanční ohřev elektronovými cyklotronovými vlnami**

**[Electron Cyclotron Resonance Heating]**

Rezonanční ohřev elektronů plazmatu nacházejícího se v magnetickém poli elektromagnetickými vlnami s frekvencí v oblasti cyklotronní frekvence elektronů (nebo jejího násobku). V současných a budoucích zařízeních je ECH frekvence typicky 60 až 170 GHz, v závislosti na intenzitě magnetického pole v zařízení.

**EFDA – Evropská dohoda o rozvoji fúze**

**[European Fusion Development Agreement]**

EFDA zabezpečuje organizační rámec pro využívání zařízení JET, koordinuje činnost národních asociací, řídí výchovu odborníků a koordinuje příspěvky Evropy k mezinárodní spolupráci (včetně ITER a Dohody o širším přístupu).

**Elektromagnetická past**

**[Elektromagnetická past]**

Použití magnetického pole k ochraně mřížek při IEC vedle ke vstřícným polím s jednou či mnoha šterbinami. Osová šterbina je u obou verzí stejná, mění se pouze počet prstencových šterbin. Díky „správné“ křivosti magnetického pole je plazma MHD

stabilní a díky nulovému magnetickému poli ve středu zařízení neexistují ztráty brzdícím zářením. Elektromagnetické pasti se studovaly pod vedením Olega Alexandroviče Lavrentěva ve Fyzikálně-technickém ústavu v Charkově v letech 1960 až 1985.

**Elektronový svazek [Electron Beam]**

Proud elektronů pohybujících se stejnou rychlostí a směrem blízko sebe, obvykle emitovaný jediným zdrojem – katodou

**ELI – Extrémní světelná infrastruktura**

**[Extreme Light Infrastructure]**

Superlaser za evropské peníze by měl od roku 2016 fungovat v Dolních Břežanech u Prahy. V rámci širokého programu by mělo probíhat i testování nových konceptů laserové termojaderné fúze (ICF).

**ELM – Mod lokalizovaný na okraji (plazmatu)**

**[Edge Localized Mode]**

Nestabilita, která se vyskytuje v divertorových tokamacích během režimu vysokého udržení, tzv. H-modu, ve formě krátkých, ale velmi intenzivních a periodicky se opakujících erupcí energie (asi 1 MJ) z horkého jádra na první stěnu zařízení. Obdoba ELMs na Slunci – sluneční erupce mají  $10^{19}$ krát více energie než ELMs v tokamaku.

**ELMAN – ELEktroMAGnetická Nádoba**

**[Electromagnetic bottle]**

Zařízení v šedesátých let minulého století v ÚFP ČSAV, určené pro studium interakce vysokoenergetického elektronového svazku s plazmatem

**ENEA – Enta per le Nuove Tecnologie, l' Energia e l'Ambiente, Itálie**

Partner EFDA v Association EURATOM-ENEA

**Energetické částice [Energetic particles]**

Ve smyslu energie mohou být částice v plazmatu rozděleny do dvou skupin. V moderních tokama-

cích je početnější skupina termalizovaná s teplotou v rozsahu 1 až 30 keV. Méně početnější třída energetických částic má podstatně vyšší energii – až do několika MeV. Energetické částice mohou být vytvářeny elektrickými poli, fúzními reakcemi, vstříkáním neutrálních částic nebo vřehem.

**ERDA – Agentura pro výzkum a vývoj energie [Energy Research and Development Agency]**

Americká agentura odpovědná za výzkum fúze v letech 1974 až 1977, později její úkol převzalo DOE.

**EURATOM – European Atomic Energy Community**

Evropská společnost pro atomovou energii

**eV– elektronvolt**

Energie, kterou získá elektron, je-li urychlen napětím jednoho voltu. Jednotka se používá pro měření teploty částic horkého plazmatu (1 eV odpovídá 11,6 tisícům kelvinů).

**Ferritické martensitické oceli**

**[Ferritic-martensitic steels]**

Magnetické slitiny, které jsou kvůli zlepšení tažnosti modifikovány, představují nejslibnější konstrukční materiály pro první generaci fúzních elektráren. V mikroskopickém smyslu mají středově symetrickou krychlovou krystalovou mříž, o níž se předpokládá, že to je struktura nejvíce odolná vůči křehnutí v důsledku ozáření neutrony.

**FIR – daleká infračervená vlnová délka**

**[Far Infra-Red]**

Lasery pracující na FIR frekvencích (vlnové délky zhruba 0,1 až 1 mm) se používají v tokamacích především k měření profilu hustoty plazmatu a elektrického proudu (pomocí Faradayovy rotace, viz rovněž polarimetrie).

**FOM – Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie, Holandsko**

Partner EFDA v Association EURATOM-FOM

**FTU – Frascati tokamak Upgrade**

Relativně malý tokamak, ale s vysokým proudem a velkou hustotou, pracující ve Frascati, Itálie (Association EURATOM-ENEA)

**Fúze [Fusion]**

Uvolňování jaderné energie slučováním lehkých jader na jádra těžší. Výhodou tohoto budoucího způsobu získávání energie budou tři hlavní skutečnosti: potřebné „palivo“ (deuterium) je rovnoměrně rozděleno po celé planetě, vlastním produktem reakce budou radioaktivní prvky („popel“ bude obyčejné helium) a pak to, že bude jen obtížně zneužitelná (reakce probíhá jen za velmi vysokých teplot – i nejspíše realizovatelná reakce vyžaduje stovky milionů stupňů).

**Fúze katalyzovaná mezonů**

**[Muon-Catalysed Fusion]**

Náhradou elektronů cca 200× hmotnějšími záporně nabitými mezonů může proběhnout fúze mezi atomy při mnohem nižší teplotě než při „normální“ fúzi (v důsledku mnohem menší vzdálenosti mezonů od jádra a tím i možnosti přiblížení se dvou atomů na mnohem menší vzdálenost bez nutnosti jejich ionizace a tedy převedení do plazmatického stavu). Z důvodu krátkého života mezonů se však o této technice nepředpokládá, že by ji bylo možné pro komerční výrobu energie použít.

**Fúzní produkt [Fusion product]**

Produkt fúzní reakce – například  $\alpha$  částice nebo neutron v deuterio-tritiovém plazmatu

**Fúze pro energii**

**[Fusion for Energy (F4E)]**

Evropský společný podnik pro ITER a výzkum fúzní energie neboli Fúze pro energii byl ustaven v dubnu 2007 rozhodnutím Rady Evropské unie

smlouvou s EURATOM na dobu 35 let. Organizace sídlí v Barceloně a má tyto dva hlavní úkoly: zabezpečuje evropský příspěvek k projektu ITER (včetně Dohody o širším přístupu [Broader Approach] mezi Japonskem a EU) a dále pak přípravu stavby demonstračního reaktoru (DEMO).

#### **FZK – Forschungszentrum Karlsruhe, Německo**

Partner EFDA, zabývající se vývojem fúzních technologií, výkonových vysokofrekvenčních generátorů (gyrotronů) a obecně plazmovým inženýrstvím

#### **FZJ – Forschungszentrum Jülich, Německo**

Partner EFDA v Association EURATOM-FZJ provozuje tokamak Textor.

#### **GLOBUS-M**

Sférický tokamak v loffeho ústavu, Petrohrad, Rusko. Rozměrově srovnatelný s dnes již neexistujícím sférickým tokamakem START, CCEF, Culham, Spojené království.

#### **Greenwaldova limita/hustota**

##### **[Greenwald limit/density]**

Empiricky zjištěná hranice maximálně dosažitelné provozní hustoty v tokamaku. Může být krátkodobě překročena (např. při vstřiku peletů, jak se prokázalo např. v tokamaku MAST). Předpokládá se, že ITER bude pracovat blízko této hranice.

#### **Gyrotron**

Vysoce výkonový mikrovlnný generátor pro oblast elektronových cyklotronových frekvencí (50 až 200 GHz). Tyto vlny jsou používány k ohřevu plazmatu na elektronových cyklotronových frekvencích.

#### **Harwell**

Do roku 1960 středisko ve Spojeném království zabývajícím se jaderným výzkumem, včetně jaderné fúze. Po tomto roce se z Harwellu odtajněný výzkum jaderné fúze přestěhoval do areálu bývalých leteckých

opraven (z doby 2. světové války) nedaleko Culhamu, dnes Culham Centre for Fusion Energy.

#### **HAS – Hungarian Academy of Sciences**

Maďarská akademie věd, partner EFDA v Association Euratom-HAS

#### **Heliový popel [Helium ash]**

Fúzní reakce v deuteriovém plazmatu produkuje energetické  $\alpha$  částice (heliová jádra), které se zpomalují srážkami se „studným“ palivem (plazmatem). Po ztrátě své energie už nelze heliová jádra dále využít a právě ona vytvoří heliový „popel“. Aby fúzní reakce nevyhasla, musí být dodáváno nové palivo a heliový popel musí být odstraněn.

#### **HIP – Hot Isostatic Pressing**

Metoda zpracování materiálu za tepla a vysokého tlaku

#### **HiPER**

Zařízení pro výzkum energie vysokovýkonným laserem [High Power laser Energy Research facility]: projekt laserového systému (pouze civilního určení), který by měl zapálit fúzi metodou „fast ignition“. Navíc by měl tento projekt vyřešit další problém, doposud perspektivu inerciální fúze silně omezující, to je nízkou opakovací frekvenci pulzů. Zařízení je projektováno s podobným cílem, se kterým se staví i tokamak ITER, jako důkaz technické proveditelnosti principu fúzního reaktoru. Projektu se účastní 26 institucí z 10 zemí včetně České republiky.

#### **Hlavní poloměr [Major radius]**

Vzdálenost středu komory tokamaku od jeho vertikální osy symetrie

#### **H-mode [high = vysoký]**

Režim se zvýšeným udržením energie plazmatu, který byl poprvé pozorován v plazmatu tokamaku ASDEX v roce 1982. Režim je charakterizován zvýšeným

gradientem teploty na okraji a typicky zdvojením doby udržení energie oproti normálnímu režimu „L-mode“ [low = nízký].

#### **Horké komory [Hot cells]**

Komory s kontrolovanou atmosférou, dobře stínící okolí od svého radioaktivního obsahu. Ukládají se do nich radioaktivní materiály a komponenty za účelem další manipulace s nimi (úprava pro další použití, renovace, demontáž atd.). Komory jsou opatřené dálkově ovládanými manipulatory a lidem nejsou přístupné.

#### **Horní hybridní rezonance**

##### **[Upper hybrid frequency]**

K této rezonanci vř elektromagnetické vlny (tj. ke zpomalení fázové rychlosti vlny až na hodnotu, při níž nastává intenzivní interakce vlny s částicemi plazmatu) dochází v té oblasti nehomogenního plazmatu nacházejícího se v magnetickém poli tehdy, kdy součet kvadrátů plazmatické frekvence a cyklotronní frekvence elektronů nabude hodnoty rovné kvadrátu frekvence vlny.

