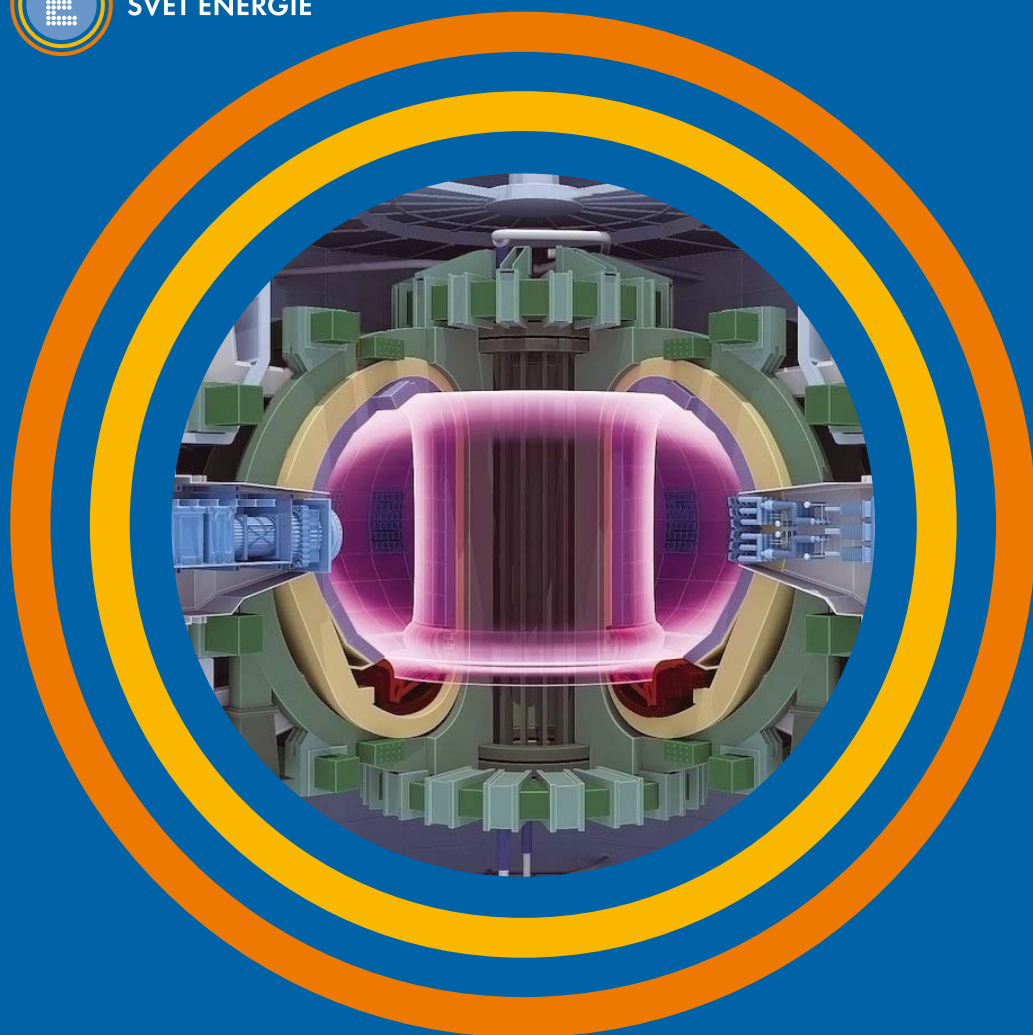


MILAN ŘÍPA  
EDITOR

# ŘÍZENÁ TERMOJADERNÁ FÚZE PRO KAŽDÉHO – 4U



SVĚT ENERGIE



MATERIÁLY PRO NOVÉ TISÍCILETÍ REGISTRAČNÍ ČÍSLO: CZ.1.07/2.3.00/35.009



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

# ŘÍZENÁ TERMOJADERNÁ FÚZE PRO KAŽDÉHO – 4U

MILAN ŘÍPA

JAN MLYNÁŘ

VLADIMÍR WEINZETTL

FRANTIŠEK ŽÁČEK

PETR KULHÁNEK

JIŘÍ MATĚJÍČEK

KAREL KOLÁČEK

MILAN ŘÍPA, EDITOR

MATERIÁLY PRO NOVÉ TISÍCILETÍ

REGISTRAČNÍ ČÍSLO: CZ.1.07/2.3.00/35.009

PROJEKT JE SPOLUFINANCOVÁN Z EVROPSKÉHO SOCIÁLNÍHO FONDU  
A STÁTNÍHO ROZPOČTU ČESKÉ REPUBLIKY.



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

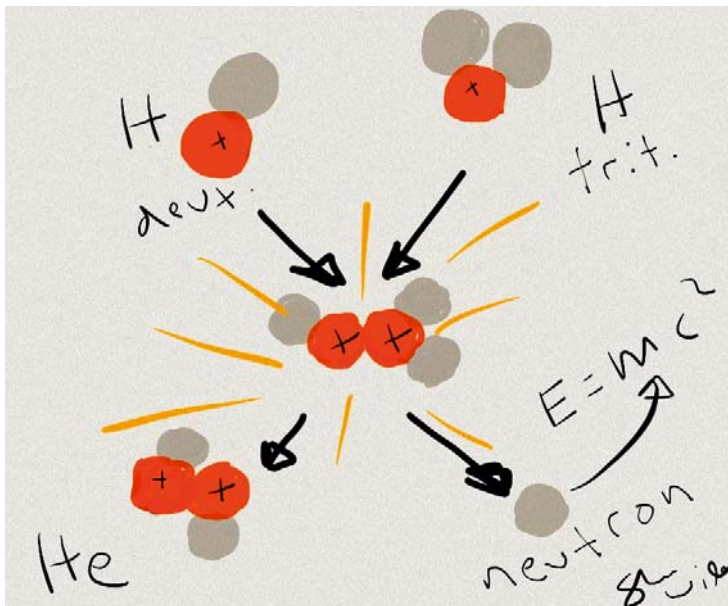
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

PUBLIKACE BYLA VYDÁNA U PŘÍLEŽITOSTI DOSAŽENÍ H-MODU NA TOKAMAKU COMPASS  
V ÚSTAVU FYZIKY PLAZMATU AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY, V.V.I. V ROCE 2012



Ach ty moje prostoduché poetické múzy!  
Nemaj ani páru o termojaderné fúzi!  
Kdyby se tak našel trpělivý, moudrý doktor věd,  
aby ty mé čupr holky učil chápat svět!

Jiří Žáček, 2013



## 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 očištcích 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

Poděkování je část knihy, kterou mám nejraději. Jednak signalizuje blížící se konec díla a jednak, kdo by rád nepoděkoval všem spolupracovníkům, kteří se zasloužili.

Na čtvrtém vydání se kromě osvědčené autorské čtveřice: Jana Mlynáře, Františka Žáčka, Vladimíra Weinzettla, a Milana Řípy podíleli zbrusu noví autoři: Petr Kulhánek, Jiří Matějčík, Ivan Havlíček a Jiří Žáček, když poslední dva se o fyziku zajímají skutečně okrajově. Ing. arch. Ivan Havlíček opatřil většinu kapitol kresbami a Ing. Jiří Žáček nám udělal radost milými verši. Zřejmě prvními v Česku týkajícími se termojaderné fúze.

Je milou povinností poděkovat profesoru Jiřímu Limpouchovi z Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT Praha, spoluautorovi kapitoly Magnetické a inerciální udržení a zejména RNDr. Karlu Koláčkovi, CSc, vedoucímu Oddělení impulsních plazmových systémů Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., který významnou měrou přispěl k aktualizaci poznatků o inerciálním udržení laserem generovaného plazmatu. Aktualizaci inerciálního udržení výbojem (Z-pinčem) nebo svazky částic generovaného plazmatu musíme z časových důvodů odložit do dalšího vydání.

Vynikající práci odvedl Michal Rouček z grafického studia Daniel.

Poděkování bezesporu patří i projektu Velké výzkumné infrastruktury Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy č. LM2011021 za finanční podporu.

Nesmírné díky patří řadě institucí vyjmenovaných v tiráži, které nám bezúplatně poskytly množství kvalitních fotografií.

Milan Řípa, editor, spoluautor  
V Praze, 2. května 2013

## OBSAH

Předmluvy	8
Minulost a budoucnost termojaderné fúze v datech – Milan Řípa	11
Přínos O. A. Lavrentěva k výzkumu termojaderné fúze – Milan Řípa	19
Proč právě termojaderná fúze? – Vladimír Weinzettl	22
Plazma a princip termojaderné fúze – Milan Řípa	26
Magnetické a inerciální udržení – Milan Řípa, Jiří Limpouch	29
Princip tokamaku – Vladimír Weinzettl	38
Trocha počítání hodně objasní – Jan Mlynář	45
Historie termojaderné fúze ve světě – Milan Řípa	53
Historie termojaderné fúze v České republice – František Žáček	67
Významná termojaderná zařízení – Milan Řípa, Jan Mlynář, Karel Koláček	71
ITER – Milan Řípa	114
Měření parametrů plazmatu tokamaku COMPASS – diagnostika – Vladimír Weinzettl	124
Termojaderné technologie – Milan Řípa	137
Fúzní materiály – Jiří Matějčec	143
Mezinárodní spolupráce České republiky v oblasti termojaderné fúze – Milan Řípa	153
Tokamaky a Vesmír – Petr Kulhánek	157
Budoucnost termojaderné fúze – Jan Mlynář	176
Doslov – Milan Řípa	180
Fúze na internetu – Vladimír Weinzettl	181
Výkladový slovník – Milan Řípa, František Žáček	184
Předpony pro vedlejší jednotky	219
Rejstřík	220
Literatura – Milan Řípa, Jan Mlynář	232
Resumé – Controlled Thermonuclear Fusion for Everybody	236
Autoři	237



# 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 knižky, kterou Ústav fyziky plazmatu AV ČR posílal zájemcům zdarma, rozebráno. Naštěstí se objevila nabídka Energetické společnosti ČEZ, a.s., vydat knižku 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 knižky 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? Věřme, 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 nezapomněli autoři a během pěti let nabyli nových zkušeností. Určitě všichni uvítali možnost třetího vydání nesmírně úspěšné knížečky. Třetí vydání doznalo oproti předchozím 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 nejúspěšnější 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

#### **Předmluva ke 4. vydání**

2004, 2005, 2011 a 2013 jsou roky od prvního do čtvrtého vydání, kdy postupně knížečka o 80 stránkách svůj obsah téměř ztrojnásobila. Zásahu na razantním zvětšení objemu knihy, kterou máte před sebou, mají čtyři nové kapitoly, které čtvrté vydání poslaly do suverénního vedení, co se týče změn jednotlivých „Fúzí pro každého“. Tokamaky a Vesmír profesora Petra Kulhánka, Fúzní materiály inženýra Jiřího Matějčíka a Trocha počítání doktora Jana Mlynáře zcela určitě zvýší úroveň již tak úspěšné knížky. Zcela zásadní je, ač částečná, aktualizace části týkající se inerciálního udržení doktorem Karlem Kolářkem.

4. vydání má rejstřík, který zcela určitě v předchozích publikacích chyběl. Knížka je obohacena o kresby architekta Ivana Havlíčka a úvodní verše inženýra Jiřího Žáčka.

Dovolte mi poznámku k Výkladovému slovníku. Přemýšleli jsme, jaký zvolit formát a nakonec jsme zvolili první heslo v češtině a pak anglický ekvivalent. Uznáváme, že formát není ideální, zejména proto, že většina hesel vzniká opačně – překladem anglického názvu do češtiny. Ovšem pro laika, kterému je knížka určena, je snad vybraný formát vhodnější než opačné pořadí. Pokud se jedná o zkratku, pak následuje český význam a konečně anglický zdroj zkratky.

Výjimečná je i kapitola Trocha počítání hodně objasní. Zde jsme rezignovali na jazykovou korektnost ve smyslu pravidla čísla a jednotky resp vzorec na jeden řádek. Pročtete si zajímavou kapitolu a hned uvidíte proč. Třeba jen proto, že vypravěčské schopnosti zkušeného vysokoškolského pedagoga doktora Mlynáře jsou obdivuhodné.

Škoda nesmírná, když harmonogram projektu Materiály pro nové tisíciletí, jehož péčí je kniha vydána, dostal přednost před nabídkou doktora Kolářka, jinak řečeno před nesmírně cennou aktualizací Svazků nabitých částic. V žádném z předchozích vydání k podobné kolizi nedošlo a všechna vydání byla dána do tisku v okamžiku, když byla definitivně hotova.

Nu, třeba chybu napraví páté vydání.

Poněkud kuriózní je také náklad 100 kusů. První vydání v nákladu 1000 kusů a druhé vydání rovněž v nákladu 1000 kusů byla během roku rozebrána a z třetího vydání 2000 kusů zbývá 700 publikací.

Čtvrté vydání „Řízené termojaderné fúze pro každého“ věnují autoři týmu tokamaku COMPASS, kterému se podařilo v listopadu 2012 dosáhnout režimu vysokého udržení, tak zvaného „H-módu“.

Autoři

# 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. BUCHARIN** 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 <sup>235</sup>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

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

- 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, Marschalovy ostrovy, 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).
- 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.“.

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

- 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 vř 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 otevřených 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 pětunovou 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.
- 1973 Silové působení vln na plazma – základní, dodnes citovaná, teoretická práce (Richard Klíma, Václav Petržílka).
- 1973 **R. KLÍMA, V. PETRŽÍLKA**: Silové působení vln na plazma – základní, dodnes citovaná, teoretická práce .
- 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 amerického tokamaku v Princeton Plasma Physics Laboratory.
- 1976 **INTERMEZZO** – Experimentální toroidální zařízení v ÚFP AV ČR - potvrzení **KLÍMOVY A PETRŽÍLKOVY** teorie.
- 1977 **INTOR** (**I**nternational **T**okamak **R**eactor) – **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

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 směruje imploze do centra.

- 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 (Princeton Large Torus, 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 Nepřímo 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 (International Thermonuclear Experimental Reactor)** – 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** – iner-

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



- ciální fúze pomocí rentgenového záření podzemního jaderného výbuchu.
- 1988 **T-15** – sovětský supravodivý tokamak zkompletován.
- 1988 **TORE SUPRA** – první plazma částečně supravodivého francouzského tokamaku.
- 1988 **ITER a Československo** – Delegace Československé komise pro atomovou energii projednala v Ústavu atomové energie I. V. Kurčatova účast ČSSR na projektu ITER pomosí SSSR.
- 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**).
- 1989 **ITER a Československo** - Rada ITER schválila účast Československa na projektu ITER prostřednictvím SSSR. ČSSR bude studovat slitinu PbLi pro obal a ohřev plazmatu resp. buzení proudy dolně hybridními vf. vlnami.
- 1990 **ITER** – Ústav fyziky plazmatu se zapojuje do projektu v rámci **EURATOM**.
- 1990 - **P. PAVLO, L. KRLÍN, R. KLÍMA**: Studie v rámci projektu (EURATOM) termojaderného experimentálního reaktoru ITER.
- 1991 **JET** (Evropská unie) – první na světě používá směs 89 % **D** – 11 % **T** a produkuje termojaderný výkon 2 MW po dobu 0,2 s.
- 1994 **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)**“ – sub-pikosekundový<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. (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

<sup>8</sup> Menší než pikosekunda – viz Výkladový slovník.

<sup>9</sup>  $Q$  = termojaderný výkon/příkon plazmatu D-T.

- v deuteriu rekordního ekvivalentního zesilovacího faktoru<sup>10</sup>  $Q = 1,25$ .
- 1998 USA opouští projekt **ITER**.
- 1998 **FUSION EXPO** – u příležitosti 25th European Physical Science Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics se v Praze v prostorách Skupiny ČEZ poprvé zastavila putovní výstava Evropské komise.
- 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
- 2000 100 tokamaků v provozu.
- 2000 Stelarátor Wendelstein **W7-X** (Ústav fyziky plazmatu Maxe Plancka, Greifswald, Německo) – zahájení stavby.
- 2000 **Prague Asterix Laser System (PALS)** - oficiální spuštění laserového systému v Badatelském centru PALS – společném pracovišti ÚFP AV ČR a FZÚ AV ČR.
- 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

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

- 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.
- 2007 **FUSION EXPO** – putovní výstava Evropské komise (Euratom) v prostorách Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.
- 2009 Tokamak **COMPASS** z Culham Science Centre slavnostně spuštěn v ÚFP AV ČR.
- 2009 **FUSION EXPO** – u příležitosti konání Research Connection se mini verze putovní výstavy Evropské komise objevila podruhé v Praze tentokrát v Kongresovém centru.
- 2010 Laser **NIF** – plný počet 192 svazků vystřelil s energií 1 MJ do terčíku.
- 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.
- 2012 Tokamak **COMPASS** dosáhl režimu vysokého udržení plazmatu, tak zvaného H-módu.
- 2019 **ITER** – předpokládané první plazma.
- 2014 **DEMO** – předpokládané zahájení práce na projektu.
- 2026 **ITER** – předpokládané zahájení experimentů se směsí deuterium a tritium.
- 2030 **DEMO** – předpokládané zahájení stavby.
- 2040 **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 Lavrentěvovi? 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 knížečky 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).

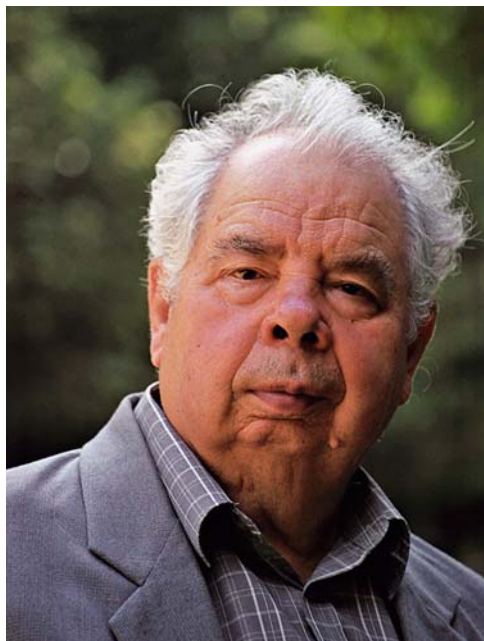
Projev prezidenta Harry S. Trumana v lednu 1950 před americkým kongresem, v němž

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 potížisty 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 jednoštěrbinová

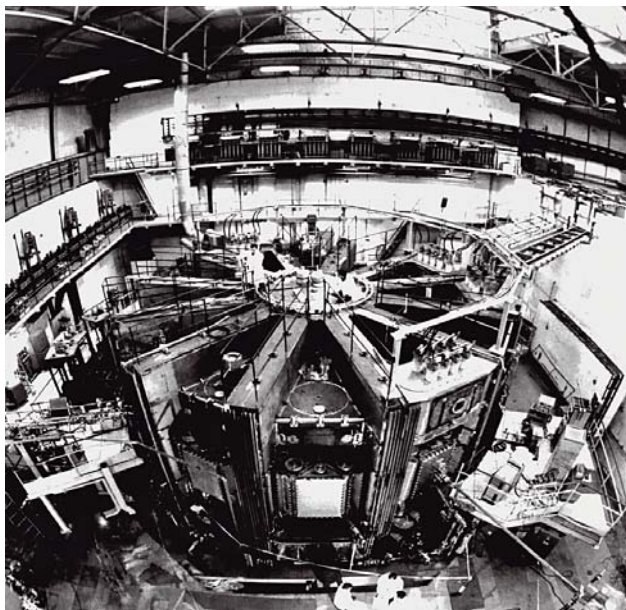


Oleg Alexandrovič Lavrentěv

vá a později mnohaštěrbinová 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 pomyslení 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.

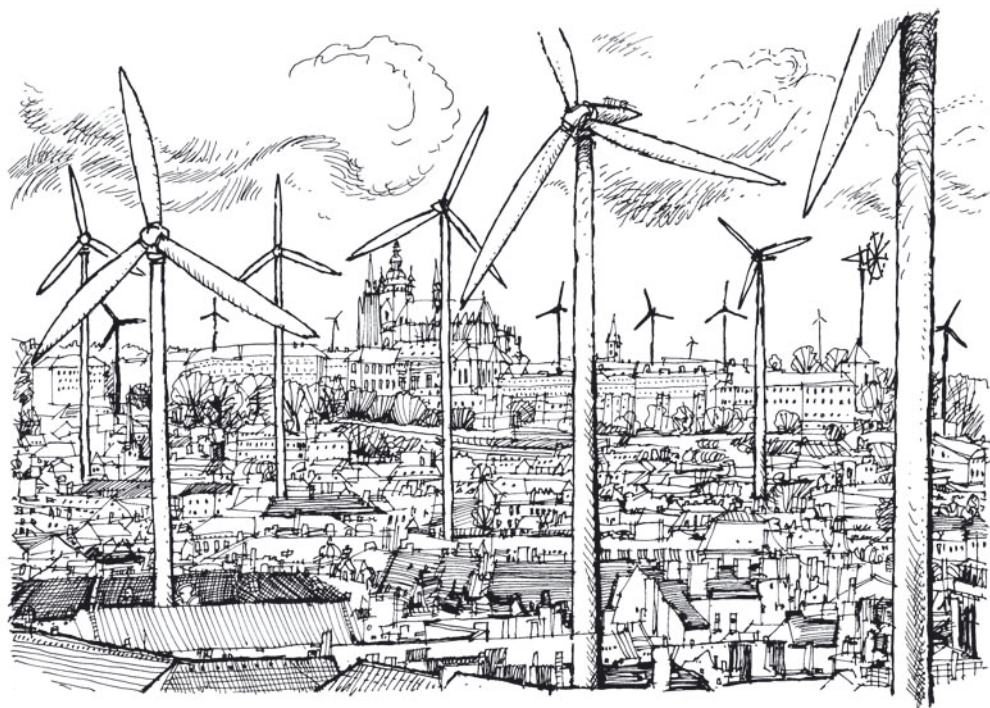
Lavrentěvovi bylo v roce 2011 osmdesát pět let. Mezi podpisy nekrologu figurují jména Thomase J. Dolana z Illinoiské univerzity

a Dmitrije Rjotova 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  $200 \text{ W/m}^2$ ) 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 nejruznější úspěšná 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  $^{235}\text{U}$  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 nestejně rozložených 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 kyselých dešťů i velké množství oxidu uhličitého





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

prispívajícího 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 na elektrárnen založených na obnovitelných zdrojích je ekologicky značně nešetrná (použití velmi těžko dosažitelných materiálů pro solární panely a vysoká energetická náročnost jejich výroby, hlučnost 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)

<sup>11</sup> 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

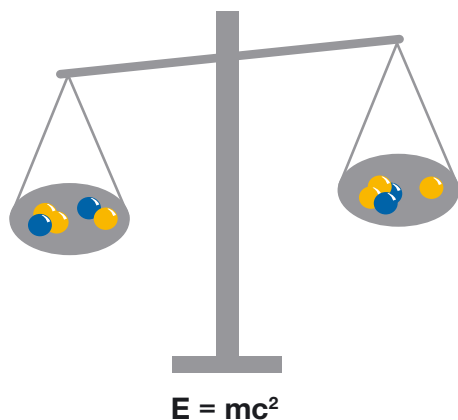
jaderných elektráren). Vedle neutronu je dalším produktem fúzních reakcí jádro helia, které není radioaktivní. Helium je vzácný plyn, nepodílí se na skleníkovém efektu a z vyšších vrstev atmosféry Země je unášeno tzv. slunečním větrem do mezihvězdného prostoru. Helium rovněž vyvěrá z hlubin Země jako 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

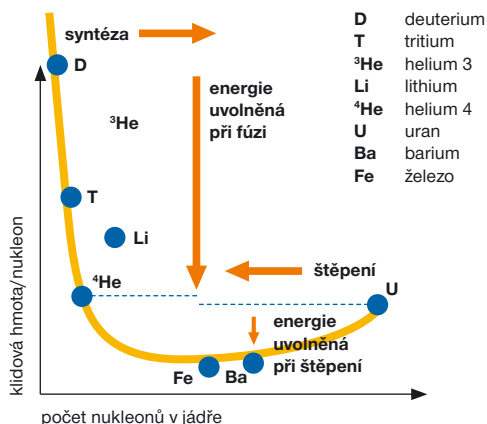
Elektrárny spalující fosilní paliva, vodní, větrné a sluneční elektrárny – ty všechny využívají energii, kterou na Zemi vyzářilo Slunce. Budoucím termojaderným elektrárnám Slunce slouží pouze jako vzor, jako inspirace. Termojaderné elektrárny budou, podobně jako štěpné atomové elektrárny, využívat energii 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

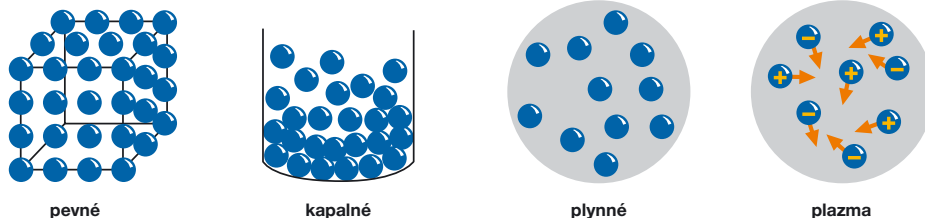
12 Nukleon – společný název pro proton a neutron – je částice tvořící jádro atomu.



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 slučování!



Skupenství hmoty: plazma je čtvrtým skupenstvím hmoty.