#### **Hořet [Burn]**

Fúzní proces „spalující“ v reaktoru palivo deuterium a tritium (D-T) a uvolňující energii, nazývaný též „hoření“ plazmatu

#### **H-přechod (nebo L-H přechod)**

##### **[H-transition (or L-to-H transition)]**

Přechod z režimu L do režimu H, ke kterému zpravidla dochází po překročení určitého prahového výkonu dodatečného ohřevu.

#### **IAEA – Mezinárodní agentura pro atomovou energii (Spojené národy)**

##### **[International Atomic Energy Agency], Vídeň, Rakousko**

Projekt ITER je zastřešen zárukou IAEA.

#### **ICCD – Buzení proudu elektromagnetickou vlnou s iontovou cyklotronovou frekvencí**

##### **[Ion Cyclotron Current Drive]**

Neinduktivní buzení elektrického proudu v tokamakovém plazmatu

#### **ICF, Fúze s inerciálním udržením**

##### **[Inertial Confinement Fusion]**

Způsob realizace řízené fúze, při kterém laserové paprsky nebo svazky částic stlačují a ohřívají terčík fúzního paliva velmi rychle až na teplotu zapálení termonukleární reakce. Inerciální se nazývá proto, poněvadž setrvačnost hmoty (inertia) zabraňuje tomu, aby terčík explodoval a rozletěl se dříve, než dojde k zapálení reakce a tedy než fúze začne probíhat.

#### **ICRH – Ohřev plazmatu mikrovlnami o frekvenci rezonující s ionto-cyklotronovou frekvencí**

##### **[Ion Cyclotron Resonance Heating]**

Do plazmatu se vyzařují elektromagnetické vlny s frekvencí v oblasti cyklotronové frekvence iontů (radiové frekvence, typicky 20 až 50 MHz). ICRH patří spolu s ECRH a NBI k tzv. dodatečným ohřevům tokamakového plazmatu.

#### **Ideální [Ideal]**

Ve smyslu magnetohydrodynamiky (MHD) „ideální“ znamená případ, kdy se magnetické pole a plazma vždy pohybují společně (pole je v plazmatu „zamrzlé“). Aby tomu tak bylo, musí být elektrický odpor plazmatu velmi malý. Takovéto MHD přiblížení je pro fúzní plazma obvykle postačující.

#### **IEA – International Energy Agency**

Mezinárodní organizace se sídlem v Paříži

#### **IFMIF – Mezinárodní zařízení pro ozařování**

##### **materiálů [International Fusion Materials Irradiation Facility]**

Jedná se o zařízení navržené pro testování odolnosti

konstrukčních materiálů fúzní elektrárny vůči poškození zářením termojadernými neutrony. Mělo by být postaveno v Japonsku (nejspíše v Rokkasho) a spolu se zařízením ITER bude tvořit nejdůležitější část celosvětově koordinovaného termojaderného výzkumu. Intenzita neutronového toku bude 100krát větší než v tokamaku ITER.

#### **IGNITOR**

Původně americký projekt tokamaku se silným magnetickým polem 13 tesel. Nedávno byla uzavřena dohoda o jeho stavbě ve spolupráci Itálie (zařízení) a Ruska (místo: Troisk). Navazuje na řadu tokamaků ALCATOR z M.I.T., které byly stavěny pod vedením Bruna Coppiho.

#### **Iniciátor [Driver]**

Bud' laserový svazek nebo svazek částic používaný jako zdroj energie pro ozáření terčíku ve výzkumu fúzní reakce s inerciálním udržením

#### **INRNE – Ústav pro jaderný výzkum a jadernou energii [Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy], Sofie, Bulharsko**

Partner EFDA v Association EURATOM-INRNE

#### **INTOR – Mezinárodní tokamakový reaktor [INTERNATIONAL TOKAMAK REAKTOR]**

Předchůdce projektu tokamaku ITER (polovina osmdesátých let). Akce byla organizována prostřednictvím IAEA (International Atomic Energy Agency), ještě bez finančního zajištění vládami jednotlivých účastníků. Nicméně, jednalo se o velmi důležitý krok na cestě k následujícímu projektu ITER.

#### **IPP – Ústav fyziky plazmatu Maxe Plancka [Max-Planck-Institut für Plasmaphysik], Garching, Německo**

Partner EFDA v Association EURATOM-IPP provozuje tokamak ASDEX Upgrade. Kromě

Garchingu u Mnichova má IPP další pracoviště v Greifswaldu, kde se staví velký supravodivý stelarátor Wendellstein W7-X.

#### **IPPLM – Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion, Polsko**

Partner EFDA v Association Euratom-IPPLM

#### **IR – infra [Infra-Red]**

Infračervená část elektromagnetického spektra od červeného okraje viditelného světla (zhruba 1  $\mu\text{m}$ ) do vyšších vlnových délek (viz také FIR)

#### **IRE – Proces vnitřního přepojování [Internal Reconnection Event]**

Nestabilita, která přetrhá magnetické siločáry a přepojuje je pak do jiné topologie, v níž má systém menší celkovou energii. Tato nestabilita představuje limit výkonu sférických tokamaků. Přepojování hraje důležitou roli i v procesech na Slunci.

#### **IST – Instituto Superior Técnico, Lisabon, Portugalsko**

Partner EFDA v Association EURATOM-IST

#### **ISTTOK**

Tokamak pro studium neinduktivního buzení elektrického proudu v plazmatu v Instituto Superior Técnico, Lisabon, Portugalsko

#### **ITER-CDA – Koncepční návrh tokamaku ITER [ITER-Conceptual Design Activity]**

První, dva roky trvající etapa projektu ITER, založená již na čtyřstranné mezinárodní dohodě vlád čtyř projektů se účastnících stran (EU, USA, SSSR, Japonsko) s plným finančním krytím projektu, započatá v roce 1988

#### **ITER-EDA – Inženýrský návrh tokamaku ITER [ITER-Engineering Design Activity]**

Etapa projektu ITER následující s jistým zpožděním po etapě CDA (rozpad SSSR, nahrazen Ruskou

federací) od roku 1992. Závěr této etapy již v sobě zahrnoval výrobu modelů sedmi nejdůležitějších komponent navrhovaného zařízení.

#### **ITER-FDR – Finální návrh tokamaku ITER [ITER-Final Design Report]**

Dokument shrnující výsledky inženýrské etapy EDA projektu ITER

#### **ITER – Mezinárodní termonukleární experimentální reaktor**

#### **[International Thermonuclear Experimental Reactor]**

Po řadě let trvající mezinárodní spolupráce byla v roce 2006 mezi EURATOM (největší podíl), Čínou, Indií, Japonskem, Ruskem, Jižní Koreou a USA podepsána dohoda o projektu experimentálního reaktoru ITER, a to na třicet pět let (stavba, provoz a rozebrání). Zařízení ITER se staví v Cadarache (jižní Francie) a zprovoznění (první plazma) se očekává v roce 2019. Teprve v roce 2026 by však mělo být použito tritium, tedy skutečné D-T palivo.

#### **ITPA – Mezinárodní aktivita tokamakové fyziky [International Tokamak Physics Activity]**

Mezinárodně koordinovaný výzkum započatý v říjnu 2001, s cílem prohloubit porozumění fyziky hořícího tokamakového plazmatu. ITPA má širší oblast zájmu než jenom ITER.

#### **JAEA – Japonská agentura pro atomovou energii, dříve JAERI (Japonský ústav pro výzkum atomové energie)**

#### **[Japan Atomic Energy Agency, dříve Japan Atomic Energy Research Institute]**

Ředitelství organizace je v Tokiu, Japonsko.

#### **JAEC – Japonská komise pro atomovou energii [Japan Atomic Energy Commission]**

Tokio, Japonsko

#### **Jednoduchý/dvojnásobný nulový bod [Single/double null]**

Konfigurace magnetických povrchů, při níž v jistém místě poloidálního řezu zcela vymizí poloidální složka pole (existuje v něm jen toroidální pole vnějších cívek). Tento bod, v němž separatrix kříží sama sebe, se nazývá nulovým bodem. Může být vytvářen jak k tomuto účelu přímo v komoře nainstalovaným speciálním vinutím (tak je tomu u většiny tokamaků), tak jen vhodným zapojením vnějších poloidálních cívek (např. COMPASS). Většinou se používá konfigurace s jedním takovým bodem (single null, na straně divertoru), mohou však existovat i konfigurace se dvěma (double null).

#### **JET – Společný evropský torus [Joint European Torus]**

Největší tokamak na světě pracující v Culhamu u Abingdonu, Spojené království. Do konce roku 1999 byl provozovaný jako společný evropský podnik, v současné době je jeho vědecký program garantován v rámci EFDA národními fúzními asociacemi EURATOMu.

#### **JT-60SA – Průlomový japonský tokamak [Japan Tokamak 60 Super Advanced]**

Supravodivý velký tokamak (kategorie „satelitů“ pro ITER), který bude postaven v Naka (Japonsko) s účastí Evropy v rámci Dohody o širším přístupu [Broader Approach Agreement]. Objem plazmatu – 60 m<sup>3</sup>.

#### **JT-60U – Modernizovaný japonský tokamak [Japan Tokamak Upgrade]**

Naka, Japonsko. Největší japonský tokamak a druhé největší fungující zařízení po tokamaku JET. JT-60U nebyl navržen pro použití směsi deuterium-tritium, tzn. pracuje pouze s deuteriem. Objem plazmatu – 60 m<sup>3</sup>.



**Kinetická teorie [Kinetic theory]**

Podrobný matematický model plazmatu, který popisuje dráhy jednotlivých elektronů a iontů. Tento přístup, mnohem složitější než kapalinová MHD teorie, je nezbytný při studiu interakce vysokofrekvenčních vln s plazmatem a některých nestabilit, zejména existují-li v plazmatu energetické částice.

**Klasický transport****[Classical transport]**

Pohyb napříč magnetickým polem umožňují srážky mezi jednotlivými částicemi. Teorie, které popisují tento mechanismus, se nazývají „klasické“ (nebo „neoklasické“, pokud zahrnují dodatečné efekty toroidální geometrie). Naměřený transport tepla a částic v reálných experimentech je však mnohokrát větší, než tyto teorie předpovídají, a nazývá se proto anomální.

**Klystron**

Zdroj záření až MW výkonu v pásmu stovek MHz až jednotek GHz využívá jevu shlukování elektronů výkonového svazku vstříkovaného podél magnetického pole a procházejícího soustavou mikrovlnných rezonátorů. V tokamacích se klystrony používají jako zdroj elektromagnetických vln především pro neinduktivní generaci elektrického proudu tzv. dolně hybridní vlnou, viz rovněž LHCD.

**Korekční cívký [Correction coils]**

Cívký, jejichž hlavní úkol je eliminovat chyby vzniklé výrobou a umístěním cívek udržovacího pole. ITER bude mít mezi cívkami toroidálního a poloidálního pole 18 korekčních supravodivých cívek. Potřebný proud 10 kA poteče supravodivcem ze slitiny NbTi.

**Kryogenní vývěvy [Cryopumps]**

Kryogenní vývěvy se používají ve fúzních experimentech pro svou vysokou čerpací rychlost absorpcí

plynu celým povrchem desek chlazených na teplotu tekutého helia. Po určité době však musí být tyto vývěvy regenerovány ohřevem desek a odčerpáním uvolněného plynu zpět.

**Kryostat [Cryostat]**

Zařízení, které co nejdokonaleji tepelně izoluje např. supravodivé cívký tokamaku vychlazené na teplotu kapalného helia od okolí s pokojovou teplotou (či s ještě vyšší teplotou, např. od horké stěny vakuové komory tokamaku).

**KSTAR – Korejský supravodivý tokamak pro průlomový výzkum [Korean Superconducting Tokamak Advanced Research]**

Jihokorejský supravodivý tokamak, jeden ze dvou tokamaků na světě, které mají všechna vinutí supravodivá (druhým je čínský tokamak EAST).

**Langmuirůva sonda [Langmuir probe]**

Elektrická sonda ponořená do okrajového plazmatu měří hustotu, teplotu a elektrický potenciál plazmatu.

**Laserová ablace [Laser ablation]**

Použití laseru k náhlému vstříku (např. k diagnostickým účelům) nečistot do plazmatu odpařených laserem z plochy pevného materiálu

**Lawsonovo kritérium****[Lawson criterion]**

Minimální hodnota součinu doby udržení energie a hustoty iontů plazmatu (při optimální teplotě plazmatu), která již umožní, aby reaktor poskytl fúzní výkon nutný pro uhrazení všech ztrát energie plazmatu (někdy včetně účinnosti přeměny tepelné energie na elektrickou).

**LEI – Lithuanian Energy Institute, Litva**

Partner EFDA v Association Euratom-LEI

**Limiter**

Materiálový objekt zasahující do tokamaku tak, že

definuje okraj plazmatu, čímž zabraňuje přímému kontaktu plazmatu se stěnou nádoby.

**LIPAN – Laboratoř měřících přístrojů Akademie věd [Laboratorija Izmeritelnyh Priborov Akademii Nauk]**

Kódovaný název pozdějšího Ústavu atomové energie I. V. Kurčatova, Moskva, dnes RRC Kurchatov (Russian Research Center Kurchatov). V tomto ústavu, v laboratoři pro studium plazmatu, se zrodil tokamak.

**Lithium**

Nejlehčí kov přítomný v minerálech a solích zemské kůry. Bombardováním neutrony se štěpí na tritium a bude tak primárním palivem D-T fúzních reaktorů. Zásoby lithia se odhadují na desetitisíce let.

**LBNL – Lawrenceova národní laboratoř v Berkeley [Lawrence Berkeley National Laboratory]**

USA

**LHCD – Generace elektrického proudu v plazmatu dolnohybridními elektromagnetickými vlnami [Lower hybrid current drive]**

Doposud nejúčinnější způsob neinduktivní generace elektrického proudu v tokamacích tzv. dolnohybridní elektromagnetickou vlnou (frekvence několika GHz)

**LHD – Velké zařízení se šroubovicovou geometrií [Large Helical Device]**

Velký supravodivý stelarátor spuštěný v Japonsku roku 1998

**LLE – Laboratoř pro laserovou energii [Laboratory for Laser Energetics]**

University of Rochester, USA

**LLNL – Lawrenceova národní laboratoř v Livermoru [Lawrence Livermore National Laboratory]**

USA. Sídlo laserového systému NIF – National Ignition Facility.

**Magnetická osa [Magnetic axis]**

Konfigurace magnetických ploch v tokamaku tvoří řadu do sebe vnořených toroidů. Nejmenší „toroid“, nacházející se uvnitř této konfigurace, definuje magnetickou osu systému.

**Magnetické ostrovy****[Magnetic islands]**

Lokální, do sebe uzavřené struktury magnetického pole narušující hladké magnetické povrchy. Vznikají v důsledku nestabilit plazmatu.

**Magnetické povrchy, magnetické siločáry****[Magnetic flux surfaces, Magnetic field lines]**

Magnetické siločáry jsou myšlené křivky označující směr intenzity magnetického pole. Jejich hustota odpovídá intenzitě pole. V tokamaku vytváří siločáry magnetického pole soustavu „na sebe navlečených“ toroidálních povrchů, kterými je pohyb částic omezen. Tyto povrchy se nazývají magnetické povrchy.

**Malý poloměr [Minor radius]**

Polovina malého průměru toroidální vakuové nádoby tokamaku

**MAST – Megaampérový sférický tokamak****[Mega Amp Spherical Tokamak]**

Tokamak střední velikosti s vakuovou nádobou obdélníkového průřezu a s pravouhlými cívkami toroidálního magnetického pole pracuje v anglickém Culhamu od roku 1999. MAST se vyznačuje malým poměrem velkého a malého poloměru – malým aspect ratio.

**MCF – Fúze s magnetickým udržením****[Magnetic Confinement Fusion]**

Udržení a tepelná izolace plazmatu od okolních stěn pomocí magnetických polí

**MEdC – Ministry of Education and Research, Rumunsko**

Partner EFDA v Association EURATOM-MedC

**MHD – Magneto hydrodynamika****[Magneto hydrodynamics]**

Matematický popis plazmatu jakožto elektricky vodivé kapaliny umístěné v magnetickém poli

**MHD nestability [MHD instabilities]**

Stav systému plazma-magnetické pole, kdy náhodná malá porucha hustoty či magnetického pole samovolně rychle narůstá (systém je nestabilní). Poněvadž MHD nestability mají makroskopický charakter, patří tyto nestability k nejzohoubnějším (způsobí zánik plazmatu).

**MHEST – Ministry of Higher Education, Science and Technology, Slovinsko**

Partner EFDA v Association Euratom-MHEST

**Mikronestability [Microinstabilities]**

Nestability s charakteristickými rozměry řádu iontového cyklotronního poloměru, tedy mnohem menšími než je rozměr zařízení. Jsou považovány za příčinu krátkovlnných (s malými rozměry) turbulencí v tokamaku a tím i za příčinu anomálního transportu.

**Mirnovovy cívky [Mirnov coils]**

Magnetické cívečky válcového tvaru umístěné co nejbližší okraji plazmatu a používané jako čidla změn poloidálního magnetického pole a tím i změn polohy proudového prstence plazmatu

**MIT – Technický ústav v Massachusetts [Massachusetts Institute of Technology]****Boston, USA**

Provozuje divertorový tokamak ALCATOR se silným magnetickým polem.

**Model jediné tekutiny [Single fluid model]**

Soustava rovnic, které popisují plazma jako magnetizovanou, elektricky vodivou tekutinu s běžnými vlastnostmi kapaliny, jako je viskozita, tepelná vodivost atd. Sledování odděleného chování elektronů

a iontů (což by byla dvousložková tekutina) se v tomto případě neuvažuje.

**Monte Carlo code**

Statistická technika používaná v numerických výpočtech, kde se mohou dané události vyskytovat vícekrát a každá s určitou pravděpodobností.

**MSE – Pohybový Starkův jev****[Motional Stark Effect]**

Lokální metoda přímého určení profilu elektrického proudu v tokamacích. Využívá se k tomu svazků neutrálních atomů určených pro ohřev plazmatu pomocí NBI. Tyto atomy, letící napříč magnetického pole, „vidí“ v důsledku velké rychlosti ve své klidové soustavě silné elektrické pole. Toto pole způsobí Starkovo rozštěpení spektrálních čar emitovaných atomy, přičemž polarizace tohoto emitovaného záření určuje směr magnetické siločáry v místě jeho vzniku. Známe-li velikost toroidálního pole v daném místě, lze tak určit i lokální velikost pole poloidálního, tím i toroidální proudové hustoty a tedy i radiální profil bezpečnostního faktoru.

**MTR – Magnetický termojaderný reaktor****[Magnitnyj termojadernyj reaktor]**

Projekt udržení plazmatu silovým polem iniciovaný O. A. Lavrentěvem, zhmotněný do ideje tokamaku A. Sacharovem a J. Tammem. Experimentální práce vedl N. A. Javinskij a později L. A. Arcimovič.

**Nábojová výměna [Charge Exchange]**

Proces, při kterém iont plazmatu získá chybějící elektron od neutrálního atomu. Je-li původní iont vodíkový, je neutralizován záchytem jediného elektronu, přestává být držen magnetickým polem a uniká z plazmatu. Z energie neutrálních atomů samovolně vylétujících z plazmatu lze pak určit energii iontů v plazmatu, a tudíž i teplotu plazmatu (jedná se o pasivní diagnostickou metodu).

**NBI – Ohřev a buzení proudu svazkem neutrálních částic [Neutral Beam Injection heating and current drive]**

Vstřík svazku rychlých neutrálních částic, které jsou v plazmatu ionizovány, zpomalovány srážkami a tím plazma ohřívají (předávají mu svou energii). Mají-li vstříkované svazky složku energie ve směru podél magnetického pole, mohou v plazmatu budit také elektrický proud (předávají impulz). NBI používá celá řada tokamaků (START, MAST, JET a mnoho dalších). NBI bude používat i pražský tokamak COMPASS.

**Nb<sub>3</sub>Sn, NbTi, MgB<sub>2</sub>**

Supravodivé materiály používané ve výzkumu magnetického udržení plazmatu

**NbTi vodič [NbTi conductor]**

Dobře zpracovatelný supravodič ze slitiny niobu a titanu, použitelný při teplotě tekutého helia 4,5 K pro magnetické pole do 10 T

**Nečistoty [Impurities]**

Jiné ionty než ionty paliva jsou v plazmatu nežádoucí. Vlivem iontů nečistot totiž plazma rychle ztrácí energii vyzařováním na vlnových délkách jejich čárového spektra a navíc tyto ionty plazma silně „zředňují“. Nečistoty se do plazmatu dostávají obvykle ze stěn „vidících“ plazma (viz **PFC**).

**Neoklasická teorie [Neo-classical theory]**

Neoklasická teorie je klasická srážková teorie transportu plazmatu opravená s ohledem na toroidální tvar plazmatu. Neoklasická teorie předpovídá existenci samobuzeného proudu [bootstrap current].

**Neutronová zátěž stěny [Neutron wall loadings]**

Neutronový tok procházející první materiálovou stěnou obklopující plazma

**Neutronový násobič [Neutron multipliers]**

Fúze deuteria a tritia potřebuje jedno jádro tritia na

jeden akt fúze, který uvolní jeden neutron. Poněvadž v obalu [blanketu] elektrárny ne každý neutron reaguje s lithiem za vzniku nového atomu tritia, měl by být v obalu použit násobící prvek, který by zvětšil produkci tritia, aby zajistil elektrárně, co se týče tritia, soběstačnost. Například berylium.

**Neutrony [Neutrons]**

Elementární elektricky neutrální částice v atomovém jádru. Vznikají při slučovaci reakci deuteria a tritia i při mnoha dalších jaderných reakcích.