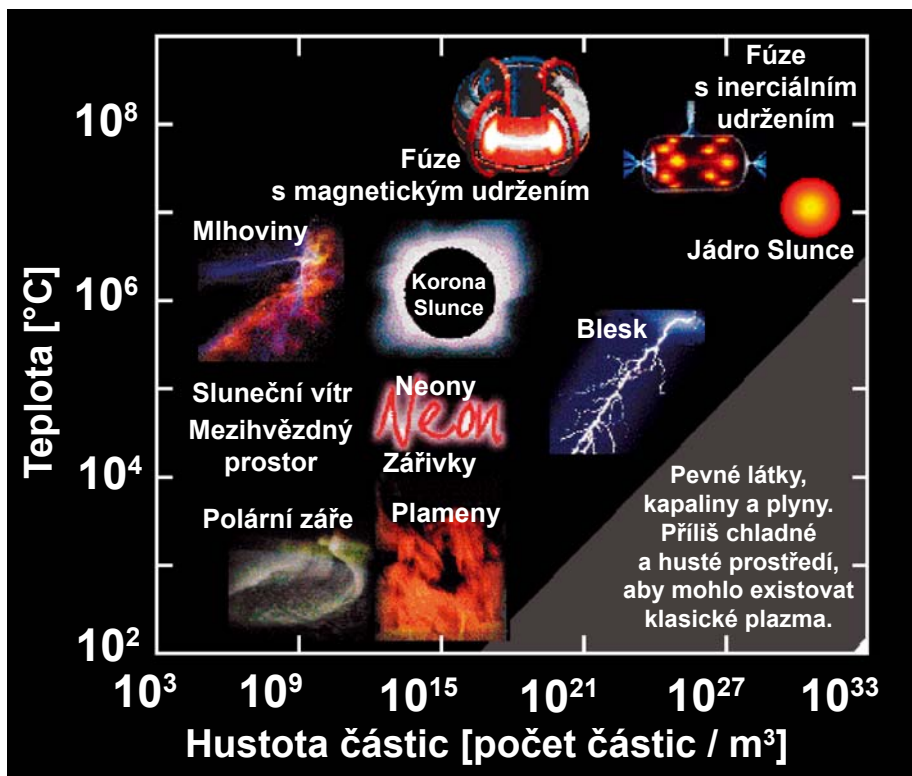
a pohybu produktů reakce ( $c$  je rychlost světla ve vakuu). Záření a kinetická energie je právě onou uvolněnou jadernou energií. Z obrázku je zřejmé, že slučování lehkých jader je mnohem účinnější než štěpení jader těžkých.

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:

**$D + T \rightarrow {}^4\text{He}$  (3,5 MeV, 20 % celkové uvolněné energie) +  $n$  (14,1 MeV, 80 %).**

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 různé 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



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.

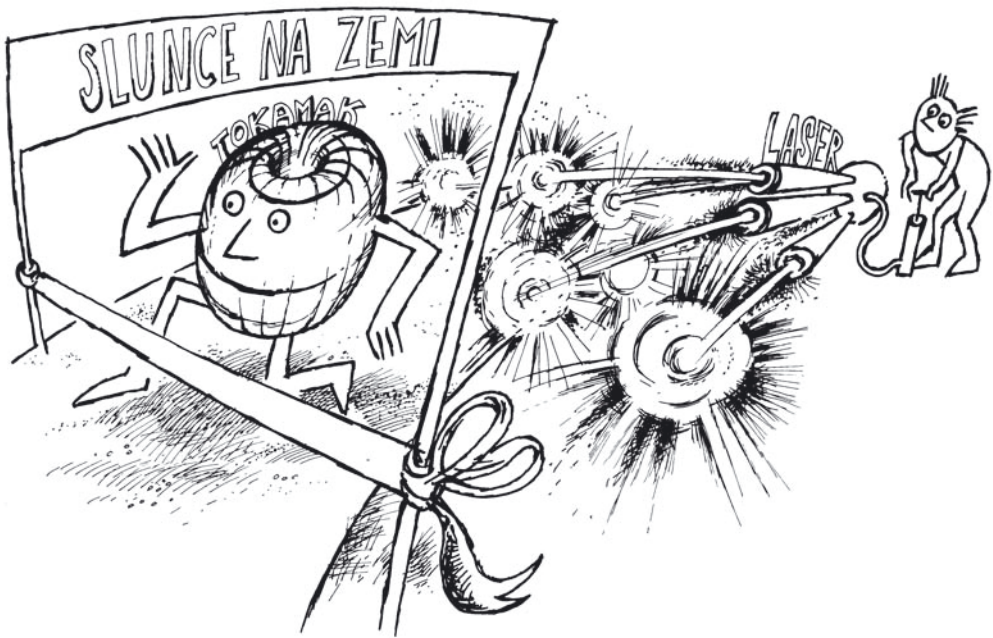
Elektricky neutrální částice změni směr a velikost své rychlosti teprve při srážce s jinou částicí. Elektricky nabitá částice v elektrickém poli je urychlována ve směru nebo proti směru elektrických siločar. Kladný iont je urychlován od anody ke katodě a elektron od katody k anodě. V magnetickém poli bez působení vnějších sil se nabitá částice pohybuje podél magnetických siločar volně – magnetické pole „nevímá“. 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

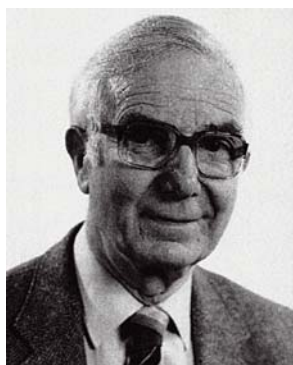


Podmínkou, aby termojaderná reakce vyprodukovala více energie, než je třeba k vytvoření plazmatu a jeho ohřevu, náhradě ztrát zářením a únikem částic z plazmatu, jsou určité požadavky na hustotu plazmatu  $n$  a teplotu plazmatu  $T$ , respektive na dobu udržení jeho energie  $t_E$ . Za předpokladu, 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  $T \approx 2 \times 10^8$  °C platí:

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

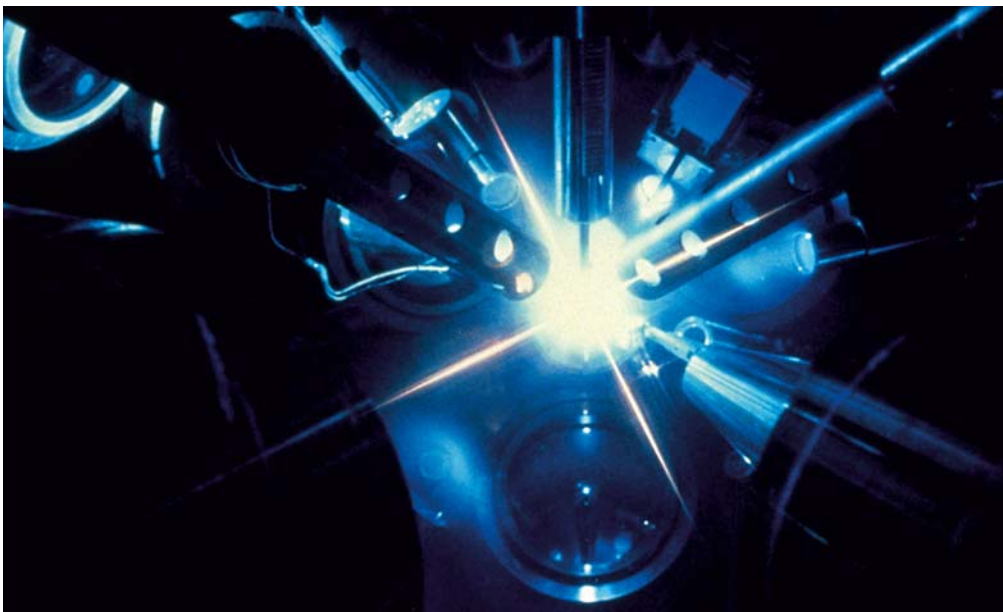
Zajímavé je, že kritérium publikoval Lawson (v časopise) až v roce 1957, kdy byl výzkum termojaderné fúze v USA odtajněn. Zajímavé proto, že nezávisle na něm o kritériu pro D-D reakci hovořil L. A. Arcimovič na Symposiu o elektromagnetických jevech v kosmické fyzice (Symposium on Electromagnetic Phenomena 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 dříve, 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 čili 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  $200 \text{ g cm}^{-3}$ , 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

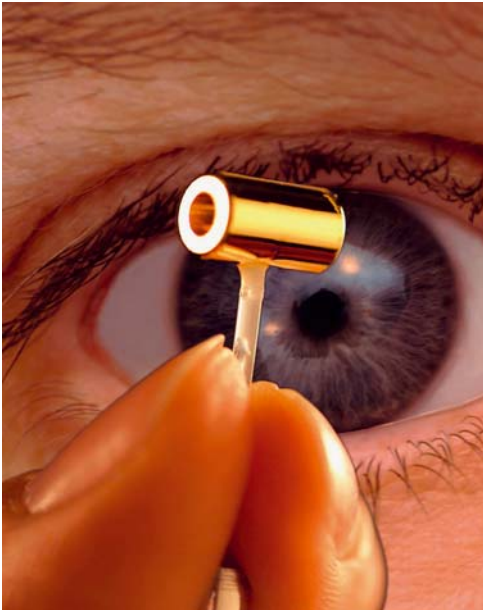
části. Přesáhne-li tato teplota zápalnou teplotu, palivo se vznítí a vlna termojaderného hoření se šíří do zbytku paliva.

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  $200 \text{ g cm}^{-3}$ , 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

14 Vírového (chaotického).





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

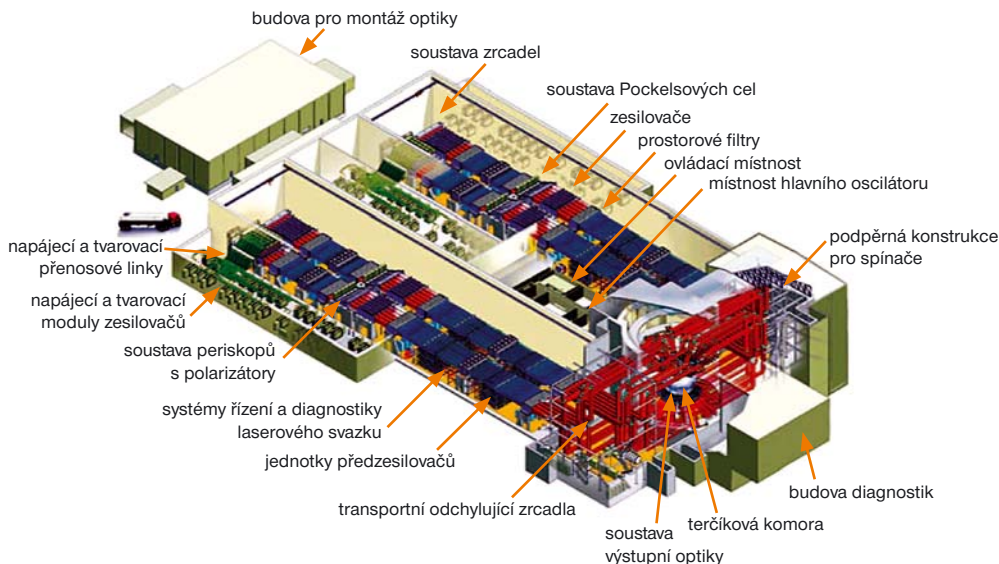
**Inerciální udržení – světelné svazky laseru míří na terčík termojaderného paliva (protější strana).**

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 sestavení 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 předehejí palivo

a zabrání 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  $10^{15} \text{ W/cm}^2$ . 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  $3\times$  větší (vlnová délka  $3\times$  menší) než základní.



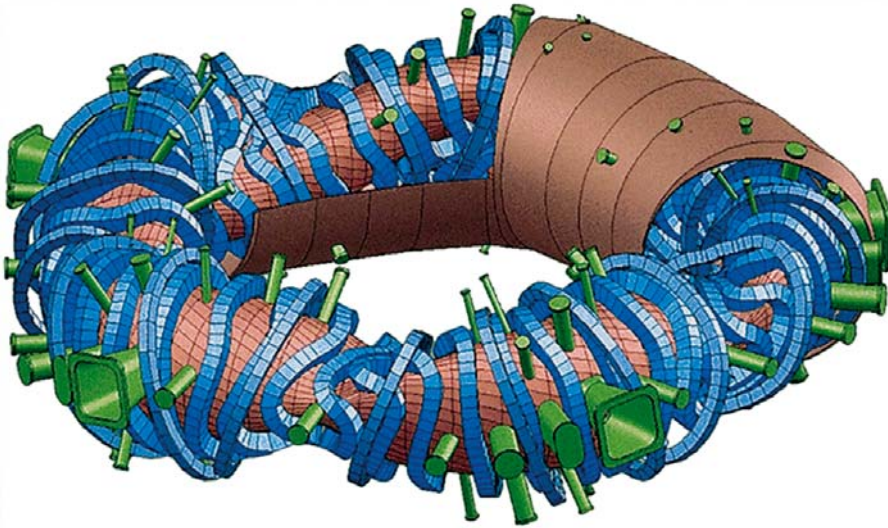
**Schéma Národního zapalovacího zařízení (NIF), které je v Lawrenceově livermorské národní laboratoři a bylo dokončeno v roce 2010. Budova obsahuje lasery a veškerá podpůrná zařízení nutná k tomu, aby zařízení dodávalo laserové pulzy o energii 1,8 milionu joulů (MJ) a špičkový výkon 500 bilionů wattů, tj. milion milionů (TW), na terčích pro inerciální fúzi umístěných 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 nepřímou 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 odborná 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 ten přelomový, se zapálením, byl očekáván 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 neodymových 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 nepřímou 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 – stelarátor – zaznamenal v poslední době úspěch.  
Komora projektovaného největšího stelarátoru na světě – Wendelstein W7-X.

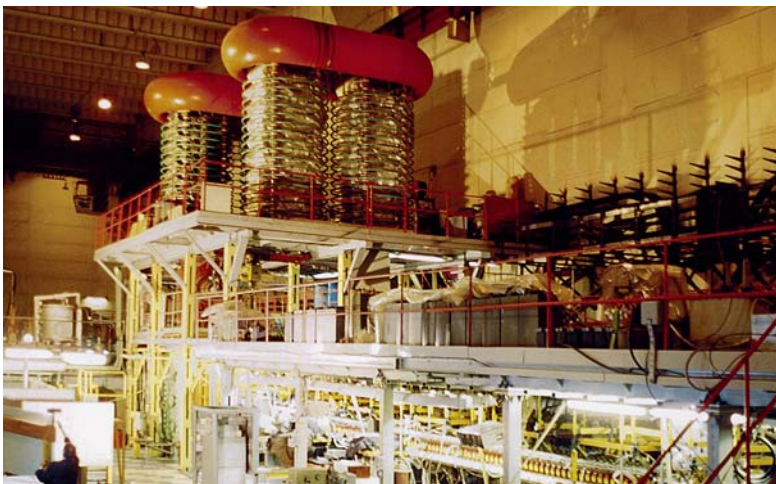
mocností jak v mírových, tak ve vojenských aplikacích. Po dokončení bude LMJ bezkonkurenčně největším evropským laserovým systémem, s 240 trasami neodýmových laserů a s celkovou energií v laserovém pulzu 1,8 MJ, tedy stejně jako NIF. Obě střediska, NIF a LMJ, při svém výzkumu také poměrně úzce spolupracují. Celý systém LMJ má být uveden do provozu nejdříve v roce 2014.

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 (**H**igh **P**ower **E**nergy **R**esearch 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 v 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 (**E**xtrême **L**ight **I**nfrastucture), 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) nejružnější 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 pikosekund 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 nezbuzují. 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

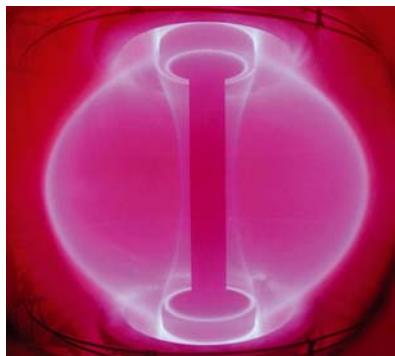
investovat více než miliardu dolarů. Výstavba takového zařízení se odkládá do okamžiku, kdy bude inerciální fúze demonstrována pomocí laserů.

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-

17 Rovnice udávající závislost vnitřních parametrů systému na teplotě a vnějších parametrech ve stavu termodynamické rovnováhy.



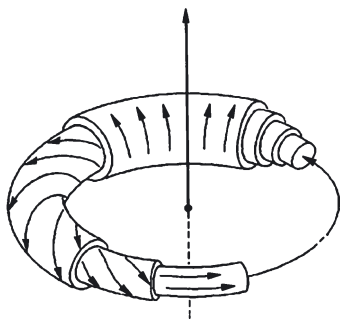
Vývoj v kulovém tokamaku START  
(Spojené království).



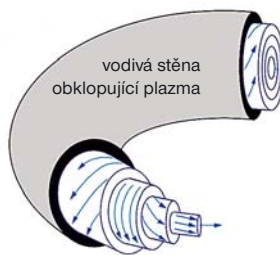
ticových svazků vhodných pro různé aplikace v biologickém a materiálovém výzkumu. Lze si představit i situaci, kdy bude inerciální fúze využita pro vývoj konstrukčních materiálů pro fúzní reaktor s magnetickým udržením, a to z hlediska jejich odolnosti vůči velkým neutronovým tokům. Vynakládání prostředků 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 opíše 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. Vymýšlela 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 rozložil. Na rozdíl od otevřených



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



**Střížné pole v pinči s reverzním magnetickým polem.**

nádob siločáry magnetického pole v uzavřených magnetických nádobách neopouštějí 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 závitě 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  $100\times$  slabšího magnetického pole proudu tekoucího v plazmatu, střížné pole stelarátorů je tvořeno pouze vnějšími cívkami. Požadovaná konfigurace cívek stelarátoru může vést ke zvláštnímu tvaru komory (např. ve tvaru osmičky) nebo samotných cívek. Vzhledem k tomu, že proud v plazmatu tokamaku se budí induktivně (tokamak není nic jiného než

transformátor s jediným závitěm, 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**roidálnaja **KA**mera i **MA**gnitnyje **Ka**tuški – 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 silokřivky tohoto pole – pohybují se po

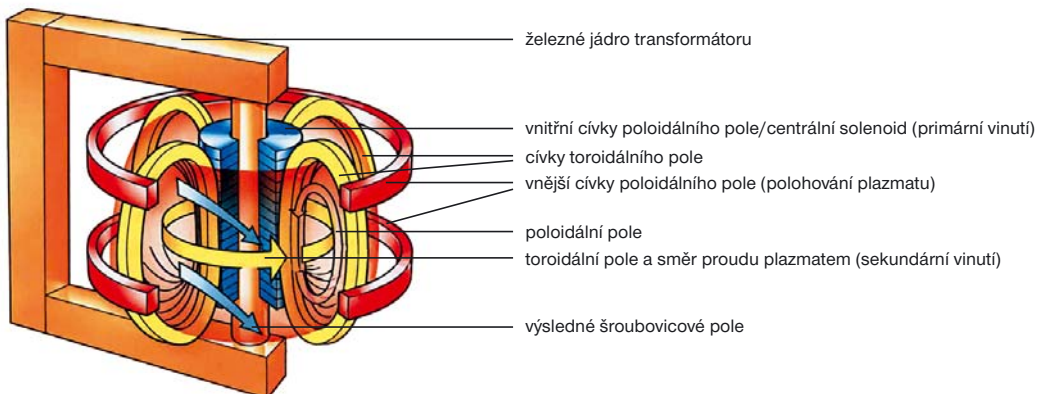
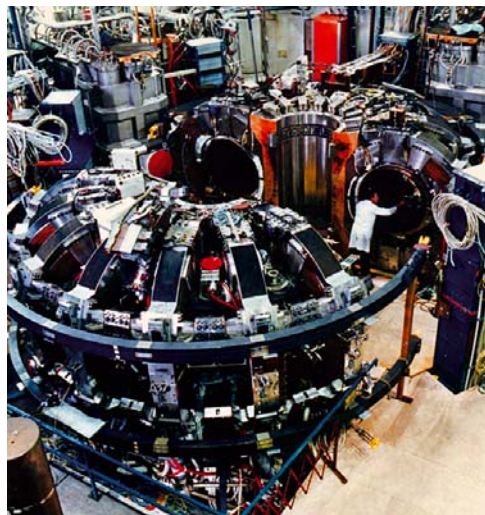


Schéma tokamaku.



Německý tokamak TEXTOR v Jülichu slouží ke studiu vzájemného působení plazmatu a stěny 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 cívkami (slitiny NbTi nebo Nb<sub>3</sub>Sn při teplotě 4,5 K = -268,6 °C), jejichž spotřeba elektrické energie je zanedbatelná.

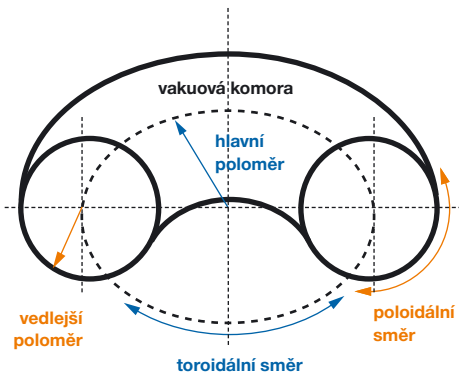
Termojaderných teplot řádu stovek milionů stupňů potřebných k tomu, aby se jádra vodíku začala slučovat na helium za uvolnění velkého množství energie, se musí dosáhnout bezkontaktním ohřevem. Veškeré látky jsou totiž již při teplotách okolo deseti tisíc stupňů plynné. Tokamaky využívají princip transformátoru, kde komora s plynem tvoří jediný závit jeho sekundárního vinutí. Vybitím kondenzátorové baterie (jen u malých přístrojů, velké používají setrvačnickou 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 vstřík neutrálních atomů vodíku s energií rovnou až stonásobku teploty plazmatu, které svoji energii předají 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 vstříkované částice v předchozím případě. A právě ve fúzních elektrárnách se vyjma krátkého okamžiku před

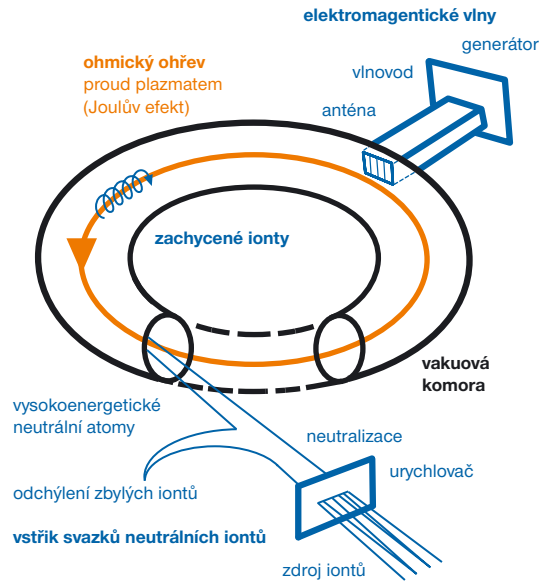
<sup>18</sup> Frekvence rotace nabitě částice kolem siločáry magnetického pole – viz Výkladový slovník.

<sup>19</sup> Kombinace dvou charakteristických frekvencí plazmatu – viz Výkladový slovník.



Dva význačné směry v komoře tokamaku: toroidální a poloidální.

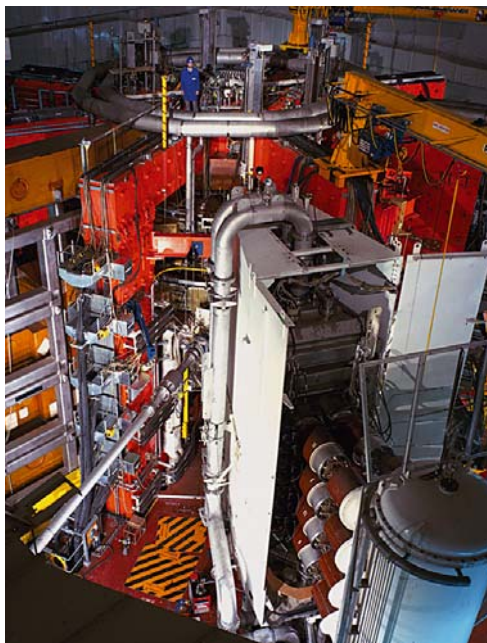
zapálením fúzních reakcí vystačí pouze se samoohřevem<sup>20</sup>. Stejně jako když zapalujeme táborový oheň. Nejprve škrtneme sirkou a později již dřevo hoří „samo“. Zapálení termojaderné reakce tedy bude okamžik srovnatelný s činem bájného Prométhea. Musíme jen věřit, že lidstvo nestihne hněv bohů, 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 ( $Q > 10$ ).



Tři metody vnějšího ohřevu plazmatu v tokamaku: základní ohmický a dodatečný s vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem, respektive se vstříkem svazků vysokoenergetických neutrálních atomů. V reaktoru bude plazma ohříváno  $\alpha$ -částicemi – produkty fúzní reakce.

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 unikát na stěny komory odnášejíce 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,

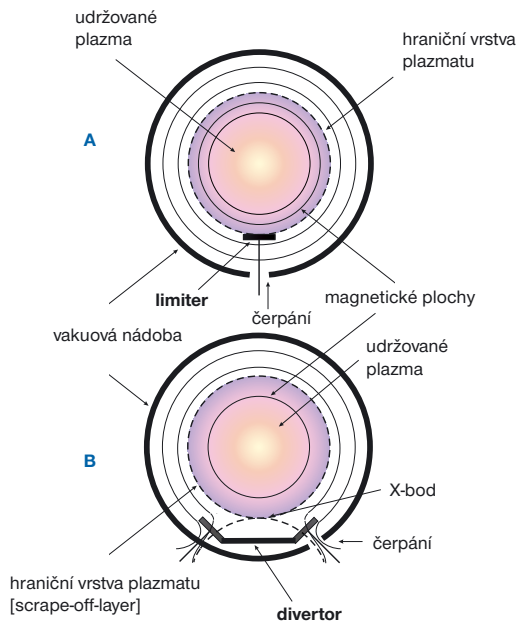
20 Pro budoucí elektrárny se předpokládá určitý vnější ohřev jako prostředek zvyšující flexibilitu (řízení uvolňovaného výkonu).



**Tokamak JET, vpředu zdroj neutrálních svazků pro ohřev plazmatu.**

o tzv. neinduktivní generaci (vlečení) proudu. Směřované vysokofrekvenční elektromagnetické vlnění (dolní hybridní frekvence 1–10 GHz) vpouštěné 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



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

blíživáním se k termojaderným teplotám a při zvyšování síly magnetického pole bylo nutné modifikovat komoru (mírně vertikální protažení průřezu komory do tvaru písmene D) a vytvořit tzv. divertor (modifikaci základního toroidálního udržovacího magnetického pole odchylovací 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

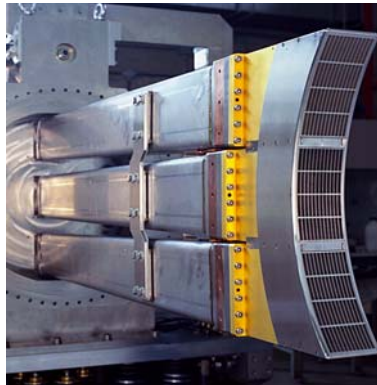
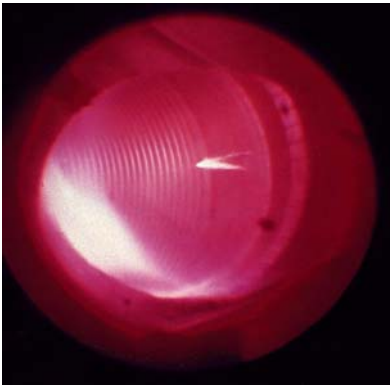
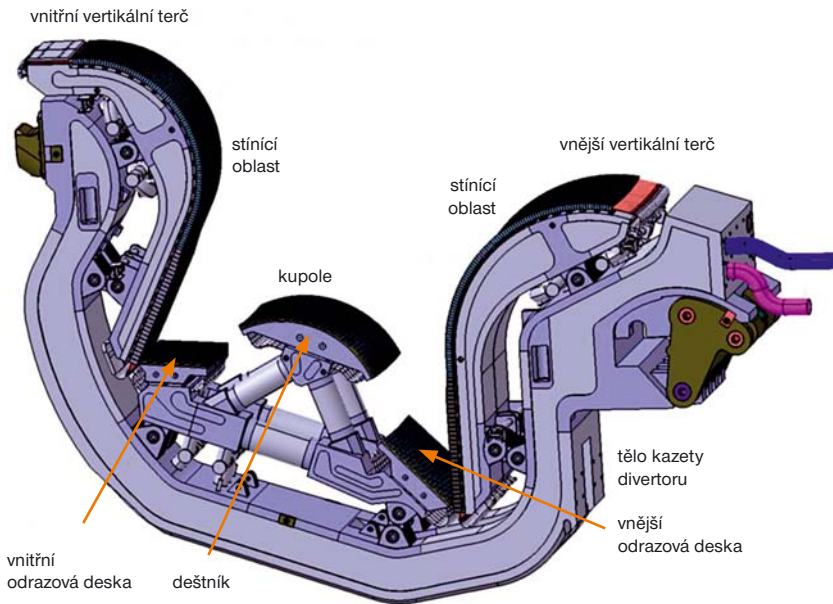


Schéma jedné z 54 kazet diverтору ITER. nahoře

Takto se doplňuje palivo do tokamaku. Zářící „kometa“ je zmražený 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 MW/m<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 rekordního 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  $1 \text{ km s}^{-1}$ ) 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 nejdůležitějších 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 vyhlídky, tokamaky se nejspíš stanou prvními fúzními elektrárnami a energetický problém lidstva by tak mohl být na tisíce generací vyřešen.

# TROCHA POČÍTÁNÍ HODNĚ OBJASNÍ





Arthur S. Eddington.

V naší knížce se počítání bát nemusíte. Snažíme se, aby byla opravdu pro každého – i pro ty, kteří počítat vůbec nechtějí. Jinými slovy, nijak zvlášť nevadí, pokud tuto kapitolu prostě přeskočíte, neobsahuje nic, bez čeho by se nedaly číst kapitoly další. Kdo ale z čísel nemá panický strach, tak tomu doporučujeme, aby si i tuto část alespoň zkusil projít. Málo platné, v životě obecně a ve fyzice zvláště platí, že když se něco spočítá, tak to vydá za mnoho slov. Následující příklady přitom nebudou nijak zvlášť složité.

Nejprve si povíme (vlastně spíš spočítáme), jakým způsobem vynikající britský astrofy-

zik Arthur S. Eddington v roce 1920 poprvé správně „uhodl“, že termojaderná fúze vodíku na hélium představuje základní mechanismus uvolňování energie ve Slunci a prakticky i ve všech ostatních hvězdách. Vyřešil tím velkou záhadu své doby – dřívější hypotézy o zdroji energie Slunce, jako třeba chemické hoření nebo gravitační smršťování, vycházely fyzikům velmi špatně. S nimi by Země nemohla ani zdaleka existovat po dobu několika miliard let, a právě tento věk lze odhadnout z jejího geologického vývoje. Arthur S. Eddington dobře znal Einsteinovu teorii relativity, a jako jeden z prvních fyziků ji i zcela pochopil, včetně vztahu ekvivalence hmotnosti a energie  $E = \Delta m \times c^2$ , který pochází z roku 1905. Když pak Francis W. Aston naměřil překvapivě o trochu nižší hmotnost atomu hélia oproti čtyřem atomům vodíku (za sérii těchto přesných a klíčových měření získal Nobelovu cenu za chemii v roce 1922), zveřejnil Eddington obratem svoji hypotézu, že v nitru hvězd dochází za velmi vysokých teplot ke slučování (fúzi, syntéze) vodíku na hélium. Rozdíl vstupující hmotnosti čtyř vodíků a vystupující hmotnosti hélia je pak uvolňován ve formě zářivé energie „... a není třeba dále hledat zdroj energie hvězd“, jak je doslova řečeno v Eddingtonově přednášce pro Královskou společnost, datované 1920. Není těžké odhadnout, že tato myšlenka je přinejmenším velmi nadějná. Z moderních měření víme, že hmotnost atomu vodíku je  $m_{\text{H}} = 1,007825 m_{\text{u}}$  a hmotnost atomu hélia  $m_{\text{He}} = 4,0026 m_{\text{u}}$ , kde atomová hmotnostní konstanta  $m_{\text{u}} = 1,66054 \cdot 10^{-27}$  kg (připomeňme, že





stranu je vidět, že přesná kopie malého Slunce by nám na Zemi k užítku nebyla, i kdybychom ji nějakým zázrakem dokázali postavit. Hvězdné reaktory nás tedy mohou pouze inspirovat, pozemský fúzní reaktor musíme vymyslet trochu jinak.

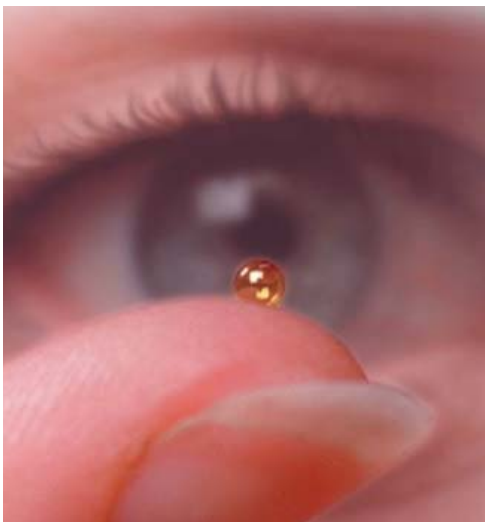
Příčinou tak nízkého měrného výkonu Slunce je skutečnost, že při srážce dvou protonů (tj. jader vodíku) dojde ke sloučení na deuterium (jádro těžkého vodíku, tvořené protonem a neutronem) jen opravdu výjimečně, s neuvěřitelně nízkou pravděpodobností. Lze říci, že vodíková jádra mezi sebou reagují velmi neochotně. Při naší snaze postavit fúzní reaktor na Zemi se proto musíme poohlédnout po jádrech, která spolu naopak reagují velmi ochotně. Mezi možnými kandidáty má zdaleka největší pravděpodobnost reakce fúze deuteria (těžkého vodíku, s jedním neutronem v jádře) a tritia (supertěžkého vodíku, se dvěma neutrony v jádře), o které se v této knížce proto mluví nejvíce. Pravděpodobnost fúzní reakce, „ochota reagovat“, je v případě deuteria a tritia při srovnatelných podmínkách asi o 25 řádů (to je o miliardu miliard miliónů) větší než v případě dvou protonů! Kdyby byla palivem v nitru Slunce místo obyčejného vodíku směs deuteria a tritia, žilo by Slunce místo deseti miliard let jen zlomek sekundy. Jinými slovy, okamžitě by explodovalo.

Z hlediska konstrukce pozemského fúzního reaktoru není myšlenka explozivního hoření fúzních reakcí zase tak úplně marná. Stačilo by použít dostatečně malé množství paliva tak, aby byla jeho exploze z hlediska technického zvládnutí bezpečná a následně i užitečná. Nakonec

i spalovací motory našich dnešních automobilů naprosto běžně zvládají opakované explozivní hoření velmi malého množství paliva – benzínu nebo nafty. Zkusme si proto spočítat, jaké množství deuteria a tritia lze při dosažení termonukleárních podmínek považovat za bezpečně zvládnutelné.

Strojní inženýři uvádějí, že technicky lze zvládnout a využívat opakované exploze, při kterých se uvolňuje tepelná energie menší než jeden gigajoule (1 GJ = jedna miliarda joule). Na internetu nebo v tabulkách lze snadno najít, že takové množství energie odpovídá explozi několika set kilogramů TNT (trinitrotoluenu), což je jakýsi standard pro vydatnost běžných (chemických) explozivních procesů. Reaktor pro využívání explozivní energie fúze by pak vypadal jako velká ocelová koule, s průměrem asi 10 m, energii uvolňovanou opakovanými výbuchy uvnitř by bylo možné odvádět ve formě tepla jednoduše tím, že by se povrch koule chladil, a to třeba vodou. Protože jednotka výkonu watt je totéž jako joule za sekundu, je vidět, že pokud budeme od reaktoru očekávat tepelný výkon například 1 GW (ze kterého se dá vyrábět 300 – 400 MW elektrického výkonu, což je typický výstup klasické uhelné elektrárny), musí v reaktoru probíhat exploze častěji než jednou za sekundu.

Předpokládejme nyní odhadem, že na Zemi zapálíme explodující „hvězdu“ z deuteria a tritia tak, aby se uvolnilo 0.5 GJ energie. Pro jistotu (aby určitě exploze nebyla moc silná) budeme počítat s tím, že se během okamžiku výbuchu spotřebuje všechno palivo. Jak lze snadno



**Skutečná velikost terčíku pro inerciální fúzi. S laskavým svolením LLNL.**

najít, nebo znovu odvodit z rozdílu hmotností reaktantů a produktů, z jedné fúzní reakce deuteria a tritia se uvolní 17,6 MeV energie, a pro vztah elektronvoltů a joulů platí  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . K získání  $0,5 \text{ GJ} = 5 \cdot 10^8 \text{ J}$  energie proto potřebujeme  $5 \cdot 10^8 \text{ J} / (17,6 \cdot 10^6 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}) = 1,8 \cdot 10^{20}$  fúzních reakcí, čili stejné množství atomů deuteria a také tritia. Z hmotností těchto atomů  $m_T = 5,01 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  a  $m_D = 3,04 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  lze pak hned spočítat, že k uvolnění  $0,5 \text{ GJ}$  energie stačí  $(5,01 \cdot 10^{-27} + 3,04 \cdot 10^{-27}) \text{ kg} \cdot 1,8 \cdot 10^{20} = 1,44 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$ , tj. zhruba jeden a půl miligramu paliva!!

Na tomto výsledku je opravdu dobře vidět, k jakému zdroji energie se snažíme otevřít dveře: několik set kilogramů paliva pro uvolnění určité energie chemickými procesy jsme nahradili pouhými miligramy paliva pro procesy termojaderné! Jinými slovy, namáhavou a ekologicky velmi zatěžující těžbu a transport milionů tun fosilních paliv může v budoucnosti nahradit několik kilogramů fúzních paliv, místo milionů tun exhalací vyprodukuje několik kilogramů hélia. Co je pro to potřeba udělat? Obrazně řečeno, místo sbíječků a lopat musíme vzít do ruky rozum. Jen je opravdu těžké předem slibovat, že něco vymyslíme. Hned následující odhad napoví, že se snažíme vyřešit úkol, který není vůbec jednoduchý.

Aby došlo k požadovanému zapálení „pozemské hvězdy“, je potřeba fúzní palivo zahřát a stlačit tak, aby byly dosaženy fyzikální podmínky, za kterých začnou spontánně probíhat fúzní reakce. Jde mimo jiné o teplotu kolem 100 miliónů stupňů Celsia. Problém je, že miligram látky představuje opravdu malé těleso, malinký terčík, na který potřebujeme zacílit poměrně velké množství energie požadované k jeho stlačení a ohřevu. Jde o energii zhruba milión joule (MJ), ale tu je nutné palivu dodat během několika desítek nanosekund (miliardtin sekundy), totiž rychleji, než se terčík v důsledku své vysoké teploty rozletí. Výkon takového ohřevu je impozantní - milión joule děleno deset miliardtin sekundy se rovná sto biliónů wattů, čili sto terawattů – to je téměř desetkrát více, než jaký je průměrný výkon uvolňovaný všemi energetickými zdroji naší civilizace. Zní to neuvěřitelně, ale takové experimenty skutečně probíhají – říká se jim fúze s inerciálním udržením, nebo zkráceně inerciální fúze.

Jestliže má palivo z těžkého vodíku v pevné fázi hustotu přibližně  $250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , pak 1 mg paliva zabírá objem  $10^{-6} \text{ kg} / 250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$ , čili  $4 \text{ mm}^3$ . Takové množství paliva se podle vzorečku pro objem koule vejde s rezervou do kuličky o poloměru 1 mm. Tím se dostáváme k velikostem terčíků, typickým pro experimenty s inerciální fúzí. Na tak malé terčíky zatím neu-

míme zacílit potřebný výkon ohřevu jinak, než pomocí laserů, jejichž parametry jsou na hranici našich dnešních technických schopností. Jediným takovým funkčním systémem je v současné době americký systém NIF, francouzský Laser Mégajoule se dokončuje, výstavbu dalšího oznámilo Rusko v blízkosti Sarova.

Při úvahách o inerciální fúzi jako zdroji energie nesmíme zapomínat ani na celkovou účinnost elektrárny. Dnešní laser používaný v NIF má celkovou účinnost výroby mohutného pulsu menší než jedno procento – na puls s několika megajouly energie tedy spotřebuje několik set megajoulů elektrické energie. Bezpečná exploze terčíku má mít přítom energii zhruba pěti set megajoulů. Je evidentní, že takhle by elektřinu vyrábět nešlo. Principiálně je zřejmě možné zvýšit účinnost laserového systému možná až na deset procent, a při použití vysokoteplotního reaktoru lze počítat s účinností výroby elektrické energie z tepla uvolňovaného fúzí zhruba 40 %. Z 500 MJ exploze se pak vyrobí 200 MJ elektrické energie, a z toho řekněme 20 MJ bude potřeba na nabití laserů pro odpálení dalšího terčíku. Do sítě tedy můžeme poslat 180 MJ, čili asi 36 % uvolněné energie. To už zní poměrně slibně, každopádně by z hlediska účinnosti, spolehlivosti a nakonec i ceny bylo časem lepší místo laserů používat urychlovače, tj. místo světla používat ke stlačení a ohřevu svazky částic. Ty ale zatím na tak malý terčik nedokážeme zaměřit.

Vedle myšlenky inerciální fúze se ovšem neméně usilovně pracuje i na úplně jiné variantě zvládnutí fúzních reakcí. Tou je snaha o udržení požadované velmi vysoké teploty co nejdéle, třeba i celé dny, ne jen po krátký okamžik exploze. Největším oříškem potom je hledání způsobu, jakým by bylo možné horké plazma

oddělit od našeho chladného světa, jak jej „udržovat“ nesmírně horké a zároveň čisté. Plazma nám v tomto směru trochu pomáhá, protože obsahuje samé nabitě částice, a na ty lze zvnějšku působit silami elektrického a magnetického pole. Pomocí těchto sil se můžeme pokusit horké plazma izolovat od chladných stěn, nechat ho „levitovat“ v prostoru. Jakmile se pustíme na tento tenký led, musíme počítat nejméně se dvěma velkými komplikacemi: Za prvé, držet horké plazma vnějším silovým polem je jako balancovat míč na špičce nosu, nestability budou na denním pořádku, a za druhé, musíme rezignovat na velké hustoty plazmatu, bude možné udržovat jen opravdu řídký obláček paliva.

Fyzikové vyvinuli mnoho různých typů „pastí“ ke spoutání vysokoteplotního plazmatu buď elektrickým, nebo magnetickým polem. Magnetické pole se jeví jako vhodnější, technicky a energeticky méně náročné. Prakticky lze pro dostatečný objem plazmatu zvládnout magnetická pole s indukci v řádu několika tesla – pro srovnání, běžný magnetek na ledničku dosahuje indukce asi tisíckrát slabší. Silná magnetická pole se vytvářejí pomocí cívek, kterými protéká mimořádně velký elektrický proud. Pro indukce kolem deseti tesla začne být pro konstruktéry opravdu náročné zvládat síly, kterými na sebe cívky působí. V případě použití supravodičů nastává další komplikace - magnetické pole snižuje již tak velmi nízkou teplotu potřebnou pro chlazení cívek tak, aby byly supravodivé. Klasické měděné cívky se zase vzhledem k velkým elektrickým proudům zahřívají, a tak je již po několika sekundách nutné proud vypnout, jinak je tepelná roztažnost zničí.

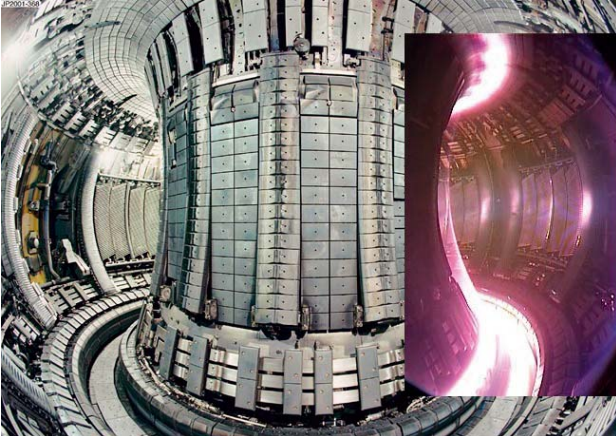
Mezi několika možnými konfiguracemi magnetického pole, které jsou pro udržení plazmatu

dostatečně stabilní, vycházejí z hlediska kvality tepelné izolace plazmatu nejlépe tokamaky. Tokamaky přitom zvládnou při prakticky dosažitelných hodnotách magnetické indukce stabilně udržovat plazma, jehož tlak zhruba odpovídá atmosférickému tlaku, čili asi 100 kPa (sto tisíc pascalů). Jen v úplně nejlepších experimentech se daří udržet tlak ještě několikrát větší. Plazma je přitom skutečně díky magnetickému poli oddělené od „studené“ stěny vakuové nádoby vrstvou téměř dokonalého vakua – a schopnost vakua tepelně izolovat je známa i z běžného života, stačí připomenout termosky. V případě tokamaku ovšem mluvíme o izolaci plazmatu, které má mít ve svém centru teplotu přes sto miliónů stupňů Celsia.

Tlak plynu je přímo úměrný součinu teploty a hustoty, kde teplota je měřena v kelvinech. Zatímco teplota vzduchu v létě je běžně 300 K ( $T [K] = T [^{\circ}C] + 273.15$ ), teplota v tokamacích je téměř miliónkrát větší. Znamená to, že pokud má být tlak horkého plazmatu srovnatelný s tlakem vzduchu za pokojové teploty, hustota paliva v tokamaku musí být téměř miliónkrát menší než hustota vzduchu. A skutečně, před experimentem se do vakuové nádoby tokamaku napouští plynné palivo při pokojové teplotě na tlak zhruba jedné desetiny pascalu, čili na jednu milióntinu atmosférického tlaku. Až prudké zvýšení teploty během experimentu zvedne tlak tohoto velmi malého množství paliva na hodnoty srovnatelné s atmosférickým tlakem, tedy na maximální tlak, při kterém dosažitelné magnetické pole udrží stabilní konfiguraci. Skutečnost, že jsme při kontinuálním udržení plazmatu nuceni pracovat s velmi nízkou hustotou paliva, je dobrou a špatnou zprávou zároveň. Dobrou proto, že plazma při tak nízké hustotě nepředstavuje pro reaktor žádné nebezpečí ani při extrémních teplotách potřebných

pro fúzi. Jestliže je v jednom kubickém metru plazmatu stejné množství částic, jako v jednom krychlovém centimetru (tj. v jednom mililitru) vzduchu, pak případná kolize takového plazmatu s mnoha tunami konstrukčního materiálu nemůže znamenat nic jiného, než že plazma vychladne. Stěna se při tom ohřeje zpravidla jen o několik stupňů. Nízká hustota je ale zároveň špatnou zprávou, a to proto, že výkon fúzních reakcí odpovídá druhé mocnině hustoty paliva. Při nízkých hustotách se částice plazmatu pohybují daleko od sebe, a proto se srážejí a reagují jen výjimečně. Tlak magnetického pole, který působí proti tlaku plazmatu, je navíc úměrný druhé mocnině magnetické indukce. Počet fúzních reakcí je výsledně úměrný čtvrté mocnině magnetické indukce. To je opravdu velká motivace pro dosahování co nejvyšších magnetických polí. Proto se některé tokamaky (třeba americký Alcator-C, italský FTU, nebo projekty FAST či Ignitor) přímo zaměřují na zvládnutí co nejvyšších magnetických polí. Takové tokamaky ovšem dokáží zvednout indukci pole jen zhruba o třetinu, a zatím nemohou vůbec pomýšlet na využití supravodičů, čili ani na kontinuální udržení plazmatu.

Nyní můžeme odhadnout, jaký objem asi zabírá množství paliva, které musí být spotřebováno každou sekundu ve fúzní elektrárně rozumné velikosti. Z hustoty vzduchu lze snadno odvodit, že hustota paliva je v tokamacích nejvýše  $10^{20}$  částic na krychlový metr. Jestliže jsme v případě inerciální fúze vypočetli, že k uvolnění 500 MJ je potřeba zhruba  $1,8 \cdot 10^{20}$  fúzních reakcí, pak v reaktoru, který by vyráběl 3000 MW tepla (tj. asi stejné množství, jako jeden reaktor v moderní jaderné elektrárně), by se muselo každou sekundu přeměnit zhruba 22 kubických metrů příslušné velmi řídké směsi deuteria a tritia na hélium. Už odsud je vidět, že jen těžko půjde



**Pohled do komory tokamaku JET, s vloženou fotografií plazmatu během experimentu. S laskavým svolením EFDA JET.**

o malý reaktor. Úvaha o velikosti reaktoru ale není zdaleka tak jednoduchá. Reaktor by teoreticky mohl být docela malý, kdybychom potřebné množství paliva dokázali rychle přivádět, a vznikající hélium rychle odvádět. Při takové konstrukci bychom ovšem hned narazili na vážný problém – palivo přivádíme studené, a je otázka, zda jej při příliš rychlém průtoku částic reaktorem vůbec fúzní produkty stihnou ohřívat na potřebnou pracovní teplotu. Při těchto úvahách je klíčové, zda bude splněno tzv. Lawsonovo kritérium.

Lawsonovo kritérium už od roku 1955 jasně říká, že v užitečném reaktoru musí termojaderné palivo při požadované pracovní teplotě dosáhnout určité kritické hodnoty součinu hustoty paliva a doby udržení jeho energie. „Doba udržení energie“ není nic jiného, než poměr tepelné energie paliva v joulech a výkonu všech energetických ztrát plazmatu ve watttech. Tato veličina se tedy skutečně měří v sekundách a udává charakteristickou dobu, za jakou plazma vychladne, pokud se vypnou všechny zdroje ohřevu (včetně fúze). Konkrétně pro fúzi deuteria a tritia Lawsonovo kritérium udává, že při teplotě kolem 250 miliónů kelvinů je potřeba dosáhnout součinu hustoty a doby udržení nejméně  $1,5 \cdot 10^{20}$  s/m<sup>3</sup>. U magnetického udržení plazmatu se vyplatí používat trochu nižší teplotu, při které odpovídá udržovaný tlak vyšší hustotě paliva. Jako optimální se pro tokamaky uvádí teplota kolem 150 miliónů kelvinů, a tomu odpovídá číselná hodnota Lawsonova kritéria, po započtení poklesu teploty směrem

od centra, asi  $5 \cdot 10^{20}$  s/m<sup>3</sup>. Z výše uvedené hustoty paliva v dosažitelném magnetickém poli maximálně  $10^{20}$  částic/m<sup>3</sup> tak vychází, že potřebujeme dosáhnout doby udržení energie asi pět sekund. Zhruba řečeno to znamená, že horké částice musí strávit v objemu plazmatu průměrně pět sekund, než jsou náhodnými srážkami vyneseny z plazmatu ven. Při splnění Lawsonova kritéria dojde k takzvanému zapálení, čili k situaci, kdy výkon uvolňovaný fúzními reakcemi stačí k pokrytí všech energetických ztrát plazmatu, neboli stačí sám udržovat vysokou teplotu na úrovni potřebné pro průběh dalších fúzních reakcí.