**NIFS – Národní ústav pro fúzní vědu [National Institute for Fusion Science]**

Nagoya, Japonsko

**Nízkoaktivovatelné materiály****[Low-activation materials]**

Materiály, které po ozáření neutrony nevykazují vysokou a dlouhodobou sekundární radioaktivitu. Této vlastnosti lze dosáhnout optimalizací chemického složení materiálu. Snížení dlouhodobé aktivace je důležité pro usnadnění recyklace použitého materiálu.

**NRIM – Národní ústav pro výzkum kovů [National Research Institute for Metals]**

Sakura-mura, Japonsko

**NSTX – Národní kulový toroidální experiment [National Spherical Torus Experiment]**

PPPL Princeton, USA. Má obdobné rozměry jako MAST, ale jiný tvar. Zahájil činnost v roce 1999.

**Obrácený (magnetický) stříh****[Reverse (Magnetic) Shear]**

V tokamaku je obvykle největší hustota toroidálního elektrického proudu uprostřed komory. V tomto případě „bezpečnostní faktor“ roste od středu komory ke kraji plazmatu. Při existenci neinduktivně buzeného proudu může však být dosaženo největší proudové hustoty i mimo osu. V tomto případě „obráceného

magnetického střihu“ má bezpečnostní faktor minimum mimo střed plazmatu. Pomocí obráceného nebo malého střihu („optimalizovaný střih“) některé tokamaky, jmenovitě DIII-D a TFTR v USA, JT 60U v Japonsku a JET v Evropě, dosáhly mnohem vyšších parametrů plazmatu. Obrácený střih je potenciální scénář stacionárního tokamaku.

#### **OH – Ohmický ohřev [Ohmic Heating]**

Ohmický ohřev Jouleovým teplem elektrického proudu tekoucího plazmatem je analogií ohřívání drátu průchodem proudem. Ohmický ohřev v tokamaku nestačí k dosažení termonukleárních teplot, poněvadž na rozdíl od drátu odpor plazmatu s rostoucí teplotou silně klesá, takže ohmický ohřev se při vysokých teplotách plazmatu stává neúčinný.

#### **ORNL – Národní laboratoř v Oak Ridge [Oak Ridge National Laboratory], USA**

Sídlo domácí agentury USA pro ITER – U.S. ITER Project Office (USIPO) a superpočítače Jaguár používaného pro simulace tokamakového plazmatu. Zařízení Spallation Neutron Source zde také testuje metodu neutronové difrakce supravodiče pro ITER.

#### **ÖAW – Austrian Academy of Sciences**

Rakousko, partner EFDA v Association EURATOM-ÖAW

#### **PALS – Prague Asterix Laser System**

Společný laserový systém ÚFP AV ČR, v. v. i., a FZÚ AV ČR, v. v. i., převzatý z MPI Garching, kde pracoval pod názvem Asterix.

#### **Parametry plazmatu**

##### **[Plasma parameters]**

Fyzikální veličina (kvantita) charakterizující plazma, která musí být zjišťována experimentálně. Ku příkladu elektrický proud tekoucí plazmatem, hustota a teplota plazmatu, doba udržení energie či částic v plazmatu, parametr beta atd. Zařízení pro měření

parametrů plazmatu se souhrnně nazývají diagnostiky (plazmatu).

#### **PbLi**

Eutektická slitina lithia a olova uvažovaná jako materiál obalu plodícího tritium, umístěného ve vakuové nádobě reaktoru kolem plazmatu

#### **PEGASUS**

Sférický tokamak ve Wisconsinu s mimořádně malým aspect ratio (následník zařízení Medussa)

#### **Peleta [Pellet]**

Termojaderné palivo zmražené do malých kuliček o průměru několika mm. V ICF experimentech jsou tyto pelety rychle stlačeny laserovými nebo částicovými svazky, v MCF experimentech jsou tyto pelety, urychlené na rychlost několika kilometrů za sekundu, vstřelovány do plazmatu jakožto dodávka nového paliva.

#### **PFC – Části (vakuové komory) „vidící“ plazma [Plasma Facing Components]**

Části (komponenty) tokamaku přímo interagující s plazmatem, které musí odolávat velkým tepelným tokům. Typickými PFC jsou desky divertoru a první stěna tritium plodícího blanketu [PFC, Primary First Wall].

#### **PIN – Skupina pro informování veřejnosti [Public Information Network]**

Skupina je složená z dobrovolných i profesionálních členů asociací a má za úkol informovat širokou veřejnost o událostech na poli fúze. Skupina má placeného vedoucího, sekretářku a redaktora časopisu Fusion in Europe. Časopis vznikl v roce 2011 spojením časopisů Fusion News a JET Inside. Členové skupiny si vyměňují zkušenosti, překládají do mateřských jazyků písemné i videomateriály týkající se fúze. Od roku 1999 se konají výroční setkání EFDA PIN Meeting ve vybraném místě Evropy. PIN,

dříve PIG – Public Information Groupe, je součástí EFDA a jeho sekretariát sídlí v Garchingu u Mnichova.

#### **PIREX – Experiment s ozařováním protony [Proton IRadiation EXperiment]**

Zařízení pro testování materiálů (Association EURATOM-Switzerland, CRPP-FT, PSI, Villigen, Švýcarsko)

#### **Plasma**

Stav hmoty při teplotě alespoň několika stovek tisíc stupňů, kdy jsou atomy rozštěpeny (ionizovány) na své komponenty – ionty a elektrony – a vytvářejí tak elektricky vodivé médium. Plazma a elektrická či magnetická pole tak na sebe vzájemně silně působí. Plazma je elektricky kvazineutrální a v důsledku dalekého dosahu elektrických sil vykazuje kolektivní chování. V češtině je plazma, ionizovaný plyn, středního rodu a bývá nazývané čtvrtým skupenstvím hmoty.

#### **Plazmová frekvence [Pasma frequency]**

Na elektrony vychýlené v plazmatu oproti iontovému pozadí (tedy při porušení kvazineutrálnosti plazmatu) působí přitažlivá Coulombova síla, která spolu s jejich setrvačností způsobí oscilace elektronů. Frekvence těchto kmitů roste s druhou odmocninou hustoty plazmatu a nazývá se plazmová frekvence. Tato veličina hraje důležitou roli v chování plazmatu, především pak v interakci plazmatu s elektromagnetickými poli. V tokamacích nabývá hodnoty až jednoho sta GHz.

#### **Plodící blanket [Breeder]**

Termín se někdy používá pro část fúzního reaktoru, kde dochází k „plození“ tritia jadernou reakcí fúzních neutronů (které jsou produktem D-T reakce) a lithia. Neexistuje tu žádná spojitost s procesem plodícím štěpné materiály v rychlých štěpných reaktorech.

#### **Plodící poměr [Breeding ratio]**

Počet atomů tritia vytvořených v obalu fúzní elektrárny vztažený na jádro tritia spotřebovaného při fúzní reakci. Aby bylo nahrazeno všechno spotřebované tritium a s uvážením prvního paliva vloženého do nové elektrárny, měl by být plodící poměr poněkud větší než jedna.

#### **PLT – Princetonský velký torus [Princeton Large Torus]**

Experimentální zařízení (obdoba sovětského tokamaku T-10), které díky dodatečnému ohřevu pomocí NBI a LHCD první dosáhlo termojaderných teplot (85 milionů stupňů). První tokamak s elektrickým proudem v plazmatu přes 1 MA.

#### **Podmínka zapálení [Ignition condition]**

Podmínka pro samoudržující se fúzní reakci: ohřev pomocí  $\alpha$  částic nahrazuje všechny tepelné ztráty. Vnější zdroje ohřevu plazmatu nejsou již dále zapotřebí a fúzní reakce se udržuje sama. Pro energetický zisk v elektrárně není ale samostatné hoření nutné, k optimalizaci výkonu reaktoru bude výhodné jistou velikost vnějšího ohřevu zachovat (tzv. „řízené hoření“ [driven burn]).

#### **Podobnostní zákony [Scaling laws]**

Empirické (tj. odvozené ze zkušeností získaných na podobných zařízeních) nebo teoretické vztahy závislosti důležitých parametrů systému na všech ostatních parametrech zařízení. Ve fúzním výzkumu se metody podobnostních vztahů (empirického odhadu) používají především pro předpověď velikosti důležitých parametrů plazmatu projektovaných větších zařízení, včetně reaktoru (například doby udržení energie, dosažitelné teploty, hustoty apod.).

#### **Polarimetrie [Polarimetry]**

Diagnostická metoda měření pootočení roviny

polarizace lineárně polarizované elektromagnetické vlny po jejím průchodu plazmatem ve směru magnetického pole způsobená Faradayovým jevem. Určení úhlu pootočení na mnoha těživách současně umožňuje určení radiálního profilu poloidální složky magnetického pole a tedy i profilu bezpečnostního faktoru  $q$  ( $r$ ) (viz také Faradayova rotace).

#### Poloidální pole [Poloidal field]

Komponenta magnetického pole kolmá na toroidální směr. Existence poloidálního pole tvoří podstatu magnetické nádoby – tokamaku. Toto pole je vytvářeno především elektrickým proudem tekoucím plazmatem, ale pro stabilizaci plazmatu také vnějšími cívkami.

#### Polywell – dutina v mnohostěnu

##### [Well in polyhedron]

Americká verze Bussardových elektromagnetických pastí zde kulového tvaru, na rozdíl od lineárních charakteristik elektromagnetických pastí O. Lavrentěva

#### Poslední uzavřená magnetická plocha, Separatrix [Last closed flux surface]

Pomyslná hranice, která odděluje ve výbojové komoře prostor magnetických siločar, jež nikdy stěnu neprotínou (tzv. „uzavřené“ siločáry), od magnetických siločar, které již někde stěnu výbojové komory protínají (tzv. „otevřené“ siločáry).

#### Poškození zářením [Irradiation damage]

Neutrony s energií 14 MeV, vytvářené slučovací reakcí deuteria a tritia, jsou materiálem obklopujícím plazma zpomalovány a nakonec i absorbovány. Jejich rozptyl na jednotlivých atomech uvnitř mřížky však dodává atomům energii a vyráží je z jejich původních pozic s energií dostačující pro iniciaci jejich kaskádového posunu. Poškození konstrukčního materiálu posunutím atomů je velmi dobře známo ze štěpných reaktorů. Viz rovněž Dpa.

#### Poruchová pole [Error fields]

Magnetické cívky tokamaku jsou navrženy tak, aby vytvářely požadovanou konfiguraci magnetického pole. Konečný počet cívek a nepřesnosti v jejich konstrukci mají vždy za následek nechtěné odchylky od této konfigurace, známé jako poruchová pole. Tato pole zvyšují náchylnost zařízení k nebezpečným nestabilitám plazmatu. Na druhé straně jisté, úmyslně vytvářené modulace magnetického pole na hranici plazmatu mohou stabilitu plazmatu naopak zvyšovat.