Jak již jsme uvedli výše, z hlediska doby udržení je mezi všemi konfiguracemi udržení plazmatu vnějšími silami zatím nejlepší tokamak. Dosud nejvyšší doba udržení, naměřená na tokamaku JET, je téměř přesně jedna sekunda. Při takovém udržení plazmatu již probíhají fúzní reakce ve velmi velkém množství. Na tokamaku JET se jejich efekty běžně pozorují a zkoumají, dokonce se podařilo i prokázat malý příspěvek výkonu fúzních reakcí k udržování velmi vysoké teploty plazmatu. Jsme ve skutečnosti bolestně blízko ke splnění Lawsonova kritéria – chybí nám jen faktor pět – ale na druhou stranu nám docházejí nápady, jak tuto dobu udržení dále zvednout. Vlastně zbývá jen jediný opravdu spolehlivý způsob: Doba pobytu částic v horkém objemu plazmatu je bezpochyby možné zvýšit tím, že zvětšíme celý objem plazmatu. Ale to už je jiná kapitola. Jmenuje se Významná termojaderná zařízení.



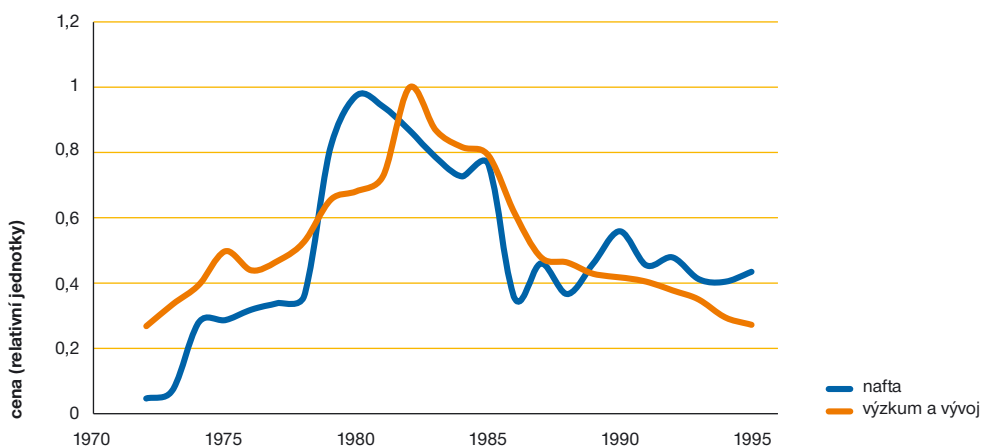
# HISTORIE VÝZKUMU ŘÍZENÉ TERMOJADERNÉ FÚZE VE SVĚTĚ

## 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 hořících 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 nafty a dotací na výzkum energetických zdrojů v Německu v letech 1970 až 1995. Zřejmá je zpožděná reakce dotací výzkumu na cenu nafty.



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 neustálými 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 laboroři. Na snímku E. Rutherford (uprostřed) s pozdějším ředitelem Harwelu D. Crockettem a dalším spolupracovníkem S. Waltonem (vlevo).



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

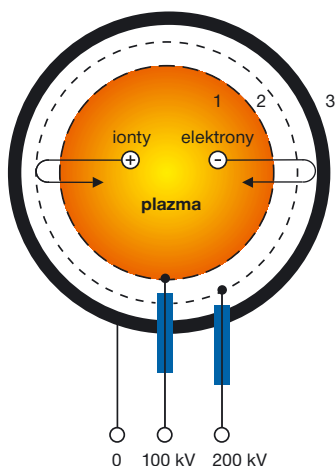
V roce 1934 pomocí lineárního urychlovače sloučili jádra deuteria Paul Harteck a Marcus L. E. Oliphant pod vedením nositele Nobelovy ceny Ernesta Rutherforda. Z té doby pochází známý výrok Sira Rutherforda o nemožnosti využití energie jádra pro průmyslové účely. Energetický zisk fúze pomocí lineárního 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 popravit. 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 „Zeslabovač difúze“ (Diffusion Inhibitor), což rozvedli slovy: „Potlačení difúze plazmatu na stěny komory magnetickým polem“. Jejich

průkopnická 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, spekovali 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 zářením. 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. Toroidální 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 zapůsobilo v dubnu 1951 prohlášení prezidenta Argentiny Juana Peróna, 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 horolezce). Později byl Matterhorn rozšířen na známý všeobjímající 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 nepříliš 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 cívký, které by měly vytvářet oproti kombinaci obyčejné a spirálové cívký 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 cívký, 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 Perhapsatron (Perhaps = možná **to bude fungovat!**) potvrdil obecnou nechtost 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 cívký) „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).

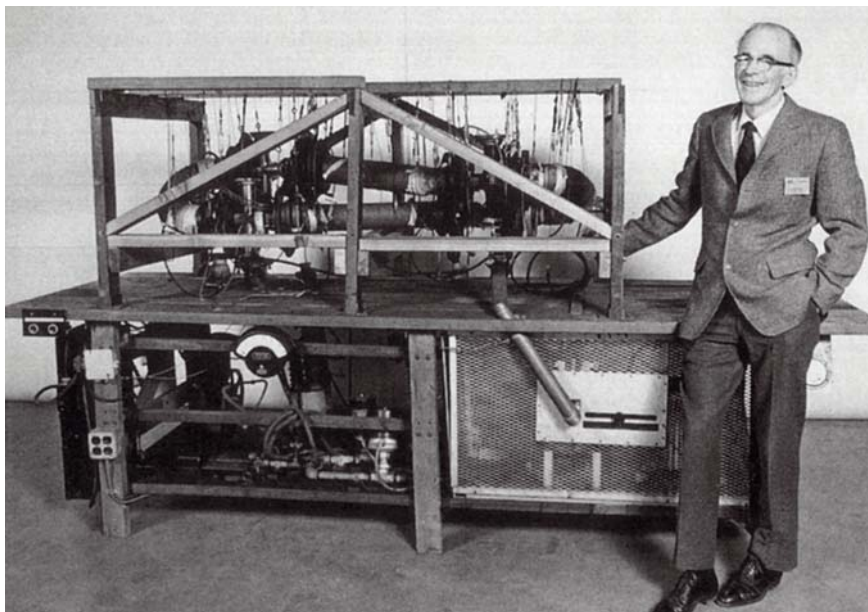
Třetí zemí, kde se studovala řízená fúze, byl poválečný Sovětský svaz. Dopisy seržanta Olega A. Lavrentěva inspirovaly mladého Andreje D. Sacharova a jeho vynikajícího učitele a vědce Igora J. Tamma v roce 1950 k návrhu Magnetického termojaderného reaktoru. V toroidální vakuové komoře byl výboj buzen 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 oponou“ 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 stanovalo 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 siločivky). 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. vstříčná 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 štěrby – 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 části 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 nepřímou úměrnou 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

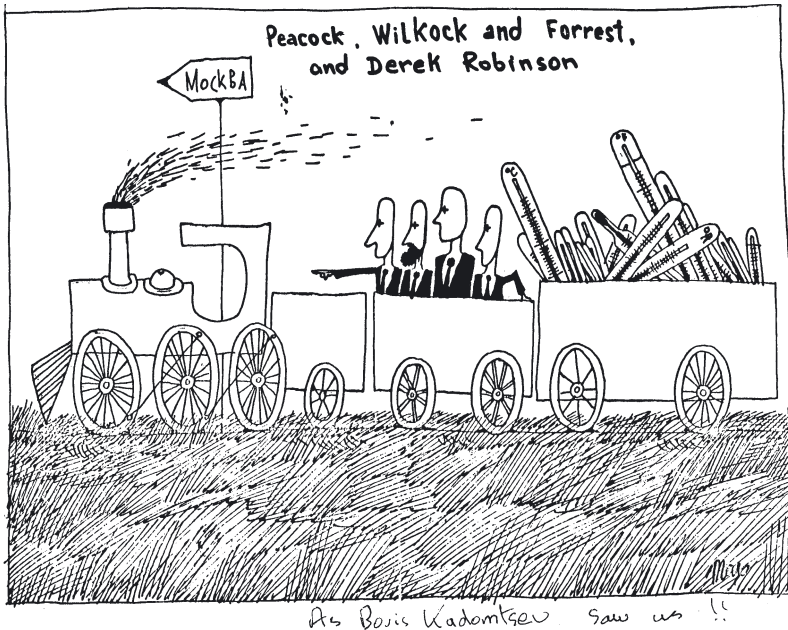


v uzavřených systémech K. A. Razumova a E. P. Gorbunov zcela stabilní režim. Mimochodem, K. A. Razumova, tehdy s D. I. Ivanovovem, ověřila již v roce 1953 vůbec poprvé na světě Šafranovo-Kruskalovo kritérium na lineárním výboji SK-1. Teď už stačilo „jen“ postavit větší tokamak, tak velký, aby transformátorový proud dokázal plazma dokonale ionizovat. Pak byl, díky výraznému snížení vyzařování světla, správně očekáván 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 10 milionů stupňů za chybnou interpretaci 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 ve-

doucí 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 nekruhovým 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 A. A. Galjejevem a R. Z. Sagdėjevem 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. Nejnadhjnější 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 Kadomceva 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 zmraženého 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 konečné 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 JT-60SA, 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 Organization 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 bylo zahájeno hloubení jámy pro reaktor. V témže roce byl položen základní kámen pro administrativní budovu včetně ředitelství.

## JINÉ PŘÍSTUPY MAGNETICKÉHO UDRŽENÍ

Zmíníme dva alternativní přístupy. Oba se pětují 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 zkoušeli 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 Jupitěr. Hospodářské turbulence osmdesátých let program Jupitěr 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 spolkalo odpad všech atomových elektráren na světě. Prakticky ve stejnou dobu se objevil návrh vědců General Atomics 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 předchází návrhy vycházející z magnetického udržení, je projekt livermorského hybridu LIFE – **L**aser **I**ncertial **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 navrhli 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 ozářujících 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 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 zhroutení výboje dříve, než plazma dosáhlo termojaderných parametrů. Poslední způsob, jak se s nestabilitou vypořádat, pochází právě z roku 2010. Původní klec z pavoučích drátků protékaných 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. Breakeven očekávají 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 terčů 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 inerciální fúze.

## PŘÍTOMNOST A BUDOUCNOST FÚZE

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

gie, a to jak s magnetickým, tak s 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, vstřik 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

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



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, vyzařování relativistických elektronů a obecně vzájemného působení (interakce) vysokofrekvenčních polí s horkým plazmatem již v této době naznačovalo pozdější zaměření ústavu. To vykristalizovalo 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 experiment, se rozběhly ve dvou směrech. První směr se věnoval ohřevu plazmatu vstříkovaným svazkem energetických elektronů (přesněji řečeno nestabilitami v plazmatu tímto svazkem vybuzenými), druhý pak ohřevem z vnějšího zdroje do plazmatu vysílaných intenzivních elektromagnetických vln. Společným znakem obou směrů však bylo stále studium interakce horkého plazmatu s vysoko-

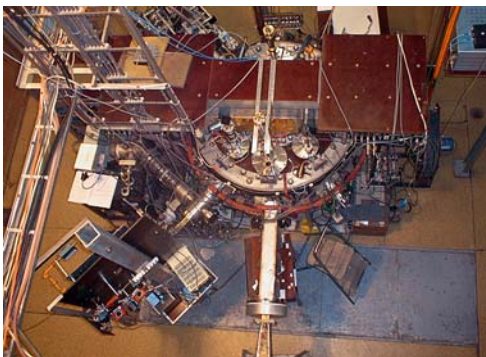
frekvenčními poli, vznikajícími v plazmatu buď samovolně jeho nestabilitou, či dodávanými do plazmatu vnějším zdrojem.

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 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.

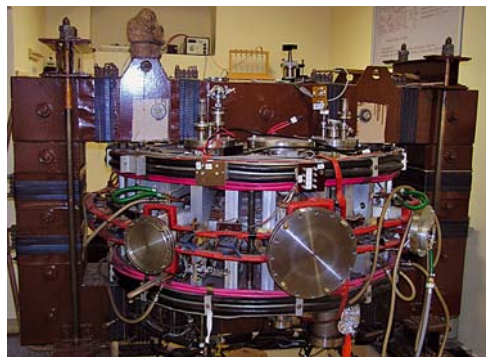
Druhý směr se zaměřil již od počátku na hledání způsobu buzení v plazmatu se šířících vhodných větví vysokofrekvenčních vln a především pak na hledání podmínek jejich následného účinného bezsrážkového pohlcení v požadovaném místě. Za tímto účelem (a také za účelem vývoje potřebných diagnostik vysokoteplotního plazmatu) byla postupně postavena během

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 zemí přístupujících 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**

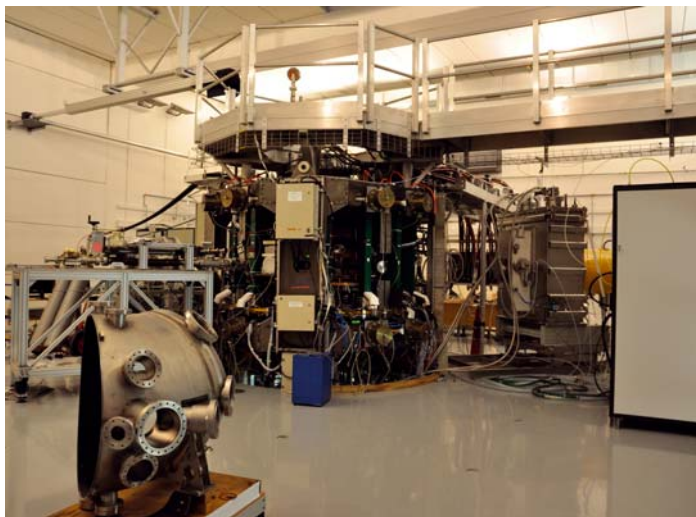
šedesátých a počátkem sedmdesátých let celá řada lineárních zařízení (tj. přímých s otevřenými poli: D-1, VF-2, ECR-1, ER-2, ER-3), na kterých byla např. poprvé v laboratorních podmínkách ověřena teorii předpovězená transformace a následná úplná absorpce vysokofrekvenčních vln v plazmatu v magnetickém 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 tokamakách, 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 CASTOR (**C**zechoslovak **A**cademy of **S**ciences

**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 vytykávané 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 republice také zajímavou oblast materiálového

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





**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.**

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, Ústav fyziky materiálů AV ČR 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  $B_4C$ , později nástřiky z wolframu a kompozitů wolfram-měď či wolfram-ocel. 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.

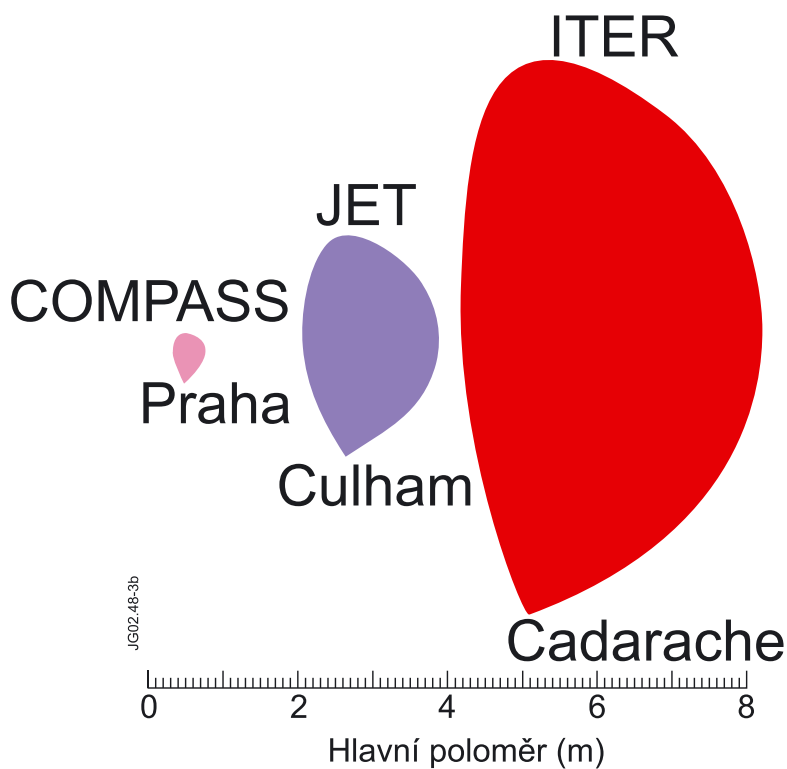


# VÝZNAMNÁ TERMOJADERNÁ ZAŘÍZENÍ

## PROČ VELKÁ ZAŘÍZENÍ?

Mnohdy musíme odpovídat na zdánlivě logickou otázku. Proč se termojaderná reakce nevyzkouší na malém a tudíž laciném prototypu a teprve bude-li fungovat, se postaví pro výrobu dostatečného množství energie velký reaktor. Zejména, když tato metoda vedla k cíli při konstrukci uhelných kotlů či štěpného reaktoru. Metoda, která slavila úspěchy i v jiných oborech techniky jako je letectví či lodní doprava. Nezbytným parametrem fungujícího termojaderného reaktoru je kvalitní tepelná izolace plazmatu, čili dostatečná doba udržení jeho energie. V zimě asi nebudete vytápět obyvací pokoj při stabilně otevřeném oknu. Zavřít okna kolem plazmatu můžete buď větší intenzitou magnetického pole nebo větším objemem plazmatu – známý efekt rychlosti chladnutí hrnce a lžice polévky. Intenzita magnetického pole je na hranicích současných technických možností, zatímco velikost plazmatu své poslední slovo ještě neřekla. Doba udržení energie plazmatu roste dokonce s kvadrátem jeho velikosti! A tak pokud bude plazma dvakrát větší, udrží částice (a jejich pohybovou energii, čili teplo) hned čtyřikrát déle. Tento jednoduchý závěr skutečně platí, a příčinou je skutečnost, že mikroskopické parametry – střední volná dráha a střední doba mezi srážkami – jsou v plazmatu určité kvality stále stejné, ať už provozujeme malý, nebo velký experiment. Závěr je jednoduchý: Jestliže je nejlepší naměřená doba udržení kolem jedné sekundy u tokamaku JET, a tokamak ITER má mít plazma podobné, jen zhruba dvakrát větší, pak v něm

můžeme očekávat dobu udržení v nejlepším případě  $2.2 \text{ s} = 4 \text{ s}$ . Je zajímavé, jak blízko se s touto úvahou dostáváme k mnohem pracněji předpovězené době udržení, která je pro ITER uváděna jako 3,6 s. ITER tedy nedosáhne oněch pěti sekund – požadované doby udržení pro splnění Lawsonova kritéria v tokamacích. Často (a správně) se lidé ptají, proč se ITER nepostavil o tu trochu větší, aby v něm bylo Lawsonovo kritérium určitě splněno. Odpověď je, že původně (do roku 1997) byl ITER skutečně projektován větší, a to tak, aby v něm k „zapálení fúzních reakcí“ došlo. Projekt ovšem v rámci hodnocení ekonomických rizik vyšel jako příliš drahý s ohledem na velký posun od současných technických znalostí směrem do neznáma. Zredukovaný ITER sice nejspíš nedosáhne zapálení, nicméně bude ke splnění Lawsonova kritéria velmi blízko. Tak blízko, že v něm fúzní reakce mají produkovat až desetkrát větší výkon, nežli jaký bude výkon vnějšího, dodatečného ohřevu plazmatu nutného pro udržování požadované vysoké teploty. Při takových podmínkách sice ještě nemá smysl vyrábět elektřinu, ale už je velmi dobře možné provádět téměř úplný inženýrský výzkum, tj. vývoj a testování komponent pro budoucí fúzní reaktory. ITER má být dokonce tak blízko splnění Lawsonova kritéria, že se s trochu štěstí a šikovnosti při řízení plazmatu nakonec může stát, že v něm přece jen k jeho splnění dojde – jak se uvádí v technickém zadání pro ITER, zapálení není vyloučeno („ignition is not precluded“). Jestliže je v dvakrát větším zařízení čtyřikrát delší doba udržení plazmatu a jeho energie, pak



Srovnání velikostí průřezů vakuových komor tokamaků ITER, JET a COMPASS.

to samozřejmě platí i naopak. V německém tokamaku ASDEX, který je zhruba dvakrát menší než JET, je doba udržení zhruba čtyřikrát menší, lze ji proto odhadnout na nejvýše  $0.25 \text{ s} = 250 \text{ ms}$ . I český tokamak COMPASS má plazma podobné konfigurace jako plazma v zařízení JET, ovšem při rozměrech zhruba pětkrát menších. To znamená, že doba udržení plazmatu je v COMPASS  $5.5 = 25$  krát kratší než doba udržení v JET, čili přinejlepším může dosáhnout asi 40 ms. Při takových dobách udržení je plazma tokamaku již opravdu dost vzdálené od splnění Lawsonova kritéria, a procesy termojaderné fúze se proto ocitají na hranici pozorovatelnosti. Malé experimenty se proto nevěnují jaderným aspektům fúzního výzkumu, ale výhradně výzkumu jevů ve vysokoteplotním plazmatu. Prioritu přitom má výzkum turbulentních procesů, které jsou hlavní a zároveň fyzikálně velmi komplikovanou příčinou měřených hodnot difuze napříč magnetického pole.

Možná občas i právem namítáte, že stále jen vycházíme z číselných hodnot a ze vzorečků, které si sotva budete moci sami naměřit či odvozovat. Tím pádem může být dost těžké tomu všemu uvěřit. Ano, je to tak. Jediné, co můžeme na obranu říci, je to, že na základě stejných vzorečků a hodnot, na základě důvěry mezi obrovským množstvím odborníků se už podařilo uvést do provozu mnoho velkých a složitých systémů, jako je třeba raketová technika, velký urychlovač LHD v CERN. A není znám žádný důvod, proč by na stejných základech nemohla v dohledné době fungovat také termojaderná fúze.

Nyní, když víte, proč se stavějí obrovská zařízení pro výzkum termojaderné fúze, můžeme se směle ponořit do kapitoly zabývající se jejich přehledem.

## TOKAMAKY

Velké tokamaky jsou sdruženy v Koordinační skupině Large Tokamak Facilities (LTF – Velká tokamaková zařízení) a zaměřují se na experimenty doplňující databázi, ze které čerpá projekt ITER. LTF funguje pod hlavičkou IEA (International Energy Agency). Do skupiny patří vedle tokamaku JET, japonský tokamak JT-60U a patřil tam i americký TFTR. V programu se angažují také tokamaky DIII-D z USA a německý ASDEX U.

V průběhu historie výzkumu fúze bylo v provozu celkem 215 tokamaků (stav v září 2012).

Asi ve třetině případů se jedná o vylepšené verze předchozího modelu. Přehled jejich parametrů je průběžně aktualizován na <<http://tokamak.info/>>. V současnosti je v provozu 35 tokamaků. Přehled parametrů těch nejvýznamnějších je uveden zde v tabulce.

Při výpočtu parametrů tokamaku takových, aby v něm skutečně proběhla termojaderná fúze, se používá podobnostních vzorců (viz str. 206, nebo poznámka pod čarou), do kterých se dosazují parametry R, a, B, I<sub>p</sub>.<sup>25</sup>

### PŘEHLED NEJVĚTŠÍCH SVĚTOVÝCH A EVROPSKÝCH TOKAMAKŮ

název	stát	R <sub>0</sub> [m]	a [m]	B <sub>t</sub> [T]	I [MA]	Q
<b>ITER</b>	Mezinárodní	6,2	2	5,3	17	10
<b>JET</b>	EU	2,96	1,25/2,1	4	7	0,65
<b>JT-60/JT-60SA</b>	Japonsko	3,4/2,96	1/1,18	4,5/2,25	5/5,5	
<b>TFTR</b>	USA	2,62	0,97	5,9	3	1,25 <sup>26</sup>
<b>DIII-D</b>	USA	1,67	0,67	2,1	3	
<b>MAST</b>	Spoj. království	0,85	0,65	0,5	2	
<b>ASDEX U</b>	Německo	1,65	0,8	3,9	2	
<b>Tore Supra</b>	Francie	2,25	0,7	4,5	2	
<b>T-15</b>	Rusko	2,43	0,7	3,5	2	
<b>KSTAR</b>	Korea	1,8	0,5	3,5	2	
<b>EAST</b>	Čína	1,8	0,5	3,5	2	
<b>Alcator C-mod</b>	USA	0,67	0,22	8,07	1,5	
<b>TCV</b>	Švýcarsko	0,88	0,24/1,39	1,43	1,2	
<b>FT-U</b>	Itálie	0,92	0,31	7,5	1,2	
<b>NSTX</b>	USA	0,85	0,67	0,6	1	
<b>TEXTOR</b>	Německo	1,75	0,5	2,8	0,8	

<sup>25</sup> Empirický odhad parametrů ze znalosti jejich chování u podobných tokamaků.

<sup>26</sup> Přepočteno ze směsi DD.