#### PPPL – Laboratoř fyziky plazmatu v Princetonu [Princeton Plasma Physics Laboratory],

##### New Jersey, USA

PPPL patří k legendám americké fúze. Začínal tu L. Spitzer se svými stelarátory, M. Gottlieb zde přestavěl C-stellarator na ST Tokamak, tokamak PLT v srpnu 1978 dosáhl rekordní teploty 85 milionů stupňů. Zde Spojené státy postavily a demontovaly svůj jediný tokamak schopný pracovat s tritiem – Tokamak Fusion Test Reactor.

#### Profil [Profile]

Závislost parametru plazmatu na prostorové proměnné

#### Protážení [Elongation]

Poměr výšky poloidálního řezu plazmatu v tokamaku k jeho radiální šířce

#### Provoz zařízení v ustáleném stavu

##### [Steady State Operation]

Provoz zařízení v ustáleném stavu znamená, že parametry systému se od okamžiku zahájení provozu již ustálily a dále se nemění (u tokamaku především uvolňovaný fúzní výkon, teplota stěn komory atd.). Tento stav bude muset trvat v reaktoru po velmi dlouhou dobu, až do únavy či jiného projevu opotřebování jeho jednotlivých částí. U zařízení ITER bude

žádoucí, aby ukončení plánovaného pulzu o délce stovek sekund nebylo určeno chováním plazmatu, ale zásahem operátora.

#### První stěna [First wall]

První materiálová stěna, s níž přichází plazma do přímého styku. Dnes je první stěna ve všech zařízeních chráněná materiálem s nízkým Z (jako jsou uhlíkové desky, borové nebo beryliové pokrytí).

#### Přerušení (supravodivého stavu) [Quench]

Nežádoucí přerušení činnosti supravodivého magnetu tím, že vodič magnetu ztratí z nějakého důvodu náhle v některém místě (obvykle velmi lokalizovaném) supravodivost a přejde v tomto místě do stavu s normální vodivostí. Náhlé zvýšení elektrického odporu obvodu magnetu, obsahujícího obvykle velkou magnetickou energii, vede v důsledku rychle klesajícího proudu k indukci vysokého napětí a tím k okamžitému vydělování podstatné části magnetické energie právě v místě postiženém ztrátou supravodivosti a tak k možnému zničení tohoto místa. Supravodivé obvody musí být proto vybaveny detektory takového „quench“ a rychlými obvody zajišťujícími disipaci energie na odporu vně cívky magnetu.

#### PSI – Paul-Scherrer-Institut

Villigen, Švýcarsko. Association EURATOM – Confédération Suisse své aktivity týkající se fúzní technologie supravodičů a technologie materiálů provozuje v PSI.

#### Q – Zesílení výkonu plazmatu

##### [Plasma Power Amplification]

Poměr fúzního výkonu uvolňovaného fúzní reakcí v plazmatu k výkonu dodávaného do plazmatu vnějšími zdroji tak, aby tato reakce probíhala na stacionární úrovni. Prvním zařízením s  $Q > 1$  má být ITER ( $Q \approx 10$ ).

#### Radiální elektrické pole [Radial electric field]

V tokamacích vzniká radiální elektrické pole (tedy kolmé na směr siločar udržujícího magnetického pole) v důsledku rovnováhy mnoha elektrických i magnetických sil. Toto pole hraje důležitou roli ve zmiřování anomální difúze částic.

#### Reakce deuterium-helium 3 [Deuterium-helium 3 reaction]

Je alternativní fúzní reakcí k reakci deuterium-tritium:  $D + {}^3\text{He} \rightarrow p + {}^4\text{He} + 18,4 \text{ MeV}$ . Poněvadž palivo není radioaktivní a produkuje relativně málo neutronů (z následujících reakcí mezi deuterií a tritiem), je tato reakce bezpečnější a ekologicky výhodnější ve srovnání s reakcí deuterium-tritium. Nicméně bude vlivem vyšších teplot, hustot a dob udržení mnohem obtížněji realizovatelná.

#### Reakce deuterium-tritium

##### [Deuterium-tritium reaction]

Reakce deuterium-tritium  $D + T \rightarrow n + {}^4\text{He} + 17,6 \text{ MeV}$  je fúzní reakcí s nejvyšším účinným průřezem a vyžadující nejnižší teplotu paliva. Bude proto použita v první budoucí fúzní elektrárně. Reakcí vzniká elektricky nabitá  $\alpha$  částice (jádro atomu helia) s energií 3,52 MeV a neutron s energií 14,06 MeV. Pro ohřev dodávaného studeného paliva v magnetickém poli zachycenými  $\alpha$  částicemi bude tedy k dispozici jen 20 % fúzní energie, zbývajících 80 % bude odevzdáno neutrony v blanketu. Skutečné D-T palivo bylo použito zatím jen v tokamaku JET a TFTR, poněvadž tritium je radioaktivní.

#### REBEX – Experiment s relativistickým elektronovým svazkem [Relativistic Electron Beam Experiment]

Zařízení pro výzkum interakce silnoproudého elektronového svazku s nehomogenním plazmatem, ÚFP AV ČR, v. v. i., činné v letech 1975 až 1989

**Reflektometrie [Reflectometry]**

Diagnostická metoda měření hustoty plazmatu a jejich fluktuací, založená na odrazu elektromagnetických vln od vrstvy plazmatu s hustotou danou frekvencí použité vlny

**Relaxace [Relaxation]**

Změna plazmatu směřující ke stavu s nižší energií

**Rezonanční ionty/elektrony****[Resonant ions/electrons]**

Částice, jejichž některý parametr (například cyklotronová frekvence či rychlost pohybu částice podél magnetického pole) se dostává do rezonance s elektromagnetickou vlnou šířící se plazmatem.

**RFP – Pinč s obráceným polem****[Reversal Field Pinch]**

RFP je pinč s obráceným toroidálním polem. Znamená to, že při kompresi plazmatu může vzniknout tak velký poloidální proud, že se převrátí směr toroidálního pole od vnějších cívek. Toroidální proud teče po šroubovici a má tedy malou poloidální složku, která generuje toroidální magnetické pole. Vnější cívky u RFP ovšem na rozdíl od tokamaku vytvářejí jen poměrně slabé stabilizační toroidální pole. Zařízení s tímto konceptem se studují v Itálii, Švédsku a v USA.

**RFX – Pinčový experiment s obráceným polem****[Reversed Field Pinch Experiment]**

CNR Padova, Itálie (Association EURATOM-ENEA).

**RISØ – Forskningscenter Risø, Dánsko.**

Partner EFDA v Association EURATOM- RISØ.

**RIGATRON**

Neúspěšný projekt relativně malého kompaktního tokamaku společnosti Inesco. Návrh vycházel z tokamaku s mimořádně silným magnetickým polem ALCATOR od Bruno Coppiho v M.I.T. RIGATRON

financoval 12 miliony dolarů Robert Guccione, majitel časopisu pro pány Penthouse. RIGATRON měl sloužit jako zdroj tepla pro nejrůznější účely. Název RIGATRON pochází od banky Riggs Bank, která poskytla první úvěr.

**Rotační transformace [Rotational transform]**

Úhel rotační transformace udává úhel pootočení siločáry magnetického pole v poloidálním směru, vykoná-li tato siločára jeden oběh nádobou ve směru toroidálním. Tento úhel, vyjádřený v násobcích  $2\pi$  (tedy v počtu poloidálních otáček), je roven převrácené hodnotě bezpečnostního faktoru  $q$ .

**Rozdělovací funkce [Distribution function]**

Popisuje jak prostorové, tak rychlostní rozložení částic plazmatu.

**Rychlé zapálení [Fast ignition]**

Návrh dvoustupňové metody inerciální fúze, při které po prvním, pouze stlačujícím pulzu následuje druhý, mnohem kratší (může pocházet z jiného zdroje), který palivo rychle zapálí. Viz rovněž ICF.

**Sedlové cívky [Saddle coils]**

Speciální cívky tokamaků JET a COMPASS, které kvůli studiu potlačování nestabilit zavádějí do konfigurace magnetického pole umělé poruchy radiální složky tohoto pole.

**Semiempirický [Semi-empirical]**

Popis chování systému, v němž je složité chování některých klíčových veličin předpovězeno na základě experimentálního pozorování místo striktního teoretického zdůvodnění.

**SERF – Sociologicko-ekonomický výzkum fúze****[Socio-Economic Research in Fusion]**

Část evropského fúzního programu

**SOL – „Ořezávaná“ vrstva [Scrape-Of-Layer]**

Oblast plazmatu nacházející se mezi „okrajem“ plaz-

matu (definovaným plazma ohraničujícím limitem nebo separatrixou) a stěnou tokamakové nádoby. V této oblasti siločáry končí na materiálové stěně, která částice plazmatu, pohybující se podél těchto siločar, „ořezává“.

**Spektroskopie [Spectroscopy]**

Diagnostická metoda analyzující záření vysílané plazmatem. Spektroskopie může pomocí různých částí elektromagnetického spektra (IR, viditelné, VUV, XUV atd.) poskytnout informaci o teplotě, eventuelně i hustotě plazmatu, jeho pohybu i o skladbě nečistot v něm obsažených.

**Sféromak [Spheromak]**

Sférický tokamak, v jehož plazmatu tečou srovnatelné toroidální a poloidální proudy. Toroidální proud však není buzen transformátorem.

**ST – Kulový tokamak [Spherical Tokamak]**

Tokamak s velmi malým poměrem velkého a malého poloměru (aspect ratio), téměř připomínající kouli, ačkoli topologicky zůstává toroidem s centrálním sloupcem. Kulový tokamak je dnes v Evropě studován pomocí středně velkých zařízení MAST (CCFE), GLOBUS (Petrohrad).

**START**

Tokamak s malým aspect ratio v Culhamu. Držitel světového rekordu ve velikosti tokamakového  $\beta$ . Činnost ukončil v roce 1998 po instalaci svého následníka, sférického tokamaku MAST.

**Stelarátor [Stellarator]**

Toroidální zařízení určené pro fúzní výzkum, na rozdíl od tokamaků však neprotéká elektrickým proudem. Nevyžaduje tedy přítomnost transformátoru, principiálního nedostatku tokamaků jako trvale pracujícího reaktoru. Potřebná magnetická konfigurace, činící ze stelarátoru magnetickou nádobu (existence

magnetických povrchů) je vytvářena komplikovaným systémem nesymetrických vnějších cívek. Neexistence proudu činí z hlediska teorie stelarátoru ve srovnání s tokamaky odolnější vůči nestabilitám, z druhé strany jim však chybí přednost tokamaků, což je velmi účinné „samovytoření“ plazmatu s poměrně vysokou hustotou i teplotou.

**Střih (magnetický)****[Shear (magnetic)]**

Bezpečnostní faktor se obvykle v zařízeních s magnetickým udržením plazmatu od magnetické plochy k magnetické ploše napříč průřezem plazmatu mění. Tato změna se popisuje bezrozměrnou veličinou zvanou „magnetický střih“. V tokamacích je třeba odlišovat od „střihu rychlosti rotace plazmatu“ (velocity shear layer).

**SULTAN – Testovací zařízení pro velké supravodiče****[Supra Leiter Test Anlage]**

CRPP ve Villigen, Švýcarsko (Association EURATOM-Suisse Confédération)

**Supravodivá cívka [Superconducting coil]**

Magnetická cívka se supravodivým vinutím, které ztrácí elektrický odpor při ochlazení pod jistou kritickou teplotu blízkou absolutní nule. ITER použije supravodiče z materiálu niob-cín ( $Nb_3Sn$ ) a niob-titan ( $NbTi$ ) pracující při teplotě tekutého helia 4,5 K.

**Širší přístup [Broader Approach]**

Tato dohoda byla podepsaná s platností na deset let v únoru 2007 mezi EU a japonskou vládou. Dohoda doplňuje projekt ITER a má přiblížit začátek využívání fúzní energie vývojem moderních technologií pro budoucí fúzní reaktor DEMO.

**Štěpení atomových jader [Fission]**

Jaderný proces, v němž k uvolňování energie dochází při štěpení jader (tedy proces opačný jaderné fúzi)

některých velmi hmotných prvků (uran, plutonium) neutrony. Probíhá v tak zvané řetězové reakci (při jednom aktu rozštěpení se uvolní více než jeden neutron a reakce tak nabude charakteru řetězové laviny). Nebezpečnost štěpné jaderné reakce spočívá ve dvou faktech: produkty jsou dlouhodobě silně radioaktivní (viz problémy s jejich uložením) a realizace samotné reakce je ve srovnání s fúzí velmi jednoduchá (probíhá za pokojových teplot, vzniká tedy problém jejího poměrně snadného zneužití).

#### **TBM – Testovací modul obalu pro ITER**

##### **[Test Blanket Module for ITER]**

ITER nebude testovat jedinou, konečnou verzi modulů obalu, ale bude testovat šest různých verzí modulů, lišících se formou lithia a typem chlazení. Turbocirkulátory pro chlazení modulů plynným heliem vyvíjí královéhradecká firma ATEKO, a.s.

#### **TCV – „Tokamak à Configuration Variable“**

Tokamak navržený pro studium protaženého a silně tvarovaného plazmatu a účinků tvaru plazmatu na jeho udržení. Pracuje od r. 1992 v Lausanne, Švýcarsko (Association EURATOM–Confédération Suisse).

#### **TEKES – Finské technologické centrum**

##### **[Technology Centre Finland]**

Partner EFDA v Association EURATOM-TEKES.

TEKES připravuje testovací stolici DTP2 [Divertor Test Platform] pro dálkovou výměnu divertorových kazet.

#### **Teorie stability [Stability theory]**

Teorie časového vývoje malých poruch systému plazma–magnetické pole. Dochází-li k samovolnému narůstání této poruchy, je systém nestabilní. Dojde-li k saturaci růstu amplitudy poruchy na jisté, stále ještě malé hodnotě, zpravidla se pouze sníží udržení energie systému. Narůstá-li však dále nekontrolovatelným

způsobem, dojde k rychlé ztrátě rovnováhy a zániku systému (tzv. disrupci).

#### **Tepelná zátěž první stěny**

##### **[Thermal load of the first wall]**

První stěna reaktoru bude muset odvádět z reaktoru veškerý výkon přiváděný do plazmatu z vnějších zdrojů plus část fúzního výkonu neseného vznikajícími  $\alpha$  částicemi (což představuje 20 % fúzního výkonu). Zároveň bude muset odolávat dlouhodobě silnému toku neutronů, jejichž energie bude uvolňovaná v blanketu. Hustota výkonu dopadajícího z plazmatu na první stěnu bude v poloidálním směru silně nerovnoměrná. Průměrná hodnota tepelného toku pro ITER se předpokládá 0,5 MWm<sup>-2</sup> a pro návrh demonstračního tokamaku se počítá s rozmezím 2,0–2,5 MWm<sup>-2</sup>. Nejvíce zatížené budou desky divertoru, které budou muset odolat toku 10 až 20 MWm<sup>-2</sup>.

#### **Tepelné cyklování [Thermal cycling]**

Materiál opakovaně ohříváný a ochlazovaný může praskat. Obzvláště vysoké nebezpečí existuje u kompozitních materiálů na hranici, kde se stýkají materiály s různou teplotní roztažností. K určení odolnosti součástí se proto testují jejich dlouhodobým tepelným cyklováním. Některé testy provádí ÚJV Řež, a. s.

#### **Tepelné částice [Thermal particles]**

V prostředí nacházejícím se v termodynamické rovnováze lze rozdělení částic dle energie či rychlosti popsat jedinou Maxwellovskou rozdělovací funkcí a prostředí lze popsat jedinou teplotou. Částice prostředí se pak nazývají tepelné. V reálném plazmatu však mohou existovat z mnoha důvodů i částice s energií mnohokrát tepelnou energií převyšující. Takové částice se nazývají netepelné, energetické.

#### **Tesla [T]**

Jednotka indukce magnetického pole (hustota magnetického toku):  $1 T = 1 V \cdot s/m^2 = 10\,000 \text{ gaussů}$ .

#### **TEXTOR – Toroidální experiment zaměřený na výzkum technologií [Torus Experiment for Technology Oriented Research]**

Tokamak střední velikosti s kruhovým průřezem vakuové komory, v provozu od 80. let v Jülichu, Německo (Association EURATOM-FZJ)

#### **TFTR – Testovací fúzní reaktor – tokamak**

##### **[Tokamak Fusion Test Reactor]**

Princeton, New Jersey, USA. Ukončil činnost v březnu 1997. Vedle tokamaku JET to bylo doposud jediné zařízení na světě, v němž bylo možné použít, z důvodů radioaktivity tritia, skutečné palivo pro fúzní reakci, tj. směs deuteria a tritia v poměru 50 : 50. V r. 1994 se na něm podařilo uvolnit po dobu několika desetin sekundy 10,6 MW fúzního výkonu.

#### **TJ-II – Helic Stellarator**

Madrid, Španělsko (Association EURATOM-CIEMAT). Helic je stellarátor se šroubovicovou magnetickou osou.

#### **Tlak plazmatu [Plasma pressure]**

Veličina rovná součinu objemové hustoty všech druhů částic plazmatu a jejich teploty

#### **TLK – Tritiová laboratoř v Karlsruhe**

##### **[Tritium Laboratory Karlsruhe]**

Laboratoř ve Forschung Zentrum Karlsruhe, Německo

#### **TMP – Toroid v magnetickém poli**

##### **[Toroid v magnetickém poli]**

První zařízení typu tokamak (1956) se nejmenovalo tokamak a mělo keramickou vakuovou komoru. Obrovské ztráty energie vyzařováním nedovolily však plazma účinně ohřívát (4th Conference on Ionization Phenomena in Gases, 1958, Uppsala, Švédsko).

#### **Tokamak – Toroidální komora s magnetickými cívkami [TOroidálnaja KAmera i MAgnitnyje Katuški]**

Magnetická nádoba toroidálního tvaru (tvar pneumatiky). Plazma je stabilizováno silným toroidálním magnetickým polem. Poloidální komponentu pole, potřebnou k vytvoření konfigurace magnetické nádoby, vytváří elektrický proud tekoucí plazmatem toroidálním směrem jakžto sekundárním závitem transformátoru. Pro trvalý proud v reaktoru je však třeba použít jiné, neinduktivní způsoby generace proudu. Jsou to např. urychlení jistého malého množství elektronů v toroidálním směru přenosem impulzu elektromagnetické vlny či vstříkávání energetických částic. Uvažuje se i o „samobuzeném“ elektrickém proudu. Viz **Bootstrap**.

#### **TORE SUPRA**

Velký tokamak se supravodivými cívkami toroidálního magnetického pole a kruhovým průřezem výbojové komory v Association EURATOM-CEA v Cadarache, Francie (v jeho těsném sousedství probíhá výstavba tokamaku ITER). Poněvadž má trvalé magnetické pole, výzkum na něm se soustřeďuje především na dosažení ustáleného stavu plazmatu i teplotního režimu první stěny komory, a to za pomoci neinduktivní generace elektrického proudu dolnohybridní vlnou. Tento tokamak je držitelem rekordu v množství energie (1000 MJ) zavedené do plazmatu v pulzu o délce 6:21 minuty.

#### **Torsatron**

Stellarátorová konfigurace se spojitými helikálními cívkami

#### **Torus, toroid [Torus]**

Těleso, které vznikne rotací kruhu kolem osy ležící v rovině kruhu, ale umístěné mimo plochu tohoto



konfiguraci zvanou vstřícné pole. Centrální prostor této konfigurace je téměř bez magnetického pole a pole samo má z hlediska teorie všude stabilní křivost magnetických siločar (rozdíl oproti tokamakům). Přesto plazma z konfigurace poměrně snadno uniká, a to prstencovou a dvěma osovými šterbinami [cusps] a tím se tato konfigurace nezdá být pro reaktor použitelná.

#### VUV – Vakuové ultrafialové záření

##### [Vacuum Ultra Violet]

Oblast elektromagnetického spektra 150 až 200 nm. Poněvadž tato oblast záření je již silně absorbována vzduchem, diagnostika záření musí být prováděna ve vakuu (odtud vakuové záření).

#### Vyrovnaní [Break-even]

Zesílení výkonu fúzního reaktoru  $Q$  je popisováno poměrem výkonu uvolněného fúzní reakcí k výkonu použitého k ohřevu plazmatu. Podle konvence, vyrovnaní [break-even] odpovídá  $Q = 1$ , kdy fúzní výkon a příkon ohřevu se právě vyrovnávají a zapálení [ignition] odpovídá  $Q = \infty$ , když není již žádný dodatečný ohřev k hoření reakce potřebný (reakce hoří sama). Fúzní elektrárny budou pracovat při  $Q \leq 50$ .

#### WEC [World Energy Council]

Světová rada pro energii

#### WENDELSTEIN W7-AS

Stelarátor v Garchingu, Německo (Association EURATOM-IPP), je předchůdcem supravodivého stelarátoru Wendelstein 7-X, který se staví v Greifswaldu.

#### WENDELSTEIN W7-X

Velký supravodivý stelarátor s konfigurací plazmatu odpovídající podmínkám reaktoru. W7-X se staví v Greifswaldu, Německo (Association EURATOM-IPP). První plazma se předpokládá v roce 2014.

#### XUV – extrémní ultrafialové záření

##### [EXtreme Ultra Violet]

Ultrafialové záření z oblasti elektromagnetického spektra kratších vlnových délek než VUV, to je pod 120 nm (až k 10 nm, pak následuje HXR).