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	
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 vesničky 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 během prvních let experimentů zaujal vynikajícími fyzikálními výsledky (1985 dosahuje

## 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

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 pokořil 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 schop-

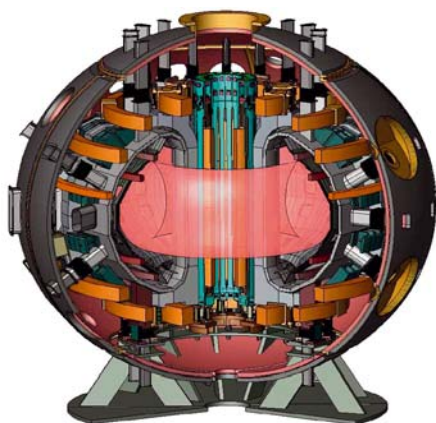
nostech řídit vysokoteplotní plazma, protože umožňuje automaticky reagovat v reálném čase na chování plazmatu pomocí prakticky všech výkonových systémů, včetně systémů ohřevu. V roce 2011 byla dokončena velká přestavba vnitřních stěn vakuové nádoby tak, aby materiály přímo vystavené plazmatu (tzv. první 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 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

**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.

i diagnostiky. Drží rekord v ekvivalentním fúzním zisku  $Q \approx 1,25$ <sup>27</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 vlnkové lodi mezi tokamaky, a sice na plně supravodivou 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

**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

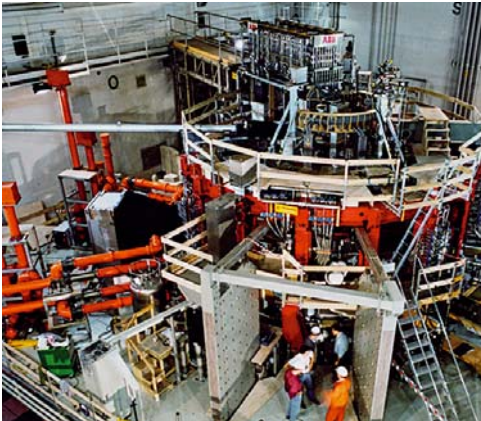
než dvojnásobný objem oproti svému předchůdci a překoná tak i dnešního rekordmana, tokamak JET. JT-60SA vyroste přímo na místě JT-60U, aby mohl využít veškerou existující infrastrukturu. Evropská unie považuje JT-60SA za tzv. satelitní tokamak k ITER, na kterém bude možné vyvíjet scénáře provozu reaktorů. Proto je JT-60SA součástí bilaterální smlouvy EU a Japonska o tzv. širším přístupu (Broader Approach) a EU ho podporuje jak finančně, tak vysláním 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 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

<sup>27</sup> Pokud by JT-60U pracoval se směsí deuterium-tritium dosáhl by  $Q = 1,25$ . Protože JT-60U používá pouze deuterium, je jeho fúzní zisk 100x menší.





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

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. 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.

### 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)

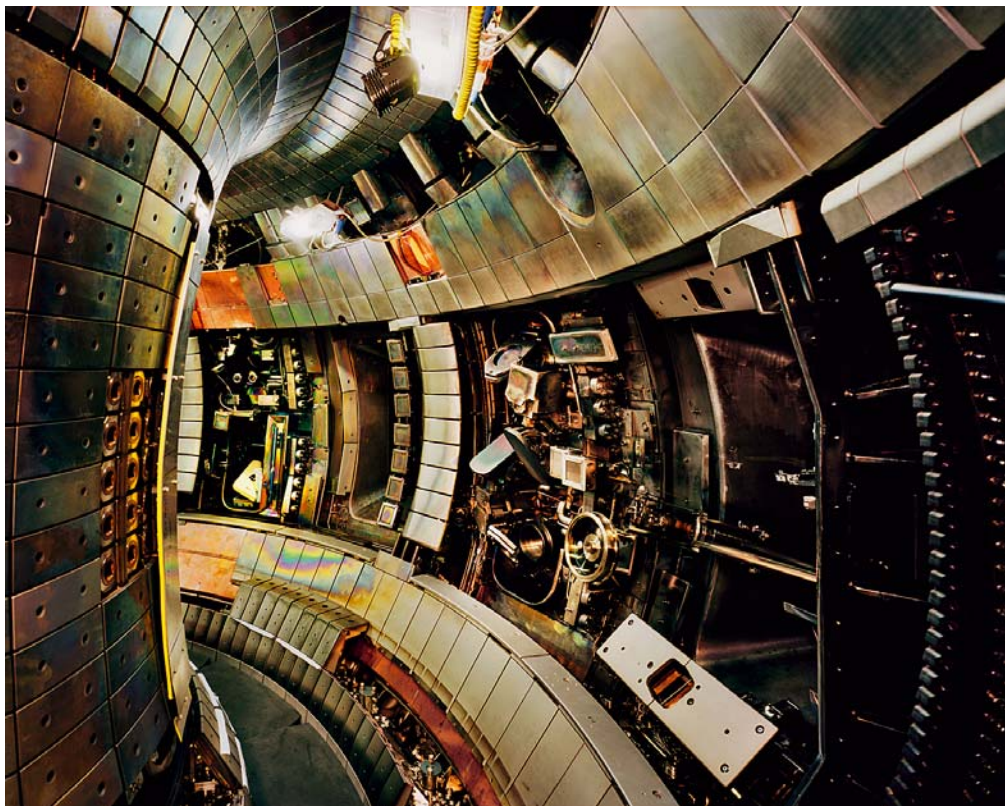
### ASDEX UPGRADE

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

### ASDEX UPGRADE

#### Axially Symmetric Divertor Experiment

ASDEX Upgrade je po evropském tokamaku JET druhým největším tokamakem na světě 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 tokamaku ITER. Tokamak ASDEX Upgrade je navíc po tokamaku JET druhým největším evropským tokamakem. 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.



Vnitřek vakuové komory tokamaku ASDEX Upgrade – Garching u Mnichova.

ASDEX Upgrade hraje klíčovou roli při výzkumu materiálů první stěny – v několika posledních letech úspěšně pracuje s plně wolframovou stěnou. Obavy z příliš velkých radiačních ztrát při použití těžkého kovu se naštěstí nenaplnily a ASDEX Upgrade ukazuje, že budoucí fúzní reaktory mohou s wolframem počítat. Úspěch wolframu způsobil, že v návrhu stěny pro ITER nadále uhlík nefiguruje. Uhlík se nicméně dodnes používá ve většině tokamaků, neboť se velmi dobře snáší s plazmatem. Pro fúzní reaktor pracující s tritiem je uhlík nevhodný, protože vytváří radioaktivní vodu a uhlovodíky. 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 1982 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.

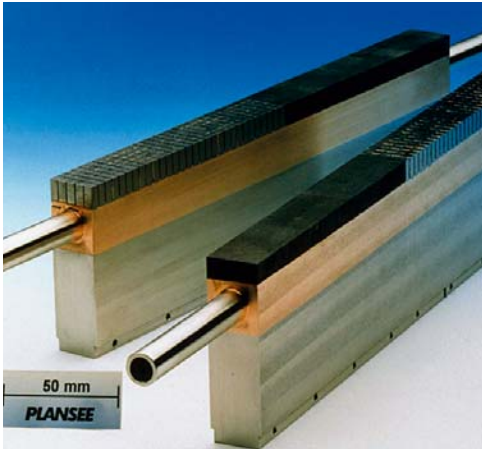
### MAST

#### 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.

### TORE SUPRA

Tore Supra je francouzský tokamak se supravodivými cívkami (slitina Nb-Ti v mědi chlazená supratekutým heliem o teplotě  $-271,45\text{ °C}$ , procházející proud 1400 A, průměr cívek



Části toroidálního limitru „kontakujícího“ 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 MW/m<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.

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 – bezkonkurenčního výsledku při stamilionové teplotě. Tomu odpovídala rekordní tepelná energie 1000 MJ odvedená ze stěny reaktoru během jednoho výboje. V současné době se vážně uvažuje o přestavbě Tore Supra na tokamak s divertorem.



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

### 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. Jihokorejský národní fúzní program, v rámci kterého se tokamak staví, podporuje řada laboratoří zejména ve Spojených státech: např. Princeton Plasma Physics Laboratory, General Atomics. Zkušenosti získané při stavbě KSTAR využívá Korejská agentura pro ITER při výrobě komponent pro tokamak ITER. Ostatně KSTAR a ITER





## 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.

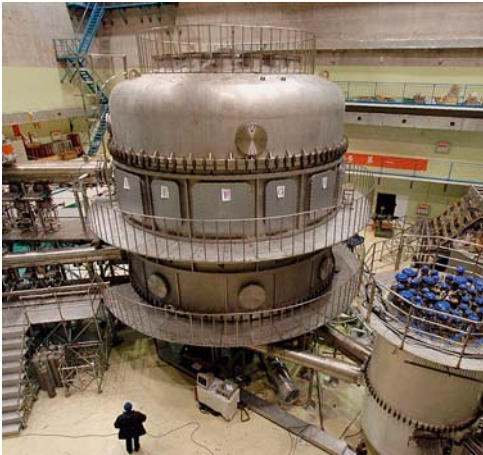
mají smlouvu o spolupráci. První plazma KSTAR zapal 13. června 2008 a mnohem dříve, než se čekalo – 8. listopadu 2010 – zaznamenal H-mod. KSTAR spolu s čínským tokamakem EAST jsou zatím jediné celosupravodivé tokamaky na světě.

## EAST

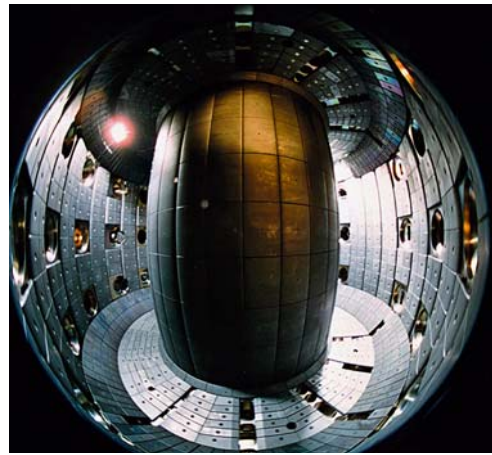
### Experimental Advanced Superconducting Tokamak

Ústav fyziky plazmatu Čínské akademie věd byl založen v milionovém městě 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 supravodivý 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 označovala 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 vakuo-

vé komory mají tokamaky HT-7 a EAST odlišné. Velký, respektive malý poloměr tokamaku 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. Stavba 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 celosupravodivý tokamak, ovšem 750 milionům dolarů řekl Kongres ne! Stavba EAST se stala z finančních i prestižních důvodů ryze čínskou záležitostí 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. Mimochodem Čína



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>28</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

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 stelarátor Large Helical Device a další supravodivý stelarátor 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 pomíne-me 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 „nízkozápalnou“ směsí deuterium – tritium, EAST není zařízení na práci s radioaktivním tritiem 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 Atomics.

28 Poměr svislého a vodorovného vedlejšího poloměru v totech s nekruhovým poloidálním průřezem.

## 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

## 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>29</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, umístěn 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 přistěnového plazmatu.

## TRIAM-1M

V menším japonském supravodivém tokamaku se použil na vinutí toroidálních cívek vodič Nb<sub>3</sub>Sn. Supravodivé cívky chránil 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>30</sup> frekvencí – spoluautoři teorie tohoto jevu pocházejí z pražského Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, kde také byla jejich teorie v roce 1976 experimentálně potvrzena).

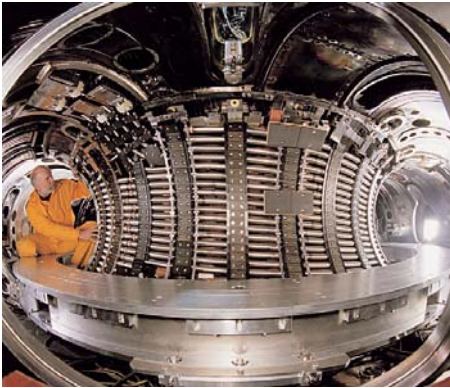
## SST-1

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

29 Použité pojmy jsou vysvětleny v kapitole Princip tokamaku.

30 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.

### 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

### 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

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 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 experimen-

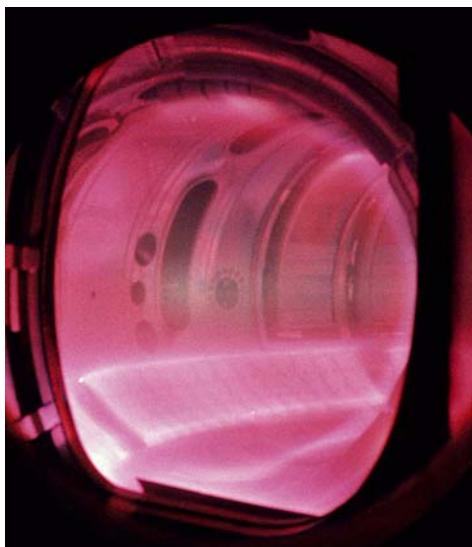
### T-10

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

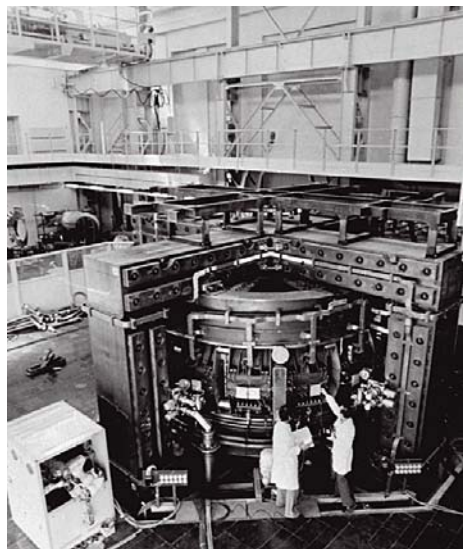
ty na tomto tokamaku bylo z tehdejšího Československa dodáno v 80. letech přes 30 kusů unikátních heliových kryostatů (Ferox Děčín) pro supravodivé magnety ruských vysokofrekvenčních generátorů (gyrotronů), přičemž samotné supravodivé magnety byly vyrobeny (z ruského vodiče) v BEZ Bratislava a nalaďeny v Elektrotechnickém ústavu SAV tamtéž. Dodaná zařízení pracují spolehlivě dodnes! V současné 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



Výboj v tokamaku TEXTOR žhaví toroidální limiter.



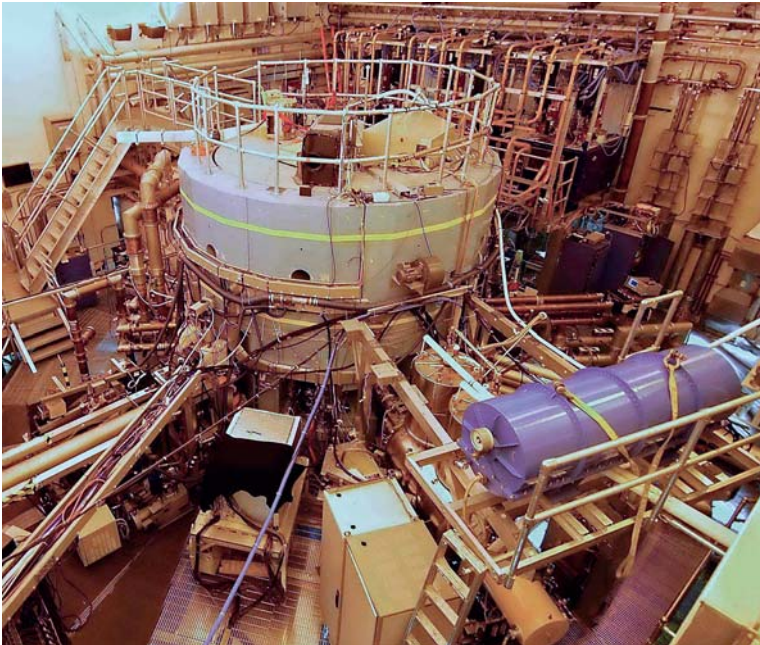
Tokamak T-10; dodnes největší tokamak provozovaný v Ruské federativní republice.

## 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 MW LH
Doba výboje	1000 s

kapacitu. Vakuová komora má kruhový průřez a kryogenní vakuové pumpy s tekutým heliem. S 24 supravodivými cívkami toroidálního pole z  $\text{Sn}_3\text{Nb}$  je stále největším 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 limiter se

vymění za grafitový divertor připravený na zátěž  $20 \text{ MW/m}^2$  – podobně jako očekává ITER. Další modernizace se týká dodatečného 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 nevyhne 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 hyb-



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

řidu již existuje: TIN-1 a projektové práce měly 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  $n\tau \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}\text{s}$ , 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 tokamak, 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 Ústavem 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

**ALCATOR C-MOD**

Hlavní poloměr	0,67 m
Vedlejší poloměr	0,22 m
Magnetické pole	8 T
Proud plazmatem	3 MA
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>31</sup>
Teplota iontů	100 eV

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 hodlá tokamak dosáhnout pouze ohmickým ohřevem a vysokofrekvenční zdroj 24 MW frekvence IC bude sloužit pro studium různých režimů zapálení i hoření. Jádru tokamaku dodá Itálie a tokamak se postaví v Trinitu u Moskvy (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 před-

**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 MA
Poznámka	24 MW IC

pokládaných 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 navíc zpochybňuje, zda je vůbec tokamak s tak vysokým polem možné uvést do provozu.

Vzhledem k velikosti polí rozhodně nelze použít pro hlavní cívkou 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  $\text{MgB}_2$  jako supravodivý materiál.

O vztahu k ITER prohlásil B. Coppi: „There is no COMPETITION, but we are COMPLEMENTARY!“ – „Nebudeme soutěžit, ale doplňovat se!“

## 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

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

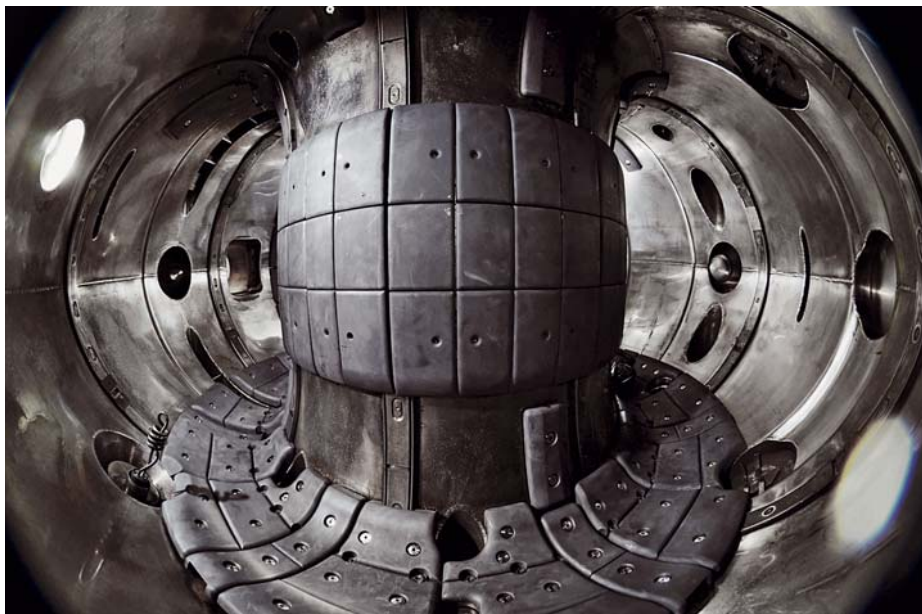
### COMPact ASSEMBLY

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 periferii 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, tvoříci 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 poloidálních cívek se separátně (mimo tokamak) vyvedenými elektrickými přívody. Výběr té nejhodnější 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). Režimu vysokého udržení – H-módu – se podařilo na tokamaku COMPASS dosáhnout 29. listopadu 2012. Z hlediska mezinárodního koordinovaného výzkumu termojaderné fúze jde o klíčový výsledek.





Vakuová komora největšího českého tokamaku COMPASS.

Po přechodu k H-módu 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 magneto-hydrodynamickou 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 termojaderného 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 nepříznivé následky těchto jevů na udržení energie plazmatu do značné míry potlačovat.

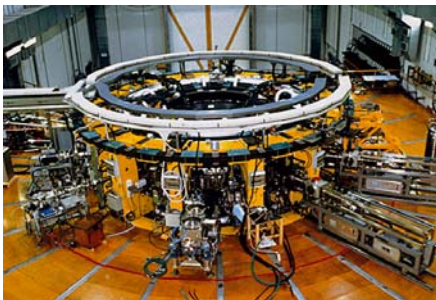
## PINČE SE ZPĚTNÝM POLEM

### RFX

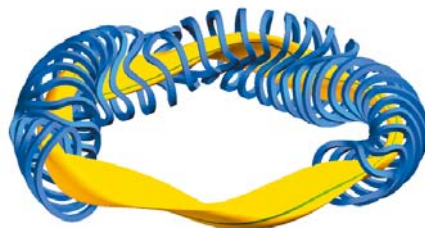
#### Reversed Field Experiment

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 byl uveden znovu do provozu, a to v dokonalejší verzi. Jeho práce od té doby přinesla pozoruhodné výsledky – především se podařilo pomocí rychlé stabilizace vytvořit takzvanou „samoorganizovanou rovnováhu“. V té dosáhl RFX z hlediska pinčů dosud nevídanou dobu života plazmatu (stovky milisekund) kombinovanou s dobrým udržením díky tomu, že se ustavila konfigurace silokřivek s tzv. kvazisingulární helicitou.





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 2004. Italský RFX je největší zařízení tohoto druhu na světě.



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 třídídimenzionální popis.

### RFX

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

### LHD

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

## 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.

### W7-X

#### Wendelstein W7-X

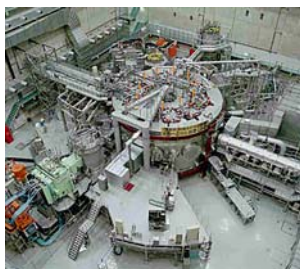
V roce 1951 Spojené státy pod vedením astrofyzika Lymana Spitzera zahájily státem podporovaný výzkum fúze projektem Matterhorn. Spitzer byl totiž nejen autorem stellarátoru, ale i nadšeným horolezcem. Další alpský 1838 m vysoký štít poskytl jméno současnému stellará-

toru 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 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.



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



V současné době největší stelarátor na světě – japonský supravodivý LHD.



Vakuová komora stelarátoru 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

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 plánované půl miliardě eur stouply dvakrát.

### TJ-II

Španělský stelarátor TJ-II byl zprovozněn v roce 1998. Jde o stelarátor typu „heliac“, pozoruhodné zařízení, ve kterém se vodiče neobtáčejí šroubovicově kolem plazmatu (jako je tomu u klasického stelarátoru), ale naopak plazma, včetně vakuové nádoby, se stáčí kolem vodiče. Věnuje se zejména základní

### W7-X

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

### TJ-II

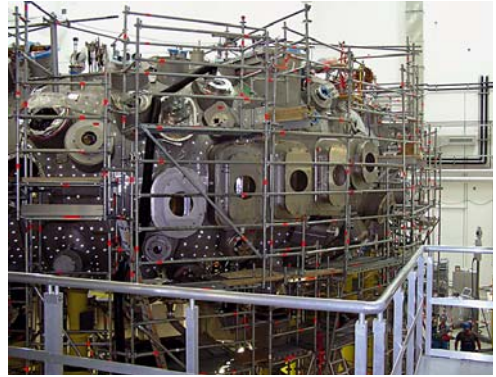
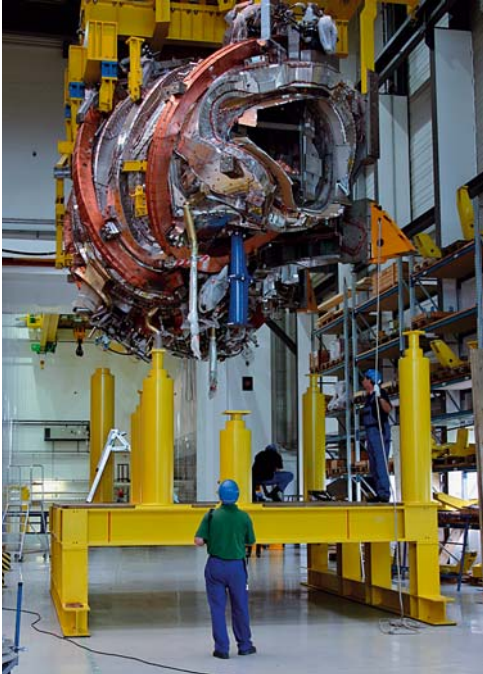
Hlavní poloměr	1,5 m
Vedlejší poloměr	0,25 m
Magnetické pole	1 T
Doba výboje	30 min
Ohřev	15 MW

problematice výzkumu, tj. udržení plazmatu magnetickým polem a měření (diagnostice) plazmatu.

## LASERY

### SHIVA

Laser Shiva byl výkonný 20-svazkový laser postavený na neodymem dopovaném křemenném skle a generující blízké infračervené záření (1,062  $\mu\text{m}$ ) o celkové energii 10,2 kJ v pulzu 0,5 – 1,0 ns. Pracoval v období 1977-1981 a jeho jméno je převzato od hinduistického mnohorukého boha Shivy, což mělo parafrázovat multi-svazkovou konstrukci tohoto



Rozestavěný supravodivý stelarátor Wendelstein W7-X (rok 2011)

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

laseru. Jeho úkolem bylo demonstrovat sférickou kompresi (50 - 100 krát) terčiku naplněného kapalným vodíkem a být předobrazem výkonnějšího laseru Nova. Tak jako jeho předchůdci<sup>32</sup> – lasery Cyclops a Argus, používal Shiva zesilovače ve tvaru skleněných plátů nastavených pod Brewsterovým úhlem (pro minimalizaci odrazu od čelních ploch) a dlouhé vakuové prostorové filtry (aby se odstranily ze svazků nežádoucí příčné módy).

Menší komprese terče, než se očekávalo, se přičítá horkým (~50 keV) elektronům vzniklým stimulovaným Ramanovým rozptylem při interakci laserového záření s povrchem terče. Tento nedostatek by měl být redukován přechodem na kratší vlnové délky ozařujícího laseru (např.

transformací jeho záření do druhé nebo třetí harmonické). Shiva zkoušel jak přímé, tak nepřímé ozáření terče („direct and indirect drive“) a jeho maximální neutronový výtěžek byl  $10^{10}$ - $10^{11}$  neutronů za výstřel. Jeho interakční komora byla využita pro laser Novetta – předstupeň laseru Nova.

24. ledna 1980 byl Livermore zasažen zemětřesením o síle 5,5 RichtEROVY stupnice, což stačilo, aby se šrouby o síle pěsti přestřihly. Za měsíc však byla oprava hotova.

Podle dnešních měřitek byl laser Shiva extrémně levný: stál včetně budovy a vybavení 25 milionů US\$ (což je při započtení inflace 81 milionů US\$ v roce 2005).