#### Zachycené částice

##### [Trapped particles]

Střed dráhy nabitě částice rotující kolem magnetické siločáry se přemisťuje volně podél siločáry s podélnou rychlostí částice. V tokamakách to znamená pohyb podél šroubovice z vnější oblasti tokamaku s menším polem do vnitřní oblasti tokamaku, kde pole narůstá (nepřímě úměrně velkému poloměru). V důsledku zrcadlového efektu (viz **Zrcadlo**) je některá částice zachycena. Tyto částice se tak nemohou volně pohybovat tokamakem dokola po šroubovicové dráze, ale místo toho kmitají dopředu a dozadu, jsou zachyceny. Tvar jejich dráhy se podobá banánu (odtud tzv. banánové trajektorie, banánové částice, na rozdíl od částic průletových).

#### $Z_{\text{eff}}$

Efektivní náboj plazmatu, měřítko obsahu nečistot:  $Z_{\text{eff}} = 1$  znamená, že v plazmatu nejsou žádné nečistoty, pouze jádra vodíku či jeho izotopů D a T.

#### ZETA – Termonukleární zařízení

##### s nulovým ziskem energie

##### [Zero Energy Thermonuclear Assembly]

Po mnoho let největší fúzní experiment na světě pracoval od roku 1957 v Harwellu, Spojené království.

#### Zpětná vazba [Feedback]

Regulační systém, který při zjištění odchylky sledované veličiny od požadované hodnoty (u tokamaků nejčastěji vychýlení polohy plazmatu od středu komory) nutí za použití vhodných nástrojů (generací vhodných magnetických polí, lokálním ohřevem plazmatu atd.)

systém vrátit se k požadované hodnotě. Jedná-li se o veličinu nestabilní, musí mít použitý zpětnovazební systém dostatečnou rychlost reakce.

#### Z-pinč [Z-pinch]

Lineární zařízení, ve kterém vzniká husté plazma rychlým průtokem silného elektrického proudu (nejprve drátkem nebo svazkem drátků, které se odpaří, a pak již proud protéká vytvořeným plazmatem). Plazma je radiálně stlačováno („pinčováno“) vlastním silným poloidálním polem (jev anglicky zvaný pinch effect). Z-pinč patřil mezi průkopnická fúzní zařízení a v padesátých letech minulého století se zdálo, že je jednoduchým způsobem, jak dosáhnout plazmatu termojaderných parametrů. Jak se však ukázalo, vykazuje řadu nestabilit (nedovolujících aplikaci odvozeného vztahu kvadratické závislosti teploty výboje na elektrickém proudu pro libovolně silné proudy), které zřejmě jeho využití pro reaktor neumožní. Existuje i tzv. theta pinč, v němž je geometrie proudu a pole vzhledem ke konfiguraci lineárního Z-pinče navzájem kolmá (silný elektrický proud protéká masivním vodičem tvaru podélně rozříznuté trubky, tedy ve směru poloidálního úhlu theta). Theta pinč Scylla bylo první zařízení, které generovalo fúzní neutrony. Dále existují toroidální či reverzní pinče.

#### Zrcadlo (magnetické) [Mirror]

Koncept magnetického udržení ve válcové nádobě se slabším polem v centrální části a silnými poli na obou koncích válce. Oblast silného pole totiž odráží elektricky nabitě částice pohybující se podél siločáry směrem ven z komory jako zrcadlo zpět do její centrální části. To však neplatí, bohužel, pro všechny částice, ale jen pro ty, které mají dostatečně velký poměr podélné a příčné energie, a tím se tato konfigurace nezdá pro fúzní reaktor použitelná.

#### Zvlnění [Ripple]

Hlavní, toroidální magnetické pole tokamaku je vytvářeno řadou diskretních cívek (ITER jich má 18). Výsledkem je malé zvlnění pole, tzn. pole je větší v rovině cívk a menší mezi cívkami. Zvlnění může působit na plazma například tak, že zvyšuje ztráty velmi rychlých iontů. Zvlnění mohou částečně odstraňovat korekční cívky, jejichž hlavní úkol je eliminovat chyby udržovacího pole vzniklé výrobou a umístěním cívek. ITER bude mít těchto korekčních cívek 18, budou umístěny mezi cívkami toroidálního a poloidálního pole.

#### 2XIIB

Zařízení s magnetickými zrcadly v LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA), produkující jako prvé vysokoenergetické, husté a stabilní plazma



# PŘEDPONY PRO VEDLEJŠÍ JEDNOTKY

kilo (k)	10 <sup>3</sup>	tisíc	mili (m)	10 <sup>-3</sup>	tisícina
mega (M)	10 <sup>6</sup>	milion	mikro (μ)	10 <sup>-6</sup>	miliontina
giga (G)	10 <sup>9</sup>	miliarda	nano (n)	10 <sup>-9</sup>	miliardtina
tera (T)	10 <sup>12</sup>	bilion	piko (p)	10 <sup>-12</sup>	biliontina
peta (P)	10 <sup>15</sup>	bilarda	femto (f)	10 <sup>-15</sup>	bilardtina

# LITERATURA

Pořadí doporučené literatury je voleno podle náročnosti – od nejméně po nejvíce náročnou, tedy od převážně slovního výkladu k literatuře používající matematický aparát. Označení tečkou propůjčuje seznamu třetí rozměr. Podle mého soudu se jedná o publikaci, kterou „musíte“ přečíst. Unikátní pozici zaujímá knížka Petra Kulhánka „Blýskání“. Vřele doporučuji. Až na jednu kapitolu, totiž tu o fúzi!? Zatímco většina obsahu je skvělá, kapitola „Zapálíme Slunce na Zemi?“ je poněkud nepřesná.

## KNIHY

### ZÁKLADNÍ ŠKOLA

Pictorius, V.: **Jak se chytá slunce**, Albatros, Praha 1981

Sedláček, K., Tůma, J.: **Atom skrývá naději**, Naše vojsko, Praha 1987

### STŘEDNÍ ŠKOLA

Augusta, P., Dufková, M., Hruza, J., Malínský, J., Marek, J., Opllová, M., Štoll, I., Tůma, J.: **Velká kniha o energii** (vybrané kapitoly), L. A. Consulting Agency, spol. s. r. o., Praha 2001

Bromberg, J. L.: **Fusion – Science, Politics, and Invention of a New Energy Source**, MIT Press, Cambridge, London 1983

• Heppenheimer, T. A.: **The Man-Made Sun**, Boston & Toronto 1984

Herman, R.: **Fusion – The Search for Endless Energy**, Cambridge University Press, Cambridge – New York – Port Chester – Melbourne – Sydney 1990

Kenneth, F. T.: **The Fusion Quest**, The John Hopkins University Press, Baltimore & London 1997

• Kulhánek, P.: **Blýskání**, AGA, Praha 2011

• Kuzněcov, E. I.: **Na puti k magnetnomu termojadernomu reaktoru**, Moskva, Energoizdat 1962

• McCracken, G. M., Stott, P.: **Fúze – energie vesmíru**, Mladá fronta, edice Kolumbus, Praha 2006 (Fusion – The Energy of the Universe, Elsevier 2005, překlad Milan Řípa, Jan Mlynář)

Pekárek, L.: **Termonukleární energie**, Malá moderní encyklopedie, Orbis, Praha 1959

Raymond, J.: **Amateur Nuclear Fusion**, International's Gentium, 2008

Seife, Ch.: **Sun in a Bottle The strange history of fusion and the science of wishful thinking**, Penguin Books, New York 2008

**Texty panelů putovní výstavy Evropské komise (DG XII Fusion Programme)**, překlad Žáček, F., Badalec, J., Hron, M. (uspořádal Žáček, F.), Ústav fyziky plazmatu AV ČR, Praha 1998

• Voronov, G. S.: **Šturm termojadernoj kreposti**, Nauka, Moskva 1985

## VYSOKÁ ŠKOLA

- Braams, C. M., Scott, P. E.: **Nuclear Fusion – Half Century of Magnetic Confinement Fusion Research**, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia 2002
- Chen, F. F.: **An Indispensable Truth, How Fusion Power Can Save the Planet**, Springer, New York, Dordrecht, Heidelberg, London 2011
- Chen, F. F.: **Úvod do fyziky plazmatu**, Academia, Praha 1984 (Introduction to Plasma Physics, Plenum Press New York 1974, překlad Rohlena, K.)
- Heřmanský, B., Štoll, I.: **Energie pro 21. století**, Vydavatelství ČVUT, Praha 1992
- Kulhánek, P.: **Úvod do teorie plazmatu**, AGFA 2011
- Lukjanov, S. J.: **Gorjačaja plazma i upravljajemyj termojadernyj sintéz**, Nauka, Moskva 1975
- Masa, B. S.: **Project Sherwood – The US Program in Controlled Fusion**, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, Reading 1960
- N. W. J. Nuclear: **Renaissance Technologies and Policies for the Future of Nuclear Power**, Taylor & Francis, New York, London 2005
- V. G., Carpintero-Santamaría N., Eds.: **Inertial Confinement Nuclear Fusion: A Historical Approach by its Pioneers**, Foxwell & Davies (UK) Ltd., London UK 2007

## PERIODIKA

### STŘEDNÍ ŠKOLA

- All for Power:** čtvrtletník, AF POWER Agency, a.s., <http://www.allforpower.cz>
- Energetika:** měsíčník, Český svaz zaměstnavatelů v energetice, <http://www.casopisenergetika.cz>
- E15:** deník, Mladá Fronta, <http://www.e15.cz>
- ITER Newsline,** internetový denník, ITER Organization, <http://www.iter.org/>
- Technický týdeník:** čtrnáctideník, Bussines Media CZ, s.r.o., <http://www.techtydenik.cz>
- Třípól,** [www.tretipol.cz](http://www.tretipol.cz), ČEZ, internetový časopis

### VYSOKÁ ŠKOLA

**Nuclear Fusion:** měsíčník, IAEA

### BLOGY

- Cosmic Log:** <http://cosmiclog.msnbc.msn.com>
- Next Big Future:** <http://nextbigfuture.com>