<sup>32</sup> Historie laserů v Lawrence Livermore National Laboratory určených pro řízenou termojadernou fúzi má tuto sekvenci:

- 1972 „Long Path“ laser (1 svazek,  $E \sim 50 \text{ J/T} \sim 10 \text{ ns/}\lambda \sim 1062 \text{ nm}$ ) – první laser na bázi Nd:sklo pro fúzi; nepoužíval prostorové filtry (měl špatnou kvalitu svazku) a byl určen ke studiu absorpce v deuterizovaných plastových terčích
- 1975 „Janus“ laser (2 svazky,  $E \sim 10 \text{ J/T} \sim 10 \text{ ns/}\lambda \sim 1062 \text{ nm}$ ) – Nd: silikátové sklo, krátký laser bez prostorové filtrace
- 1975 „Cyclops“ laser (1 svazek,  $E \sim 5 \text{ J/T} \sim 10 \text{ ns/}\lambda \sim 1062 \text{ nm}$ ) – Nd: silikátové sklo, jednosvazková verze laseru Janus určená ke studiu nelineární samofokusace ve výkonných laserových svazcích, k ověření nových zesilovacích technik (disky Nd:skla pod Brewsterovým úhlem), a k vyzkoušení prostorové filtrace svazku ke zlepšení jejich příčného profilu
- 1976 „Argus“ laser (2 svazky,  $E \sim 2 \text{ kJ/T} \sim 0,1\text{-}1,0 \text{ ns/}\lambda \sim 1062, 531, 354 \text{ nm/max } 10^9 \text{ neutronů za výstřel}$ ) – Nd:silikátové sklo, výstupní apertura 20 cm, zaměřený na interakci laserového záření s terčem; po každém zesilovacím stupni následoval prostorový filtr pro čištění příčného profilu svazků; díky tomu se začalo věřit, že bude možné zesílit laserové svazky do velkých výkonů a laser Argus je považován za „zachránce laserové inerciální fúze“; terčikové experimenty studovaly explodující „stlačovač (pusher)“, který při odpaření reaktivní silou komprimoval terč; tyto experimenty iniciovaly vývoj diagnostických rtg kamer; laser Argus také provedl první experimenty s terčem v dutině („hohlraum“), který byl komprimován sekundárním rtg zářením („indirect drive“); potvrdil také výhodu použití druhé nebo třetí harmonické pro interakci záření s terčem.





Nova laser v Lawrence Livermore National Laboratory krátce po svém dokončení r. 1984. S laskavým svolením LLNL.

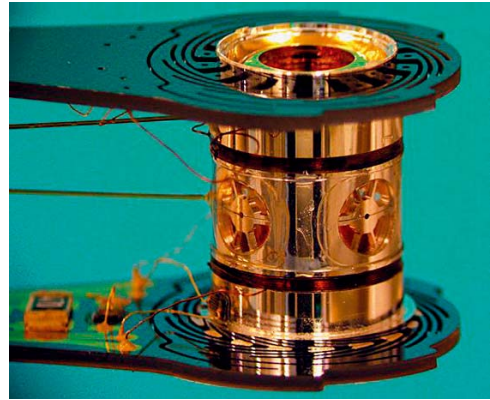
## NOVA

Experiment Nova (1984 - 1999, Lawrence Livermore National Laboratory) byl následník aparatury Shiva a předchůdce zařízení NIF. Jeho primárním cílem bylo dosažení „zapálení – ignition“ – řetězové slučovací reakce. I když Nova tento úkol nesplnila (hlavně díky megnehydrodynamickým nestabilitám), dokázala pojmenovat problémy a na tomto základě bylo projektováno nové zařízení NIF. Návrh Novy začal v roce 1970 a zakrátko byl postaven jeden testovací svazek nazvaný Novette. Mezitím se ukázalo, že ve výpočtu energie nutné k zapálení byla chyba, a že Nova „zapálení – ignition“ nemůže dosáhnout. Proto byl návrh modifikován (zmenšen) a byla přidána konverze záření do třetí harmonické ( $\lambda = 351$  nm). Nová Nova měla 10 svazků; každý svazek měl 15 zesilovačů postavených na discích neodymem dopovaného skla pumpovaného výbojkami (účinnost 1-1,5 %), a jejich skupiny byly vzájemně odděleny 5 prostorovými filtry. Optická délka každého svazku byla téměř 180 m. Před vstupem do komory byly umístěny krystaly pro konverzi do 3. harmonické. Celý laser měl výstupní energii ~100 kJ na základní vlnové délce 1054 nm

a 40 - 45 kJ na vlnové délce 3. harmonické ( $\lambda = 351$  nm) s délkou pulzu 2 - 4 ns, tj. s výkonem v UV oblasti ~16 TW.

Výzkum na zařízení Nova byl zaměřen na nepřímé ozáření terče („indirect drive“). Nejen že Nova nedosáhla zapálení, ale ona částečně zklamala i co do očekávaného neutronového výtěžku (maximum  $10^{13}$  neutronů za výstřel). Přičítalo se to tomu, že jednotlivé svazky nemají přesně stejnou energii. To způsobuje nehomogenitu ozáření a na terči vznikají „horké tečky“. Ty se vkopírují do implodujícího plazmatu a spouštějí Rayleigh-Taylorovu nestabilitu, která způsobuje mixování horkého plazmatu v centru s chladnějším na periférii. Terč pak nekolabuje rovnoměrně a výsledné teploty a tlaky jsou daleko menší. Bylo zkoušeno mnoho způsobů, jak tuto situaci zlepšit, a to jak pro zlepšení zařízení Nova, tak pro zlepšení projektovaného zařízení NIF. Bylo tak získáno množství poznatků důležitých nejen pro fúzi s inerciálním udržením, ale i pro vývoj galaxií a supernov.

V roce 1992 byl jeden svazek Novy časově zkrácen (pomocí techniky zvané „chirped pulse amplification“), takže jeho výkon vzrostl na 1,25 PW. Ten byl nazýván prostě Petawatt a pra-



Hohlraum pro energii 1 MJ 192svazkového laserového systému NIF.

Terčíková komora laserového systému NIF.

coval tak až do roku 1999, kdy byla celá Nova rozebrána, aby udělala místo NIF. Přestože Nova tehdy měla vše potřebné k vyzkoušení rychlého zapálení („fast ignition“), k jeho vyzkoušení nikdy nedošlo.

Po rozebrání laseru Nova byla jeho terčíková komora zapůjčena do Francie na Laser Megajoule a jediný funkční laser v LLNL „Beamlet“ (jeden experimentální svazek budoucího laseru NIF) byl předán do Sandia National Laboratory, NM, USA jako diagnostické zařízení na Z-machine. Tak zůstala LLNL bez většího laseru až do spuštění NIF. To bylo plánováno na rok 2003, ve skutečnosti byl NIF formálně dokončen 31. března 2009.

### NIF (NATIONAL IGNITION FACILITY)

NIF má trojí poslání:

(1) zajistit bezpečnost USA, které nevyrobí nové jaderné zbraně a aktuální stav starých nemůže být testován díky moratoriu na jaderné zkoušky (G. W. Bush, 1992); proto je stárnutí jaderných zbraní simulováno na superpočítačích a NIF k tomu dodává experimentální data tím,

že replikuje podmínky, které existují v termojaderných zbraních.

(2) NIF má prokázat možnost výroby prakticky neomezeného množství čisté energie. Počítá se, že neobnovitelné zdroje energie budou vyčerpány do konce tohoto století (uhlí sice o něco později, ale jeho spalování má devastující vliv na zemské klima). Fúzní energie nevytváří skleníkové plyny a je přátelštější k životnímu prostředí, než energie pocházející z fosilních paliv, nebo ze štěpení jader.

(3) NIF má přispět k porozumění vesmíru: bude simulovat podmínky existující v nitru hvězd, supernov a gigantických planet, bude napodobovat podmínky v prvních nanosekundách po Velkém třesku a bude zkoumat, jak se elementární částice účastnily formování hmoty a jak ta se dále přetvářela při formování vesmírných těles. Očekává se, že další programy NIF budou znamenat průlom v aplikaci laserů v lékařství, ve zpracování jaderného odpadu a v částicové a radiační fyzice. Celkové náklady již přesáhly čtyři miliardy dolarů, tj. dvakrát plánovanou sumu a desetkrát původně odhadovanou sumu a celý projekt je již o 6 let pozděn.



Laser NIF – nové okno (r. 2011) instalované do experimentální komory umožňující pozorovat terč ve vakuu. Na snímku členové NIF týmu Bruno Van Wonterghem (vlevo), Jim Nally (ukazující) and Rod Saunders (vpravo).

NIF je 192svazkový neodymový laser. Svazky jsou sdruženy do čtveřic, každá čtveřice je společně konvertována do třetí harmonické frekvence<sup>33</sup> a fokusována na terč. Díky použití čtyřprůchodových výkonných zesilovačů má laser umístěný na ploše 200x130 m<sup>2</sup> (přibližně stejně jako u laseru NOVA) dosáhnout asi 30x větší energie, tj. 1,8 MJ na třetí harmonické frekvenci neodymového laseru. Laserový systém má proměnnou délku impulzu v rozsahu 1-20 ns s možností tvarování časového průběhu. Výkon 500 TW odpovídá 10 000násobku spotřeby Spojeného království. V polovině roku 2003 vystřelila první čtveřice svazků na terč umístěný v hliníkové sférické komoře o průměru 10 m.

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 MJ a ozáření kapsle bylo symetrické. Konečně 29. října 2010 vystřelilo všech 192 svazků do terčičku zmrzlé (≈

20 K) směsi vodíku, deuteria a tritia. Výstřel sledovalo 26 diagnostik a zaznamenalo 1000x více neutronů než předchozí výstřely do plyného terče. Energie v pulzu znovu přesáhla 1 MJ! Rekordní výstřel byl uskutečněn 15. března 2012, kdy bylo dosaženo v místě terče energie 1,875 MJ ve třetí harmonické (tedy více, než se původně plánovalo), špičkový výkon byl 411 TW a nesymetrie ozáření byla menší než 1,3 %. 5. července 2012 byl laserový puls časově tvarován tak, aby při zhruba stejné energii (1,85 MJ) bylo dosaženo rekordního ozařovacího výkonu v místě terče – 500 TW při nehomogenitě ozáření lepší než 1 %. Tím bylo dosaženo a mírně i překročeno zadání stanovené pro tento laser na sklonku 90. let minulého století.

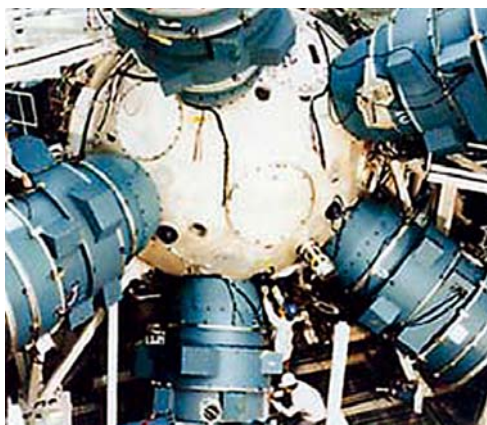
S velkým očekáváním se očekávala zářijová kampaň roku 2012, kdy NIF měl – respektive musel – demonstrovat „zapálení“, to je výstřel s kladným energetickým výtěžkem. Pak však přišla studená sprcha. Výstřely na kryogenní terč daly mnohem menší neutronový výtěžek ( $4,8 \times 10^{14}$ ), než se čekalo – i když ozařovací laser pracoval s projektovanou energií a homog-

33 Základní frekvence je třikrát zvětšena.

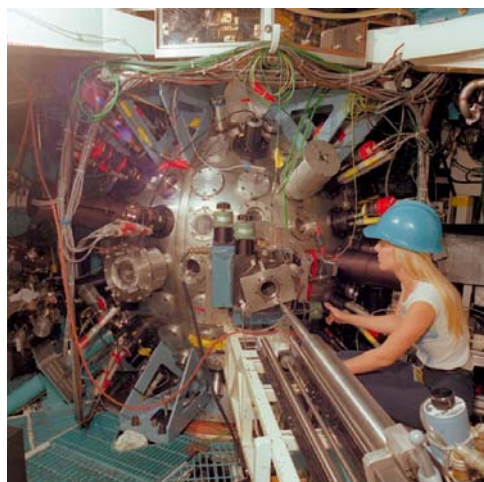


## PŘEHLED NEJVĚTŠÍCH SVĚTOVÝCH LASEROVÝCH SYSTÉMŮ K ROKU 2013

Jméno zařízení	Země/Město/ Laboratoř	Počet svazků	Výstupní energie [kJ] (na vln. délce [nm])	Délka pulzu [ns]	Opakovací frekvence [Hz]	Výkon [TW]
<b>Long path</b>	USA/Livermore, CA/ LLNL	1	0.05 (1062)	10		0.005
<b>Cyclops</b>		1	0.005 (1062)	10		0.0005
<b>Janus</b>		2	0.01 (1062)	10		0.001
<b>Argus</b>		2	2 (1062)	1 - 0.5		2 - 4
<b>Shiva</b>		20	10.2 (1062)	1 - 0.5		10 - 20
<b>Novette</b>		1	10 (1054)	2.5		4
<b>NOVA</b>		10	bud' 100 (1054) nebo 40 ( 351)	2.5 4 - 2		40 10 - 20
<b>Petawatt</b>		1				1250
<b>NIF</b>		192	1875 ( 351)	20 - 1		max 500
<b>Mercury</b>		1	0.05 ( )	15	10	0.003
<b>TRIDENT</b>	USA/Los Alamos, NM/ LANL	3	bud' 2x 0.5 (1054) nebo 2x 0.2 ( 527) + bud' 1x 0.2 (1054) nebo 1x 0.1 ( 527) nebo 1x 0.1 (1054)	1000 - 0.1  0.0006		2x (0.0005 - 5) 2x (0.0002 - 2) + 1x (0.0002 - 2) 1x (0.0001 - 1) 1x 170
<b>NIKE</b>	USA/Washington DC/ NRL	56	4 - 5 ( 248)	4		1 - 1.25
<b>ELECTRA</b>			0.4 - 0.7 ( 248)	100	5	0.004 - 0.007
<b>PHAROS III</b>			1.5			5
<b>OMEGA</b>	USA/Rochester, NY/LLE	60	40 ( 351)	1 - 0.1		40 - 400
<b>OMEGA EP</b>		4	2x 9 ( 351) + 2x 1 (1054)	10  0.001		2x 0.9 + 1000
<b>DIOCLES LASER</b>	USA/Lincoln, NE/UNL	1	0.001	0.00001	10	100
<b>VULCAN</b>	UK/Chilton/RAL	8	bud' 8x 2.5 (1054) nebo 8x 1 ( 527)	2		8x 1.25 8x 0.50
<b>VULCAN + VULCAN PETAWATT</b>		6 + 2	bud' 6x 2.5 (1054) nebo 6x 1 ( 527) + 2x 0.7 (1054)	2  0.0005		6x 1.25 6x 0.50 + 2x 1400
<b>ASTRA</b>		1	>0.001 ( 815)	0.00004	2	25
<b>ASTRA GEMINI</b>		2	2x0.015 ( 815)	0.00003	0.05	500
<b>HIPER</b>	UK/EU	60	250 ( ) + 70 ( )	1  0.015		250 + 4700
<b>ORION</b>	UK/Aldermaston/AWE	12	10x 0.5 ( 351) + 2x 0.5 (1054)	1  0.0005		10x 0.5 + 2x 1000
<b>LMJ (LASER MÉGA JOULE)</b>	Francie/Le Barp/CAE-CESTA	240	1800 ( 351)	25 - 0.2		max 550
<b>PETAL</b>		1	3 (1053)	0.005 - 0.0005		600 - 6000



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



Terčíková komora laseru Shiva během údržby.

Jméno zařízení	Země/Město/Laboratoř	Počet svazků	Výstupní energie [kJ] (na vln. délce [nm])	Délka pulzu [ns]	Opakovací frekvence [Hz]	Výkon [TW]
<b>PALS</b>	ČR/Praha/ÚFP&FZÚ AV ČR	1	bud' 1 (1315)	0.35		2.8
			nebo 0.55 ( 438)			1.6
		+	+	+		
		1	0.0005 ( 815)	0.00007		7
<b>ELI BEAMLINES</b>	ČR/Dolní Břežany/FZÚ AV ČR		bud' 2x 0.0002 ( )	0.00001	1000	2x 20
			nebo 2x 0.01 ( )	0.000015	10	2x 670
			nebo 2x 0.05 ( )	0.000015	10	2x 3300
			nebo 2x 0.2 ( )	0.000020	0.1	2x 10000
<b>ABC LASER</b>	Itálie/Rím/Frascati	2	2x 0.1 (1054)	3.0 - 0.8		2x (0.03 - 0.13)
<b>ISKRA IV</b>	Rusko/Sarov/RFNC-VNIIEF	8	2 (1315)	1		2
<b>ISKRA V</b>		12	30 (1315)	0.25		120
<b>LUČ</b>		1				
<b>ISKRA VI</b>		128	300 ( 351)	3 - 1		100 - 300
<b>KALMAR</b>	Rusko/Moskva/FIAN	9	0.15(1060)	1.5		0.1
<b>DELFIN</b>		108	1.5(1060)	1.5		1
<b>PROGRESS</b>	Rusko/St. Peterburg/NIIIEFA	6	. (1053)	0.2		
<b>SOKOL</b>	Rusko/Sněžinsk/RFNC-VNIITF	1	0.05(1060)	1		0.05
<b>SHENGUANG II (SG-II)</b>	Čína/Šanghai/SIOM	8	bud' 40 (1053) nebo 24 ( 351)	3		13 8
<b>GEKKO XII</b>	Japan/Osaka/ILE	12	10 ( 527)	2 - 1		5 - 10
		+				
		1	0.4 (1053)	0.0006		670
<b>FIREX-1 (LASER LFEX)</b>		4	10 (1053)	0.01		1000

## 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

nitou. Další sprcha na sebe nenechala dlouho čekat – byl snížen rozpočet NIF, 1. května 2013 dostal NIF nového ředitele (Eda Mosese vystřídal Jeff Atherton) a NIF se stal „Mezinárodním vědeckým zařízením“.

Příčina neúspěchu je jasná: nesymetrická (a tedy mnohem menší) komprese terče, což má za následek vmíchávání chladnějšího materiálu povrchové ablační vrstvy do horké oblasti v centru terče.

Příčina nesymetrické komprese však jasná není: ozáření terče je velmi symetrické a kromě toho koncept nepřímého ozáření terče by měl být méně citlivý k malým odchýlkám. Ve skutečnosti se terč při ozáření a počáteční symetrické kompresi začíná vraštit a deformovat do amorfního blobu (místo aby zachoval svůj kulový tvar): na povrchu terče se objeví malé hrby a ty pak exponenciálně rostou – malé pahrbky se stávají obrovskými horami, mělké pozvolné žlaby se stávají prudkými údolími.

Pro testování různých hypotéz byla:

- (1) postavena diagnostika na „rentgenování terče (backlighting)“ v osmi směrech v okamžiku, kdy se terč blíží svému maximálnímu stlačení,
- (2) používá se terč ve tvaru „klíčové dírky (key-hole target capsule)“ s kryogenicky vytvořenými slupkami pevného deuteria, resp. deuteria-tritia, měří se rtg re-emise pro stanovení symetrie ozáření (hlavně pokud jde o polární oblasti terče),
- (3) mění se časový tvar laserového pulsu, aby se začínalo s vyšší vnitřní energií v terči (vyšší adiabata – „high foot experiment“),
- (4) mění se tvar dutiny, ve které je terč umístěn – nejprve se mění délka válce, pak se mění celý

tvar (válec se zakulacuje do tvaru baseballového míče),

(5) u některých laserových svazků se o několik desetin nanometrů mění vlnová délka (tím se korigují malé nesymetrie v ozáření), atd.

Pravá příčina podstatně menšího neutronového výtěžku však zatím odhalena není (viz [https://lifers.llnl.gov/newsroom/project\\_status/2013/](https://lifers.llnl.gov/newsroom/project_status/2013/)). Přesto již půl roku po zkrácení rozpočtu NIF se ozývají hlasy, že by NIF i nadále měl mít prioritní podporu.

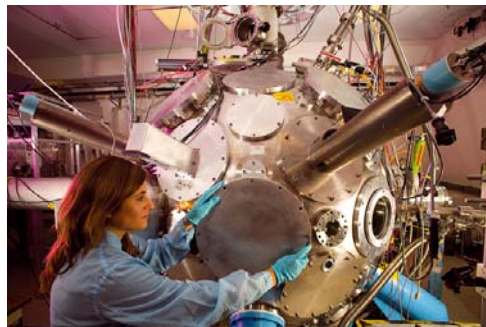
V roce 2008 se zrodil projekt LIFE – **L**aser **I**nertial **F**usion-**F**ission **E**nergy, což měl být hybridní reaktor na bázi NIF. Plány byly velkolepé – gigawatty po 24 hodin bez emisí a jaderného nebezpečí. LIFE měl v obalu spalovat odpad štěpných atomových elektráren a projekty dlouhodobých úložišť by bylo 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: **L**aser **I**nertial **F**usion **E**nergy má být mezinárodně mezi NIF a fúzní elektrárnou s reaktorem na bázi NIF. Koncept hybridního reaktoru byl opuštěn. V polovině dvacátých let má nový LIFE předvést všechny technologie požadované pro elektrárnu.

### MERCURY (DPSSL)

Dalším příspěvkem Lawrence Livermore National Laboratory k využití termojaderné fúze pro generaci elektřiny je projekt Mercury. Je to jednosvazkový systém. Zatímco NIF může štířlet jedenkrát za několik hodin, aby optika stačila



Terčíková komora laseru Trident.



Terčíková komora laseru Trident.

vychladnout, laser Mercury má vyvinutý systém kontinuálního chlazení (ofukování) optiky proudícím heliem, takže může pracovat s opakovací frekvencí 10 Hz. Kromě toho, zatímco NIF používá k pumpování aktivního prostředí (neodymem dopovaného fosfatového skla) 7 stop dlouhé výbojky, laser Mercury používá k pumpování ytterbium-strontium fluoroapatitových krystalů (které mají daleko větší tepelnou vodivost než fosfatové sklo) pole diodových laserů, jejichž laserová čára je přesně naladěna na absorpční pás shora uvedeného krystalu (proto DPSSL, „diode pumped solid state laser“). To přispívá k minimalizaci jeho ohřevu. Zároveň se zkoušejí další zesilovací média, jako jsou průhledné keramiky apod. Již v polovině roku 2008 byl laser Mercury schopen pracovat kontinuálně po několik hodin (300 tisíc záblesků) s opakovací frekvencí 10 Hz s pulzy 50 J/15 ns. Finálním cílem projektu je dosáhnout energie NIFu v repetičním provozu (optimálně 10 Hz) pro generaci elektrické energie v laserové elektrárně.

## TRIDENT

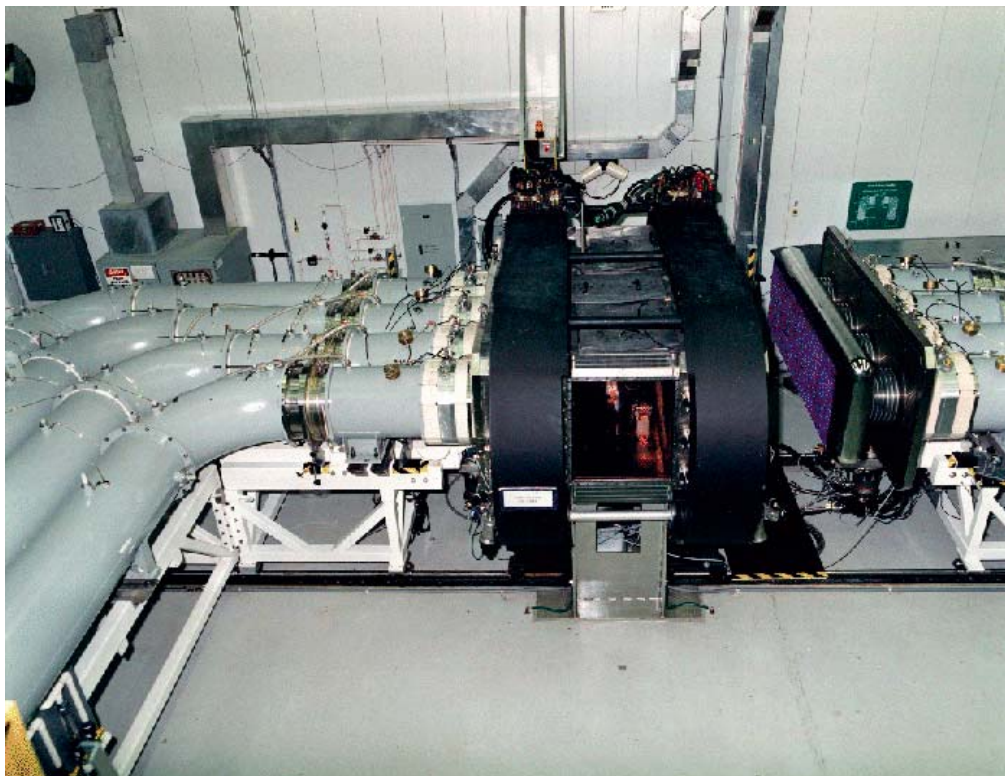
Laser Trident (od začátku devadesátých let v Los Alamos National Laboratory) byl zčásti postaven v sedmdesátých letech v Ann Arbor, Michigan soukromou firmou KMS, tehdy jako laser Chroma. Má tři zesilovací řetězce s neodymem dopovaným sklem. Prvé dva pracují v režimu „dlouhého pulzu“ s volitelnou délkou 100 ps až 1  $\mu$ s (tento rozsah je mezi výkonovými lasery světový unikát) a dodají na terč každý ~ 500 J

na základní frekvenci (1054 nm), nebo ~ 200 J na druhé harmonické frekvenci (527 nm). Třetí může pracovat buď v režimu „dlouhého pulzu“, kdy dodá na terč ~200 J na základní frekvenci (1054 nm), nebo ~100 J na druhé harmonické frekvenci (527 nm), nebo (od r. 2007) v režimu „krátkého pulzu“ (~100 J/~600 fs/170 TW; na terči  $1,7 \times 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>). K dispozici je i malý (100 mJ/500 fs) diagnostický svazek. Třetí svazek pracující v režimu krátkého pulzu drží světový rekord v urychlení iontů (generuje z rovinné folie protony s energií 58,5 MeV, z mikroželoového terče protony s energií 67,5 MeV) a má rovněž největší kontrast (lepší než  $10^9$  ASE) mezi ultra-výkonnými lasery na světě. Přitom právě vysoký kontrast je důležitý pro účinné „rychlé zapálení – fast ignition“. V současné době je laser Trident užíván jako uživatelské zařízení pro experimenty s rychlým zapálením, pro výzkum „horké husté hmoty (warm dense matter – WDM)“, dynamiky materiálů, interakce laserů s hmotou (včetně urychlení iontů, generace rtg záření a nestabilit).