## ČLÁNKY

- Kolářek, K.: **Termojaderná energie a její využití**, Interní zpráva Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, Praha 1996
- Křenek P., Mlynář, J.: **Focus on nuclear fusion research**, zvláštní číslo časopisu Energetika pro European Nuclear Energy Forum (2011), str. 62
- Limpouch, J.: **Inerciální termonukleární fúze a perspektivy jejího energetického využití**, Energetika 42 (1992), č. 4, str. 109–114
- Mlynář, J.: **Lesk a bída termojaderné syntézy**, Vesmír 77 (1998), č. 4, str. 212–214
- Mlynář, J.: **ITER – cesta ke zvládnutí řízené termonukleární fúze**, Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, 49 (2004), č. 2, str. 129–150
- Mlynář, J.: **Padesát let Lawsonových kritérií**, Pokroky matematiky, fyziky & astronomie. Roč. 51, č. 3 (2006), str. 231
- Mlynář, J.: **Cesta jménem ITER**, Vesmír 85 (2006), č. 6, str. 356
- Mlynář J.: **Focus on: JET**, the European centre of fusion research, FDA-JET-R(07)01. – EFDA, Culham Science Centre, 2007, str. 201
- Mlynář, J., Pánek, R.: **Tracking ITER with COMPASS**, Physics World 21 [10] (2008), str. 14
- Mlynář J., Pánek R.: **Tokamak COMPASS back in operation**, Le Scienze Web News 10 (2009), str. 1
- Mlynář, J.: **O symetrii tokamaku**, Československý časopis pro fyziku, 59 (2009), č. 4, str. 207
- Mlynář, J.: **COMPASS Tokamak in Czech Republic now up and running**, EFDA Fusion news 3 (2009), str. 10
- Mlynář, J.: **Principy termojaderného reaktoru ITER**, Rozhledy matematicko-fyzikální, 85 (2010), č. 4, str. 19
- Řípa, M.: **1. ledna 1999 bylo Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky právě 40 let**, Československý časopis pro fyziku, 49 (1999), č. 4, str. 251–258
- Řípa, M.: **Wendelstein W7-X: Tokamak versus Stelarátor?**, VTM, 55 (2001), č. 4, str. 30–32
- Řípa, M.: **Moře energie obklopuje Greifswald**, VTM, 55 (2002), č. 12, str. 15
- Řípa, M.: **Výzkum řízeného termojaderného slučování se dožívá 50 let**, Technický týdeník, ročník 54 (2006), č. 15, str. 12
- Řípa, M.: **Kutil vyrobil termojaderný reaktor**, Lidové noviny, 17. března 2007, str. 11
- Řípa, M.: **Jak tokamak a stelarátor soutěžily**, Vesmír 86, 2007, č. 9, str. 583–585
- Řípa, M.: **Tokamak COMPASS byl slavnostně odhalen**, Technický týdeník, 56 (2008), č. 11, str. 11
- Řípa, M., Pánek, R., Mlynář, J.: **Instalace tokamaku COMPASS v Praze**, Československý časopis pro fyziku, 58 (2008), č. 4, str. 200–207
- Řípa, M.: **Historie tokamaku ve světě a u nás**, Československý časopis pro fyziku, 58 (2008), č. 4, str. 208–211
- Řípa, M.: **50 let tokamaku**, 3pol (třípól), 2. ročník elektronického časopisu, [www.tretipol.cz](http://www.tretipol.cz), březen 2009, str. 12
- Řípa, M.: **Inerciální elektrostatické udržení**, 3pol (třípól), 2. ročník elektronického časopisu, <http://www.tretipol.cz/3pol/zari-2009>, září 2009, str. 8–9

# CONTROLLED THERMONUCLEAR FUSION FOR EVERYBODY

THIS THIRD EDITION IS PUBLISHED TO MARK THE 50TH ANNIVERSARY  
OF INSTITUTE OF PLASMA PHYSICS, ACADEMY OF SCIENCES OF THE CZECH REPUBLIC, V. V. I.

Sources of energy pose a pivotal challenge in achieving sustainable development for humankind, with major concerns about their reserves and about their impact on the environment. This book provides an easy-to-read overview of one of the most promising research efforts in the energy sector, thermonuclear fusion.

Thermonuclear fusion powers the Sun, and Sun powers the Earth, including its water cycle, wind power and life in all its forms. If we could imitate the processes in the Sun on a human scale on Earth, we could use hydrogen (e.g., from plain water) as a virtually inexhaustible and extremely powerful fuel. Harnessing fusion would resolve most of the energy issues of our civilisation. However, on Earth it is impossible to reproduce the gravitational forces in the centre of the Sun. The challenge, therefore, is to find and develop techniques that would allow us to release the power of fusion.

This book covers the impressive story of the human struggle to achieve controlled thermonuclear fusion on Earth. While it has been written and rigorously cross-checked by fusion experts themselves, we believe it is nonetheless "reader-friendly" since special attention has been given to plain vocabulary and rich illustration. The topic is introduced with a detailed chronology of fusion research. The "raison d'être" of fusion research, i. e., its promise of energy, is briefly outlined. Physical principles of fusion reaction and of both magnetic and inertial confinement are then presented, with a special reference to the tokamak machines. Note that not only the first burning plasma experiment, the ITER project, is a tokamak, but also Czech fusion research is concentrated on a medium tokamak, COMPASS, at the Institute of Plasma Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague.

The COMPASS tokamak has an ITER-like plasma cross-section and its research programme is focused on studies of the plasma edge. A smaller tokamak GOLEM is operating at the Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering of the Czech Technical University in Prague. The GOLEM tokamak is based on the former CASTOR tokamak from IPP Prague and currently serves mainly for students' practica.

After an extended introduction, the book details the history of fusion research both around the world and in the Czech Republic in particular. Next, an overview is presented of all the major fusion experiments in the world at present. Quite naturally, this central part culminates with detailed information about the ITER project. Research into fusion technology and international collaboration of Czech fusion scientists are referred to in the following chapters. The book concludes with a strategic account of long-term perspectives of fusion, both in the energy industry and in research into new applications.

A list of useful web resources, glossary of abbreviations and recommendations for further reading can be found at the end of the book. The book was produced by the Institute of Plasma Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic.

- Řípa, M.: **Kokosy na... tokamaku**, Technický týdeník, 57 (2009), 26, str. 25
- Řípa, M.: **Hybridní jaderný reaktor**, 3pol (třípól), 2. ročník elektronického časopisu, <http://www.tretipol.cz/index.asp?clanek&view&744>, prosinec 2009, str. 12 a 13
- Řípa, M.: **Jaderná spolupráce: ITER, CERN a... Airbus**, Technický týdeník, 58 (2010), č. 4, str. 15
- Řípa, M.: **Broader Approach – Evropa a Japonsko společně v termojaderné fúzi**, Technický týdeník, 58 (2010), č. 15, str. 5
- Řípa, M.: **KTM je prvním tokamakem ve Střední Asii**, Technický týdeník, 58 (2010), č. 22, str. 31
- Řípa, M.: **Obnovitelné zdroje a termojaderná fúze**, Energetika, 60 (2010), č. 7, 421–424
- Řípa, M.: **Nečekané dítě otce Penthousu**, EKONOM, 54 (2010), č. 44, str. 60–61
- Řípa, M., Křenek, P.: **Tokamak COMPASS**, Inovační podnikání a transfer technologií, 2011, č. 1, str. 32–34
- Svoboda, V., Mlynář, J., Stöckel, J., Jex, I.: **Vzdělávání v oblasti termojaderné fúze v ČR**, Československý časopis pro fyziku. Roč. 59 (2009), č. 4, str. 233
- Šunka, P., Pekárek, L., Žáček, F., Rohlena, K., Krejčí, A., Kubeš, P., Králín, L. (uspořádali Krejčí, A. a Štirand, O.): **Termojaderná fúze – stav v roce 1991**, Československý časopis pro fyziku, 42 (1992), příloha č. 3, P1–P30
- Olivová, J.: **Evropský projekt ELI míří do České republiky**, Akademický bulletin, 2011, č. 4, str. 17–19
- Weinzettl, V.: **Čistá energie tokamaků**, Vesmír 77 (1998), č. 4, str. 207–211
- Žáček, F.: **Současný stav a perspektivy řízené jaderné fúze**, Energetika 42 (1992), č. 7, str. 199–204

# AUTOŘI



**Ing. Milan Řípa, CSc.** (1948) promoval na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT. Disertaci obhájil v Ústavu fyziky plazmatu ČSAV. V ÚFP ČSAV se zabýval optickou diagnostikou na pulzních plazmatických zařízeních a nyní pracuje v Útvaru vědecko-technických informací a popularizace ÚFP AV ČR, v. v. i. Je členem Public Information Network – skupiny, která při European Fusion Development Agreement popularizuje řízenou fúzi v Evropě. Přednáší na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT Praha a Fakultě tělesné výchovy a sportu Univerzity Karlovy. Je nositelem státního vyznamenání Za statečnost. Třikrát získal ocenění České fyzikální společnosti „za dlouholetou popularizaci řízené termojaderné fúze“. Absolvoval více než dvacet IRONMANŮ (3,8 km plavání, 180 km na kole a 42 km běhu) po celém světě.



**RNDr. Jan Mlynář, Ph.D.** (1966) po absolutoriu Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze obhájil na téže fakultě disertační práci vyhotovenou v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR na tokamaku CASTOR. Pět let pracoval na švýcarském tokamaku TCV (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) a čtyři roky se v EFDA JET Culham Science Centre zabýval komunikací s veřejností u evropského tokamaku JET. V ÚFP AV ČR, v. v. i., se věnuje analýze experimentálních dat z tokamaků JET, TORE SUPRA a COMPASS. Přednáší na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT Praha. Jan Mlynář je dlouholetým členem komorního orchestru Akademie, kde hraje na příčnou flétnu.



**Mgr. Vladimír Weinzettl, Ph.D.** (1974) je člověk renesančního ducha, u něhož se spojuje láska k životu, k fyzice a k práci. Vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy v Praze, obor jaderná a subjaderná fyzika, a fyzikální inženýrství na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské Českého vysokého učení technického. Od roku 1995 se věnuje výzkumu v Oddělení tokamak v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR, v. v. i., kde se zabývá diagnostikou vysokoteplotního plazmatu se zaměřením na spektroskopii.



**Ing. František Žáček, CSc.** (1941) vystudoval Fakultu technické a jaderné fyziky (dnes Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská). Disertaci obhájil v Ústavu fyziky plazmatu ČSAV na téma „Interakce silného mikrovlnného signálu s plazmatem“. Posledních téměř dvacet let, až do svého pensionování, byl v ÚFP vedoucím Oddělení tokamak. Pobýval dlouhodobě na celé řadě zahraničních zařízení a v ústavech zabývajících se termojaderným výzkumem (Ústav atomové energie Moskva, JET Spojené království, TORE SUPRA Francie, RTP Holandsko, CHS Japonsko, EGYPTOR Egypt). Jeho specializací je mikrovlnná diagnostika a RF ohřev plazmatu. Je spolunositel Ceny kolegia fyziky ČSAV (1970), dvou Cen ČSAV (1973, 1992) a Prémie českého Literárního fondu za nejlepší knihu s fyzikální tematikou (1981).

# ŘÍZENÁ TERMOJADERNÁ FÚZE PRO KAŽDÉHO

Autoři: Milan Řípa, Jan Mlynář, Vladimír Weinzettl, František Žáček

Editor a odpovědný redaktor: Milan Řípa

Jazyková redaktorka: Irena Vítková

Fotografie a kresby: Ústav fyziky plazmatu AV ČR, ČTK

S laskavým svolením EFDA (EFDA Garching, EFDA-JET, CEA, Consorzio REX, CRPP, FZJ, Max-Planck IPP, FZK, UKAEA a dalších asociací EURATOM), ITER Organization, SNL; G. McCracken, P. Stott: Fusion – the Energy of the Universe

U příležitosti 50. výročí založení připravil Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i.,

Za Slovankou 3, 182 00 Praha 8

[www.ipp.cas.cz](http://www.ipp.cas.cz)

Grafická úprava: Tereza Pavelková (Studio Marvil)

Vytiskl: TA PRINT, s.r.o., Praha

Třetí, přepracované vydání

Praha 2011

ISBN 80-902724-7-9