## NIKE

Nike (podle řecké bohyně vítězství) je KrF laser plynový laser, jehož aktivním prostředím je směs kryptonu a fluoru pumpovaná elektronovým svazkem; jeho vlnová délka je 248 nm – leží tedy v blízké ultrafialové oblasti. Patří americkému námořnictvu (US Naval Research Laboratory), má 56 svazků, energii v pulzu 3 – 5 kJ a délku pulzu 4 ns. Laser byl





Zesilovač laseru Nike.

dokončen v roce 1995. Je zaměřen na výzkum termojaderné fúze s inerciálním udržením – jmenovitě s přímým ozářením („direct drive“). S tímto laserem bylo dosaženo extrémní homogenity ozáření terče (lepší než 1 %, v rámci jednoho svazku dokonce lepší než 0,3 %) a svazky se vzájemně překrývaly. Aby v místě překryvu nedocházelo k interferenci, jsou před terčem umístěny destičky posouvající v profilech jednotlivých svazků náhodným způsobem fázi. Říká se tomu „indukovaná prostorová nekoherence – induced spatial incoherence“. Tím se snižuje riziko rozvoje nejnebezpečnější nestability (Rayleigh-Taylor instability), díky níž se terč komprimuje daleko méně, než se při sférické implozi čeká.

Aby byl výzkum i při této omezené energii přínosný pro fúzi, je nutné odvodit správnou změnu měřítka. Buď je možné zmenšit všechny rozměry a časy nějakým faktorem  $e$  – pak je možné provádět experimenty s energií  $e^3$  krát menší. Nebo je možné zachovat délku a čas

a zmenšit prostorový úhel terče, který je ozařován – jinými slovy ozařovat rovinný terč. Každá z těchto cest má své výhody a nevýhody. Pro Nike byl zvolen rovinný terč.

### ELECTRA

Electra (mýtická princezna z Argosu, dcera Agamemnona a Clytemnestry) je rovněž KrF laser amerického námořnictva. Jeho projekt začal v roce 2000 s cílem vyvinout spolehlivý, vysoce energetický (400-700 J), KrF laser pracující v repetičním režimu (5 Hz) a s vysokou účinností – tedy s vysokým středním výkonem. Celková účinnost tohoto zařízení (od elektrické zásuvky po laserový svazek na terči) je větší než 7 %. Laser byl úspěšně testován v kontinuálním provozu 10 hod. K tomu bylo nutné vyvinout účinný napájecí systém (dvakrát 500 kV/100 kA/100 ns), emitér elektronového svazku, kterým se budí KrF směs plynů, Ti folii transparentní pro elektronový svazek, která odděluje vakuový prostor s generací elektronového svazku od



Electra Laser Facility.

prostoru s vysokotlakou (1,33 atm) KrF směsí plynu, a konečně optická okna odolávající velkým hustotám výkonu UV záření. Vysokonapětovými spínacími prvky jsou zatím jiskřiště, která značně omezují životnost zařízení. Ve vývoji jsou však pevnolátkové spínací prvky, které mají životnost větší než 300 milionů pulsů. Zmenšený demonstrátor této technologie (180 kV/5 kA – tj. 1/20 velikosti potřebné pro Electra) běžel nepřetržitě 13 dní s opakovací frekvencí 10 Hz (tj. více než 11,5 milionů pulzů).

Výsledky z Electry by měly umožnit stavbu dalšího zařízení s energií 50 – 150 kJ, dostačující pro element budoucí termojaderné elektrárny.

### PHAROS III

Pharos III patří námořnictvu USA (Naval Research Laboratory). Jeho podrobnější popis je utajen. Jediná zveřejněná informace je jeho energie (1,5 kJ) a výkon (5 TW) a že se zabývá výzkumem v oblasti vysoko-výkonových laserových systémů, rázových vln a turbulencí při extrémně vysokých Machových číslech (tj. při rychlostech mnohonásobně přesahujících rychlost zvuku v daném prostředí) a v oblasti jaderných zbraní.

### OMEGA

Laser OMEGA je postaven v Laboratoři pro laserovou energetiku (LLE), která patří pod Universitu v Rochestru a je umístěná v jejím jižním kampusu v Brightonu, stát New York, USA. Laboratoř byla založena v roce 1970 a jejím primárním cílem je výzkum fyziky interakce extrémně intenzivního laserového záření s hmotou – jmenovitě se zaměřením na termojadernou fúzi s inerciálním udržením s přímým ozářením terče („direct drive“).

Laser OMEGA má 60 svazků, které jsou schopny po konverzi do třetí harmonické dodat na povrch terče o průměru <1 mm energii 40 kJ (tj. výkon 60 TW). Jmenovitě zmíněná transformace do třetí harmonické (její účinnost je ~50 %) byla poprvé vyzkoušena právě na tomto laseru a znamenala účinnější ohřev terče díky dramatickému zmenšení stimulovaného Ramanova rozptylu. Ten je velmi účinný u delších vlnových délek a způsobuje generaci rychlých elektronů (na což se spotřebuje nezanedbatelná část dopadající laserové energie); navíc tyto rychlé elektrony předeheřejí centrální část terče, což zabrání jeho účinné kompresi. Konstrukce tohoto laseru byla ukončena v roce 1995 a od roku 1999 (rozebrání laseru NOVA) do roku 2005





Laser Vulcan.

(kdy bylo spuštěno prvních 8 svazků laseru NIF) držela OMEGA rekord v energii pulsu. Maximální fúzní výtěžek byl dosažen v roce 1995 ( $10^{14}$  neutronů za výstřel) a dlouho nebyl překonán.

V roce 2008 byl uveden do provozu čtyřsvazkový laser OMEGA EP (extended performance), jehož svazky jsou analogické svazkům NIF (dodávají multikilojouleovou energii), ale dva z nich jsou na výstupu časově komprimovány do pikosekundové délky pulzu. Tím se dosáhne petawatového výkonu a hustoty zářivé energie  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>.

Kombinace OMEGA a OMEGA EP umožňuje nejen časově rozlišenou diagnostiku (rtg zářením, nebo protonovým svazkem), ale i rychlé zapálení termojaderné směsi („fast ignition“).

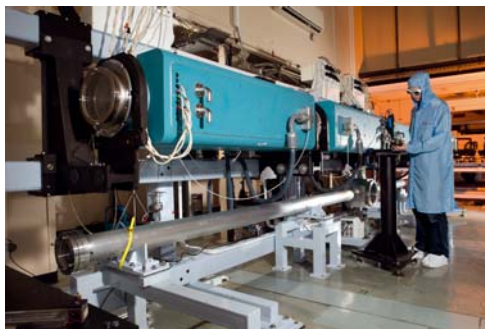
### VULCAN

Největší laser ve Velké Británii stojí v Rutheford Appleton laboratoři (RAL) v Oxfordshire, UK. VULCAN má 8 svazků, které mají na své základní frekvenci v 2 ns pulzu energii 2,5 kJ a na druhé harmonické cca 1 kJ. Dva z jeho svazků „Vulcan petawatt“ je také možno zkrátit na 500 fs; energie se při tom sníží na 700 J.

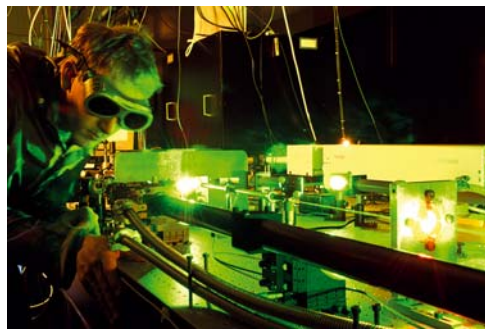
Specialitou VULCANu je alternativní způsob „rychlého zapálení (fast ignition)“: zatímco klasická metoda rychlého zapálení používá záření femtosekundového laseru, RAL zkoumá možnosti použití svazku urychlených protonů. V roce 2005 měl VULCAN rekordní hodnotu hustoty výkonu  $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>.

### ASTRA & ASTRA GEMINI

Pulzy z TiSa (Titan-safírového) oscilátoru ASTRA jsou extrémně krátké (12 fs), ale časté (mají opakovací frekvenci 1 kHz). Tyto pulzy jsou nejprve roztaženy asi na 7 ps a pak jsou zesíleny na energii tisíců Joule. Z této řady pulzů vybere rychlá Pockelsova cela zhruba každý stý, takže se opakovací frekvence sníží na cca 10 Hz. Tyto pulzy se pak dále roztáhnou (s použitím optické zpožďovací linky, jejíž zpoždění je závislé na vlnové délce) na 1,06 ns. Takto dlouhé pulzy se pak zesílují do několika Jouleové energie; kdyby se pulzy neroztáhly, překročila by hustota výkonu práh pevnosti použitých materiálů. Po třetím zesílovací se vybrané pulzy (max 2 Hz) posílají buď do evakuovaného experimentálního prostoru ASTRA, kde jsou komprimovány na cca



Zesilovače laseru Vulcan.



Zařízení Astra Gemini.

40 fs a fokusovány na terč, nebo se posílají (od r. 2008) do navazujícího zařízení ASTRA GEMINI.

Zařízení ASTRA GEMINI se skládá z páru TiSa zesilovačů, každý se svým vlastním pumpovacím laserem a se svým vlastním kompresorem. Dvojice svazků byla vybrána proto, aby se zvýšila flexibilita laserového systému a tím i variabilita experimentů: Dva svazky umožňují kombinaci dlouhého a krátkého pulzu, různé ohniskové dálky, variaci vzájemného časování pulzů, míchání polarizací apod. Každý ze svazků je schopný dodat na terč 15 J/30 fs, tj. špičkový výkon 0,5 PW. Maximální fokusovaná hustota výkonu je  $\sim 10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>, tedy o řád vyšší než Vulcan Petawatt. Na začátku projektu byla opakovací frekvence pulzů jeden pulz za minutu, později se jí podařilo zvýšit na jeden pulz za 20 vteřin.

### HiPER

Koordinátorem projektu **High Power laser Energy Research facility**, do kterého je zapojena i Česká republika, je Spojené království. Projekt začal v říjnu 2006 přijetím do plánu budoucích výzkumných infrastruktur v ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures). 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.

Projekt má tři fáze. První přípravná fáze by měla končit v letech 2013 – 2015; jejím cílem je rozpracování projektu a vypracování byznys-plá-

nu, který ospravedlní investici. Zároveň budou vytvořeny vazby s průmyslem, širokou vědeckou obcí a investory. Tato fáze bude končit demonstrací zapálení na některém z velkých zařízení (NIF, Laser Mégajoule (LMJ)). Druhá fáze bude sledovat dvě témata: ověření fyzikálního schématu (2013 – 2027) a vývoj technologií (2014 – 2030). Pokud jde o fyzikální schéma, pro HiPER bylo vybráno přímé ozáření terče laserovými svazky a rychlé zapálení sféricky symetrickou rázovou vlnou; nevylučuje se ani rychlé zapálení elektrony nebo protony. Před spuštěním LMJ (2016) budou experimenty probíhat na středně velkých zařízeních PALS (ČR), PeTAL (Francie), Vulcan, Orion (obě UK) a Omega (USA). Jakmile se numerické modely a menší experimenty dostatečně prověří, začne kampaň „zapálení“ na LMJ. Vývoj technologií zahrne

- (1) vývoj další generace vysoce účinných laserů schopných pracovat v repetičním režimu s vysokým špičkovým výkonem (to je nezbytná podmínka pro stavbu laserových elektráren),
  - (2) vývoj laciné (cca 10 centů/ks) masové produkce laserových terčů (životnost terče se předpokládá 24 hodin, životnost náplně terče se očekává 6-8 hodin),
  - (3) vývoj fúzní komory, která musí přežít v prostředí opakovaných slučovacích reakcí, musí zajistit recirkulaci a plození tritia a konečně musí zajistit extrakci vyprodukované energie.
- Třetí fáze projektu (2022 – 2040) počítá s finalizačním plánem (2022 – 2027), investičním rozhodnutím (2027/2028), stavbou a uvedením do provozu zařízení HiPER (2028 – 2040). Zpočát-



Laserová hala Národního  
zapalovacího zařízení NIF.

ku bude provoz v režimu opakované řady pulsů (burst mode), aby se systém otestoval a prověřil koncept reaktoru, potom budou laserové paprsky přesměrovány do druhé komory vybavené tritium-plodící výstélkou (blanketem) a systémem extrakce energie. Tato komora bude navržena pro dlouhodobý provoz, aby prověřila činnost, spolehlivost a schopnost údržby.

Významnou charakteristikou pro HiPER je jeho výhradně civilní využití, které zahrnuje vedle fúze také astrofyziku, atomovou a jadernou fyziku. Rozdělení stlačení (nanosekundový laserový impuls/250 kJ) a zapálení (15 ps/70 kJ) vede ke snížení nákladů – díky nižší potřebné energii laseru.

Laser HiPER přináší příležitosti pro průmysl v oblasti vývoje nových technologií a materiálů. Zmíňme přesné obrábění, laserové úpravy materiálů vysoce namáhaných prvků, zdroje rtg a gama záření, lékařské systémy, kosmické technologie, zobrazovací bezpečnostní systémy. Zvláště důležitá sféra spolupráce se rýsuje při vývoji odolných optických vrstev, diodovém čerpání laserů, masové výrobě přesných laserových terčů, metrologii, dálkovém ovládní, stavbě experimentální komory, kryogenice a tritiové technologii.

HiPER přináší i vědecké výzvy: přestože jeho primárním účelem je demonstrace technologické možnosti a ekonomické rentability laserem

iniciované fúze, HiPER umožní i studium hmoty v extrémních podmínkách (v dosud nedosažitelných vysokých tlacích a teplotách), dodá intenzivní toky 14 MeV neutronů, vysoce energetických iontů, rtg a gama záření. Jeho repetiční provoz umožní detekci dosud nepozorovatelných jevů.

HiPER bude však také požadovat velký počet vysoce kvalifikovaného personálu – vědců, technologů a inženýrů. K tomu bude třeba rozpracovat rozsáhlý školicí program zajišťující výcvik další generace specialistů v laserových technologiích, mikrofabrikaci, přesném strojírenství, fyzice plazmatu a jaderném inženýrství. Předskokanem HiPER je laser PETAL, umístěný v Aquitaine (Francie). PETAL (Petawatt Aquitaine Laser – viz podrobněji u LMJ (Francie) je rovněž navržený pro studium rychlého zapálení.

<http://www.hiper-laser.org/News%20and%20events/100imagegallery.html>

### ORION

Laser Orion patří společnosti AWE (Atomic Weapons Establishment – Podnik pro atomové zbraně) a je umístěn v Aldermaston (Spojené království). Laser má 10 svazků s dlouhým pulzem (~1 ns), z nichž každý může dodat na terč 500 J ultrafialového záření a 2 svazky s krátkým pulsem (~500 fs), z nichž každý může dodat



Laser ORION v Aldermastonu, Spojené království patří společnosti AWE (Atomic Weapons Establishment).

na terč 500 J infračerveného záření. Ke stavbě je použita poslední špičková technologie: CPA (chirped pulse amplification), adaptivní optika, komprese pulzu pozlacenými difrakčními mřížkami o průměru 1 m, ultračisté prostory pro speciální komponenty, atd.

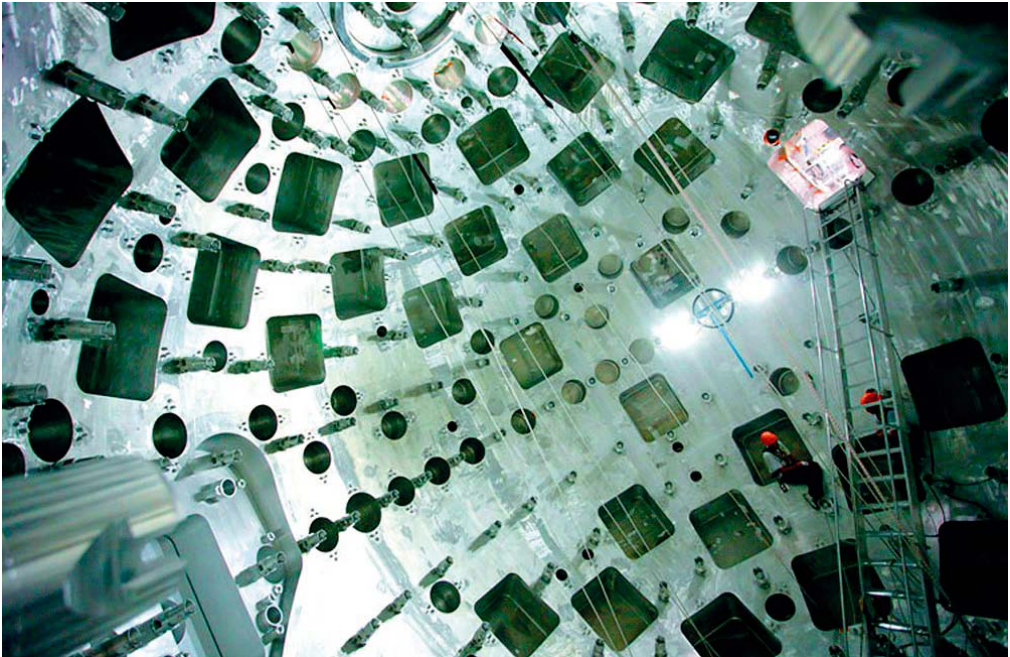
Prvotním cílem tohoto laseru (85 % jeho času) je zachování důvěry v bezpečnost a akceschopnost jaderných zbraní Velké Británie po zákazu zkoušek jaderných zbraní. Simulace podmínek výbuchu jaderných zbraní pomohou zdůvěryhodnit počítačové kódy, které výbuch za různých podmínek simulují.

Zbylých 15 % laserového času je věnováno akademické komunitě na výzkum vývoje hvězd, chování super-husté hmoty a vysokoteplotních systémů, na studium urychlení částic, generace koherentního rtg záření, výrobu krátce-žijících izotopů apod. Tato moderní témata pomohou univerzitám přitáhnout nadané studenty, z nichž pak alespoň část může najít uplatnění právě v AWE.

### LASER MÉGAJOULE – LMJ

Celkem 36 km od letiště Gironde-Bordeaux leží městečko Le Barp, kde se staví neodymový LMJ (Nd laser Mégajoule) s účtyhodnými 240 svazky. 4000 m<sup>2</sup> plochy zrcadel bude umístěno v hale o ploše 300x150 m. Po 100 m optické dráhy by měl mít jeden svazek průměr 40 cm a celková energie všech svazků po konverzi na třetí harmonickou frekvenci o vlnové délce 0,351 μm bude 1,8 MJ. Délka impulsu bude měnitelná od 0.2 ns do 25 ns, předpokládáný maximální výkon je 550 TW a maximální počet pulsů za rok bude 600. Terčíková komora počítá s průměrem 10 m. Fyzikální model bude "indirect drive", podobně jako u NIF, protože lépe simuluje poměry v termojaderných zbraních. Francouzský vojenský rozpočet zaplatí za obdobu amerického NIF 1,5 miliardy dolarů. CEA/CESTA (Commissariat à l'énergie atomique/Centre d'Etudes Scientifiques et Techniques d'Aquitaine) začala stavět v roce 1999, na rok 2006 byl naplánován první experiment s energií 600 kJ, v roce 2010 výstřel s energií 2 MJ a konečně v roce 2012 zapálení D-T paliva.





Vnitřek terčové komory Laser Megajoule.

V současné době je z mimořádně kusých zpráv zřejmé, že LMJ má zpoždění. V roce 2012 se píše o zprovoznění 2 laserů (quadů) celkem o 8 svazcích v roce 2014 (celkem  $60 \text{ kJ}/351 \text{ nm}/(0,2 - 25) \text{ ns}/10^{15} \text{ W}/\text{cm}^2$ ); v dalších letech bude k dispozici 22 laserů pro fúzní experimenty testující zisk.

Nyní se v laserové hale 2 (jedné ze čtyř laserových hal LMJ) instaluje laser PETAL (PETawatt Aquitaine Laser), multi-petawattový laser, který má zesilovací sekci generující  $6,4 \text{ kJ}/1,7 \text{ ns}$ , jež se v kompresní sekci přemění na  $3 \text{ kJ}/500 \text{ fs}$ . To po fokusaci může vytvořit na terči hustotu zářivého výkonu  $10^{20} \text{ W}/\text{cm}^2$  (s vlnovou délkou  $1053 \text{ nm}$ ). První experimenty s laserem PETAL jsou plánovány na rok 2015. Jeho primární použití je rychlé zapálení ("fast ignition"), rtg diagnostika ("backlighter"), astrofyzika a studium horké husté hmoty ("warm dense matter" WDM).

V roce 2002 byl zprovozněn LIL – Laser Integration Line, což je jeden svazek LMJ s plnými parametry.

K projektu LMJ by měl být v budoucnu připojen ještě laser PETAL. Dvojice laserů LMJ a PETAL

má zkoumat fyziku a vyvíjet laserovou technologii, která bude v budoucnu využita v navazujícím zařízení HiPER.

### PALS

Pod touto zkratkou se skrývá jeden z největších evropských laserů Prague Asterix Laser Systém, 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 Asterix IV postaveného v Garchingu u Mnichova (Německo), odkud byl laser převzat.

PALS je fotodisociační laser, v němž se UV zářením výbojek uvolňují z plynných molekul  $\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$  excitované atomy jódu a tím se automaticky vytváří populační inverze této excitované hladiny k základní hladině jódu. Vlnová délka laseru je  $1,315 \mu\text{m}$ ; leží tedy v blízké infračervené oblasti. Výstupní energie laseru je  $1 \text{ kJ}$  při délce pulzu  $350 \text{ ps}$ , výstupní výkon je  $2,8 \text{ TW}$ , průměr výstupního svazku je  $290 \text{ mm}$ , účinnost konverze do třetí harmonické frekvence je  $55\%$ . Sou-



Hala laseru PALS.

běžně s hlavním pulzem může být generován pomocný pulz o energii 100 J, průměr svazku 148 mm, účinnost konverze do třetí harmonické je 30%. V roce 2012 se podařilo s jódovým laserem synchronizovat femtosekundový TiSa laser (0.5 J (815 nm)/70 fs), jehož oscilátor pracuje v repetičním režimu. Nyní je tedy možné zkoumat časový vývoj laserového plazmatu i v průběhu interakce hlavního laserového pulzu s terčem. Experimentální komora má jednak kulovou část o průměru 1 m a válcovou část  $\varnothing 65 \times 124$  cm, které mohou být vzdáleny 95 cm až 5 m.

V roce 2004 se stal PALS 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 laser, zařízení ELI Beamlines, jež bude součástí celoevropského projektu ELI (Extreme Light Infrastructure).

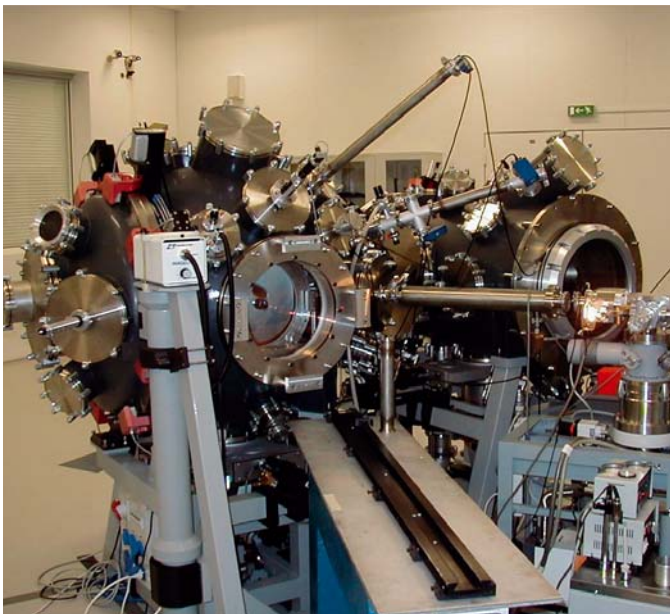
### ELI (EXTREME LIGHT INFRASTRUCTURE)

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





Dvojice experimentálních komor laseru PALS.

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 mj. dva deseti-petawatové bloky, které poskytnou energii 200 až 300 J v pulzech trvajících 20 – 30 fs a opakovací frekvencí 0,1 Hz. Prvá sekce laseru („front end“) poskytne vysoce-contrastní pulzy 10 mJ/1 kHz/5 fs. Ty mohou být přivedeny na 3 předzesilovače pracující na principu „Petawat Field Synthesizer“ s čerpáním diodami pumpovanými pevnolátkovými lasery. První předzesilovač dodá 2 svazky 200 mJ/1 kHz/10 fs přímo na zrcadlový distribuční panel, který je bude moci směřovat na kterékoli ze 4 uživatelských pracovišť.

- Aplikace (molekulární, biomedicínské a materiálové vědy),
- Generace XUV a rtg záření
- Urychlení elektronů a protonů
- Fyzika plazmatu a „horké husté hmoty (Warm Dense Matter - WDM)“

Výstup druhého předzesilovače (1 – 2 J/100 Hz/15 fs) může být přiveden na jeden ze dvou výkonových zesilovačů (oba z nich pracují na principu „Optical Parametric Chirped Pulse Amplification“ s čerpáním diodami pum-

povanými pevnolátkovými lasery). Jeden z nich dodá na zrcadlový distribuční panel 2 svazky s pulzy 10 J/10 Hz, druhý z nich opět 2 svazky, ale s pulzy 50 J/10 Hz.

Výstup třetího předzesilovače (1-2 J/100 Hz/15 fs) je veden na dvojici deseti-petawatových bloků (TiSa nebo OPCPA, pumpované výbojkami), z nichž každý dodá na páté uživatelské pracoviště

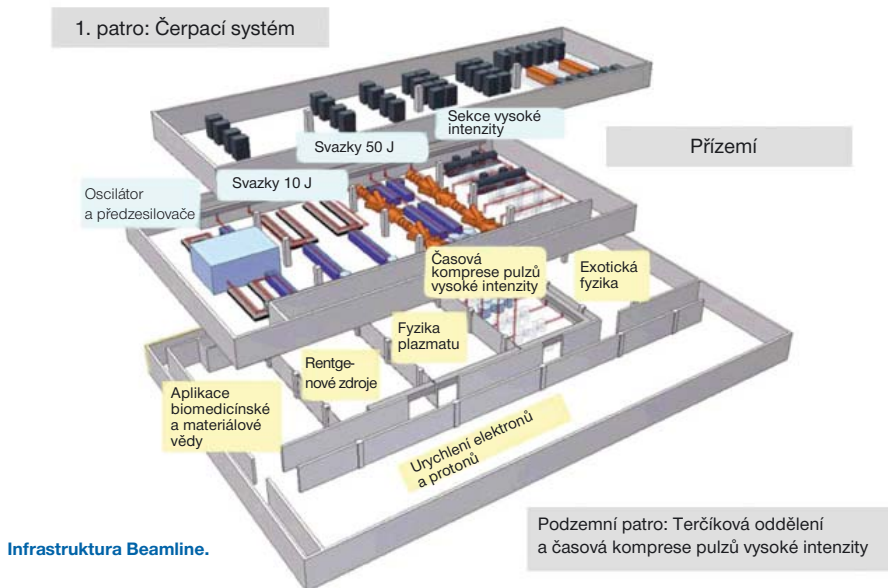
- Testování vysokých špičkových výkonů a exotická fyzika

pulzy 200 J/0,1 Hz.

### ABC LASER

Ve srovnání s nasazením v oblasti magnetického udržení je oblast inerciálního udržení v Itálii jen slabým odvětvem. V ENEA Frascati Research Centre stojí 2-svazkový ABC laser s diagnostickým prostorem vybaveným mj. rtg kamerou. ABC laser pracující na neodymem dopovaném skle má v každém svazku 100 J, délku pulzu 0,8-3,0 ns (plná šířka v polovině maxima) s možností rozšíření pulzu o 0,5 až 1,5 ns. Laser má možnost konverze do druhé harmonické frekvence a má systém pro homogenizaci rozložení hustoty energie.

Interakce záření s hmotou se studuje pomocí sekundárního svazku odděleného v předzesilo-



vacím stupni a upraveného samostatně ( $\lambda = 527 \text{ nm}$ , délka pulzu  $0,5 \text{ ns}$ ). K dispozici jsou rutinní diagnostiky – interferometrie, rtg měření a zobrazování, měření energie generovaných částic apod. Itálie se také aktivně podílí na termojaderném výzkumu na zahraničních zařízeních a na evropském projektu HiPER.

### ISKRA-5

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

studenti sovětských vysokých škol dostávali své umístěnky. Jen v laserové části výzkumného ústavu pracovalo 25 000 lidí. VNIIEF je znám svým pionýrským výzkumem přímé přeměny energie štěpné jaderné reakce na světlo. Prvním větším laserem zde byl jódový fotodisociační laser ISKRA-4, dokončený roku 1979, který měl nejprve jeden, později 8 svazků, výstupní energii  $2 \text{ kJ}$  a délku pulsu cca  $1 \text{ ns}$ ; na něm byly získány první termojaderné neutrony z implodujícího DT terče již v roce 1981. Od roku 1989 VNIIEF provozuje největší evropský laserový systém ISKRA-5, což je rovněž jódový fotodisociační laser, tentokrát s 12 svazky, celkovou energií  $30 \text{ kJ}$ , délkou pulzu  $0,25 \text{ ns}$  a špičkovým výkonem  $100 \text{ TW}$ . Maximální fúzní výtěžek je  $10^{10}$  až  $10^{11}$  neutronů za výstřel. Zdrojové kondenzátory se nabíjejí na  $67 \text{ MJ}$  (což odpovídá účinnosti systému  $0,022 \%$ ). Vlnová délka laserového paprsku je  $1,315 \mu\text{m}$ . Laserový systém je zaměřen na výzkum fúze. Po rekonstrukci má ISKRA-5 možnost generovat dva výkonové pulzy za sebou s odstupem až 10 mikrosekund. To umožní experimenty na jiných zařízeních neproveditelné. Následný laser

ISKRA-6 již má být postaven na Nd-dopovaném skle, má mít 128 svazků a schopnost dodat na terč cca 300 kJ na 3. harmonické (vlnová délka 351 nm) s délkou pulzu 1-3 ns. Jeho první testovací svazek se jmenuje LUC.

### DELFIN

Přestože největší laser v Ruské federaci stojí nyní v RFNC-VNIIEF v Sarově, ruským (sovětským) průkopníkem využití laserů pro řízenou termojadernou fúzi byl Fyzikální ústav Akademie věd (FIAN) v Moskvě pod vedením akademika N. G. Basova. Prvou aparaturou v bývalém Sovětském svazu schopnou sféricky ozařovat termojaderný terč bylo devítisvazkové zařízení KALMAR<sup>34</sup> (1972-1985). Neodymem dopované skleněné tyče jeho zesilovačů měly průměr 45 mm a jejich oba konce byly seřiznuty pod Brewsterovým úhlem (aby se potlačily odrazy na jejich čelech). Zesilovače tedy střídavě mířily šikmo ke stropu a šikmo k podlaze a celá sestava tím dostala velice dynamický ráz připomínající rozvlněnou mořskou hladinu. Byla schopna dodat na terč 150 J v pulzu dlouhém 1.5 ns – tedy výkon 0.1 TW. Studovala se symetrie ozáření terče a byly pozorovány

i první termojaderné neutrony ( $10^7$  neutronů za výstřel – tedy přibližně jeden řád nad tehdejší šumem pozadí). Povzbuzen tímto úspěchem postavil FIAN další aparaturu – 108 svazkové zařízení DELFIN (1983-1992). Stavebním prvkem byly stejné laserové tyče, nyní však seřiznuté jen pod několika málo stupni, takže nastavování bylo daleko méně kritické. Energie na terči byla 1.5 kJ při stejně dlouhém pulzu (1.5 ns); divergence svazků se zmenšila, takže fokusovaná hustota výkonu byla tehdy slušných  $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>. To mělo za následek o dva řády větší neutronový výtěžek –  $10^9$  neutronů za výstřel. Přes nesporné úspěchy v diagnostice ozáření terče a interpretaci výsledků (nelinearita interakce laserového záření s plazmatem) byla zanedbána automatizace navádění laserových svazků na terč a termojaderně-orientovaný výzkum ve FIANu na počátku devadesátých let minulého století skončil.

[http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4684-8103-7\\_2#-page-2](http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4684-8103-7_2#-page-2)

34 Kalmar v biologii je velký měkkýš, hlavonožec, patří mezi krakatiče, dosahuje s chapadly délky kolem 10 m a váží až 450 kg. Kalmar Hamiltonův má 10 chapadel.

### PROGRES

Zařízení PROGRESS je postaveno ve St. Petěrburgu v NIIEFA (Naučno-issledovatel'skij institut elektrofizičeskoj aparatury). Je to velice utajovaný podnik, kde se vyrábí ta největší experimentální zařízení - dříve pro celé teritorium SSSR (jako příklad uveďme urychlovač ANGARA-5 pro Kurčatovův ústav atomové energie), nyní pro celé Rusko. PROGRESS je šestisvazkové zařízení s délkou pulzu 200 ps určené pro studium horkého, hustého plazmatu.

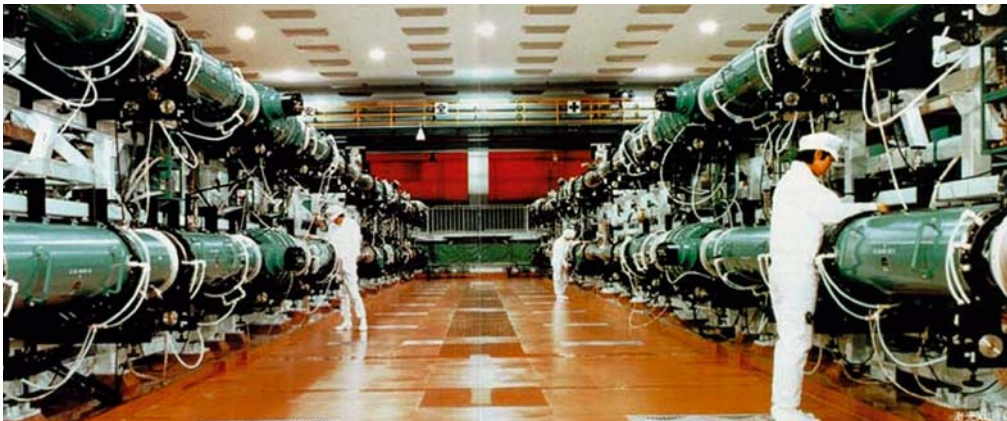
### SOKOL

Zařízení SOKOL se nachází v RFNC-VNIITF (Ruskij federativnyj naučnyj centr Vserusskij naučno-issledovatel'skij institut techničeskoj fiziki) ve městě Sněžinsk (Čeljabinská oblast v podhůří Uralu). Toto jméno i statut města (dosud uzavřeného) dostal Sněžinsk až v roce 1993. Do té doby mělo název Kasil-2 (1957-1959), Čeljabinsk-50 (1959-1966) a Čeljabinsk-70 (1966-1993). Město a celá uzavřená oblast je pod přímou správou Federální agentury pro atomovou energii Rosatom. Laser Sokol má 1 svazek, výstupní energii 50 J a délku pulzu 1 ns. Je rovněž určen ke studiu horkého hustého plazmatu.

### SHENGUANG II (SGII)

Šanghajský ústav optiky a jemné mechaniky (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics - SIOM) Čínské akademie věd je jedna

z nejstarších (založená v roce 1964) a největších (více než 800 zaměstnanců) institucí zabývajících se lasery a laserovými technologiemi v Číně. Jedním z jeho oddělení je Spojená laboratoř vysokovýkonných laserů a fyziky, kde byla postavena zařízení řady Shenguang zaměřená na výzkum termojaderného slučování s inerciálním udržením. Zařízení Shenguang-II (SG-II) bylo postaveno v roce 2001 s 8 svazky, které byly schopné dodat v 1 nanosekundě na terč energii 6 kJ. Špičkový výkon byl 10 TW a účinnost konverze do třetí harmonické byla 65 %. V pozdější době byl systém doplněn o 9. svazek vyvinutý jednak pro aktivní diagnostiku termojaderného plazmatu, jednak jako zárodek nové sub-nanosekundové laserové technologie určené pro čínskou termojadernou fúzi s inerciálním udržením. Nyní po inovaci má zařízení SG-II v 8 svazcích výstupní energii 40 kJ ve 3 ns na základní frekvenci a energii 24 kJ opět ve 3 ns na 3. harmonické. Podobné zařízení bylo vybudováno Čínskou akademií inženýrské fyziky (Chinese Academy of Engineering Physics) i u města Mianyang v horách severovýchodně od Cheng-Du (Southwest Institute of Fluid Physics). V současné době je však už v projektech zařízení nové generace, které zařadí Čínu mezi velmoci v tomto oboru.



Laserný systém GEKKO XII v japonské Ósace.

## GEKKO XII

GEKKO XII je japonský 12ti svazkový laserový systém pracující od roku 1983 v Ústavu laserového inženýrství Ósacké university s energií 10 kJ v druhé harmonické frekvenci neodýmým dopovaného skla, délkou impulsu 1 – 2 ns, tj. se středním výkonem 10 – 20 TW. Jeho primárním zaměřením je fyzika vysokých hustot energie a termojaderná fúze s inerciálním udržením. Používá schéma s přímým ozářením terče (“direct drive”). V letech 1996-1997 byl laser doplněn o další svazek ~0,4 kJ/0,6 ps (tj. ~0,67 PW) s velice krátkou délkou impulsu. S ním byl poprvé na světě vyzkoušen nový koncept rychlého zapálení (“fast ignition”): to od sebe odděluje fázi komprese (do tisícinásobku hustoty pevné fáze) a předehřátí celého (v tomto případě deuterizovaného polystyrénového) terče. V okamžiku maximálního stlačení přichází výkonný krátký puls nového svazku, který proniká otevřeným kuželem do centra terče a zajistí dodatečný ohřev dostatečný pro vlastní zapálení stlačené horké centrální části. Odtud se pak slučovací reakce rozšíří do zbytku terče – tak zvaná řetězová slučovací reakce. Použití této techniky zvýšilo neutronový výtěžek CD terče o 3 řády (z  $10^4$  na  $10^7$  neutronů za výstřel).

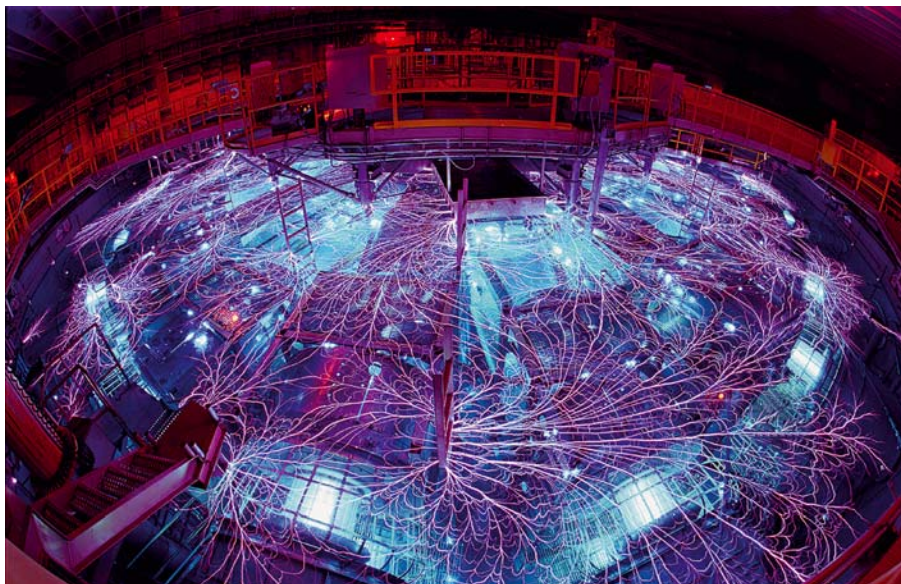
Na základě těchto optimistických výsledků byl zahájen v roce 2003 projekt FIREX-I (Fast Ignition Realization Experiment) k prokázání ohřevu termojaderné směsi do teplot 5 – 10 keV no-

vým, 10 kJ/10 ps PW laserem LFEX (Laser for Fast Ignition Experiment); energetický výtěžek Q by měl krýt desetinu energie potřebné pro laserový výstřel ( $Q \sim 0,1$ ). V případě úspěchu by měl projekt FIREX-II zvýšit energii kompresního i ohřevového laseru na 50 kJ a energetický výtěžek by měl dosáhnout jedničky ( $Q \sim 1$ ).

Laser LFEX byl uveden do provozu v březnu 2009. Má 4 svazky; zatím pouze 2 z nich jsou časově komprimovány (z 2,2 ns na 1,2 ps) a fokusovány do jednoho bodu. První interakční experimenty byly provedeny v roce 2010 s terčem  $\varnothing$  500  $\mu$ m krytým slupkou silnou 7  $\mu$ m z deuterizovaného polystyrénu a zlatým kónickým světlovodem pro „fast ignition“. Iontová teplota (odvozená od neutronového výtěžku) byla ~ 0,7 keV při energii ohřevového svazku 0,4 kJ a potvrzuje původní předpoklad, že při zvýšení energie ohřevu na 10 kJ (zvýšením počtu ohřevových svazků) dosáhne iontová teplota zápalné hodnoty 5 keV.

Úspěšné ukončení projektu FIREX by mělo pokračovat projektem laserového fúzního experimentálního reaktoru LIFT (s vysoce repetičními lasery, injekcí terče, jeho zasažením lasery a novou terčikovou komorou s odvodem vyprodukované energie) s cílem demonstrace kladného energetického výkonu 10 MW kolem roku 2030.





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

## SVAZKY LEHKÝCH IONTŮ/Z-PINČE

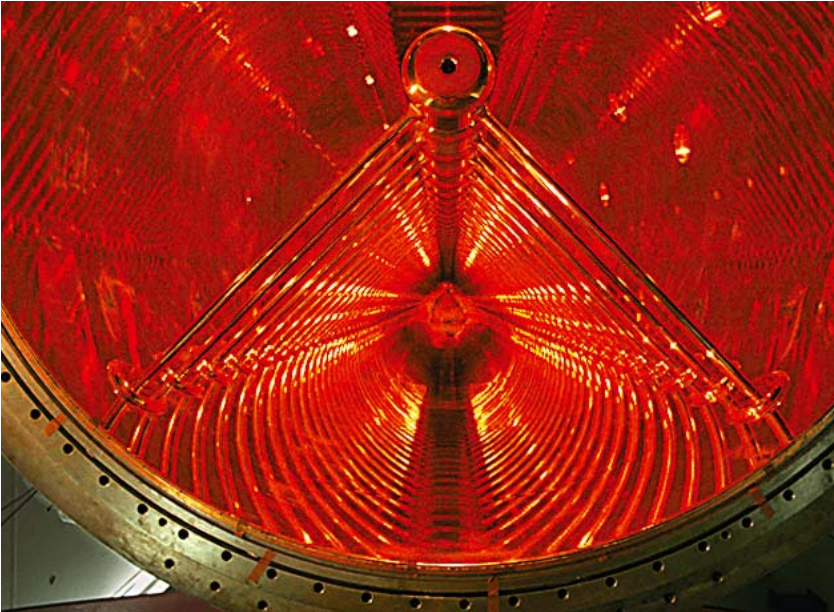
### PBFA II

#### Particle Beam Fusion Accelerator – Z-Machine

Největší ICF (Inertial Confinement Fusion – fúze s inerciálním udržením), dodavatel energie, jaký byl kdy postaven, vlastnila od roku 1983 laboratoř Sandia National Laboratory v Albuquerque, New Mexico, USA. Do terčíku byl schopen předat 1 MJ energie iontů lithia při plošné hustotě výkonu až  $2 \text{ TW/cm}^2$ . V roce 1996 byla zahájena přestavba zařízení PBFA II na z-pinč nazvaný Z-machine. To proto, že proudový impulz se k terčíku přiváděl svislým směrem, což fyzikové a matematici nazývají souřadnicí  $z$  (na rozdíl od vodorovné roviny určené souřadnicemi  $xy$ ). Terčík představuje váleček, na jehož plášti je 360 wolframových, 1 cm dlouhých drátků o síle desetiny průměru lidského vlasu. Tímto terčíkem během impulzu trvajícího 100 ns proteče 20 MA/50 000 GW. Terčík je ponořen do kovové schránky zvané hohlraum. Napětí je k terčíku 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 tří 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 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.



Detail urychlovače těžkých iontů zařízení GSI v Darmstadtu.

## SVAZKY TĚŽKÝCH IONTŮ

### IRE

#### Integrated Research Experiment

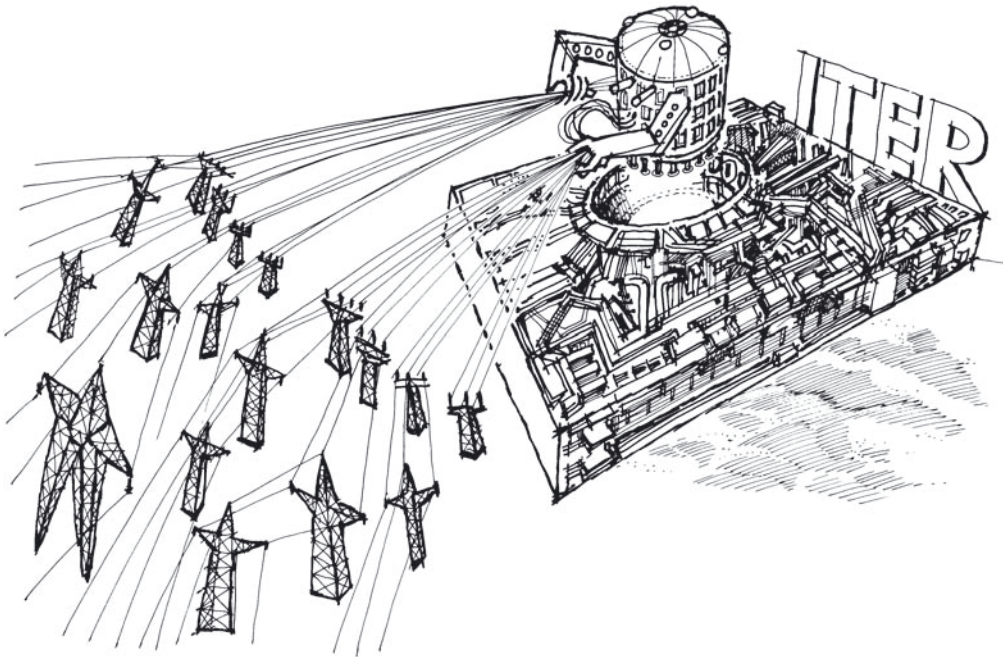
Virtual National Laboratory navrhuje vícekanálové experimentální zařízení IRE (něco jako ITER v magnetické fúzi) používající k ohřevu terčíku svazek cesiových iontů. Proud 100 A má mít energii nejméně 100 MeV, s plošnou hustotou výkonu 3 TW/cm<sup>2</sup> a celkovou energií několika MJ. IRE by měl být 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“ 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



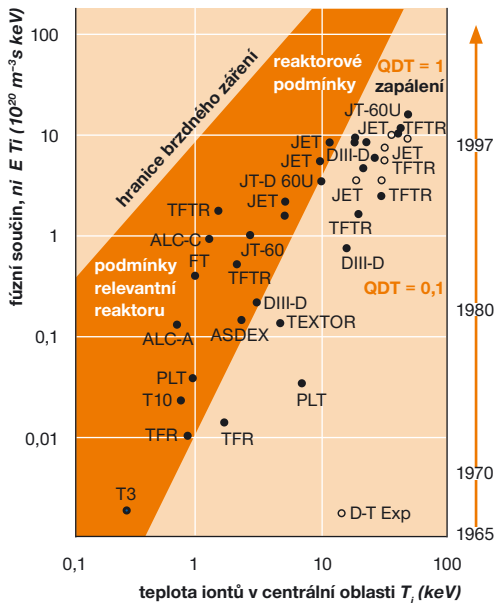


„První plazma“  
mezinárodního  
tokamaku  
ITER – Cadarache,  
Francie

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 **I**nternational **T**hermonuclear **E**xperimental **R**eactor – 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 prezidentu Ronaldu Reaganovi. V té Ženevě, kde se 27 let 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 (**I**nternational **T**Okamak **R**eactor). Na tomto projektu se fyzici vyučili spolupráci v dosud nebyvalém rozsahu, a i když INTOR skončil do ztracena bez jakéhokoli konstrukčního výsledku, byla to před





Energie urychlovačů částic se zdvojnásobuje každé tři roky, hustota tranzistorů na čipu každé dva roky a hodnota fúzního součinu – hustoty iontů  $n_i$ , doby udržení energie  $\tau E$  a teploty iontů  $T_i$  – měřítko pokroku výzkumu fúze – každého 1,8 roku. Na mapě „fúzní součin vs teplota iontů“ jsou zakresleny výsledky dosažené na jednotlivých experimentálních zařízeních.

ITER poučná etapa. Ono totiž životaschopně propojit teoretiky, experimentátory a inženýry, navíc z různých zemí, není vůbec jednoduché. Výstižně tuto situaci popsala karikatura ve sborníku jedné z konferencí. Teoretik nakreslil jednoduchý náčrt zachycení nabitě částice magnetickým polem, čímž byl pro něho problém principiálně vyřešen. Experimentátor v laboratoři plně neuvěřitelně zamotaných drátů, přístrojů roztodivných tvarů, krabic a dalšího zmatku považoval vlastní realizaci za rutinní práci inženýrů. Inženýr navrhl krásný klimatizovaný sál, kde uprostřed stála velká lesknoucí se krabice, v níž se „nějak“ uvolňovala termojaderná energie.

V roce 1998 byly parametry projektovaného zařízení ITER známy: proud plazmatem 22 MA, objem plazmatu 2000 m<sup>3</sup>, fúzní výkon 1500 MW,  $Q$  nekonečné a současně i náklady ve výši šesti miliard dolarů. Viz **Podobnostní zákony**, str. 207.

Ve Spojených státech zvítězila republikánská strana, která tvrdě omezila dotace civilní varianty termojaderného výzkumu – magnetického udržení. Relativní dostatek energie po celém světě – ropné krize 1973 a 1980 už zmizely v propadlišti dějin – nenutil politiky ani vně USA

udržovat podporu termojaderného výzkumu na stejné výši jako dosud, natož ji zvyšovat. Zkrátka, USA od projektu ITER odstoupily a ochabovat začaly i zbývající státy: Rusko, Evropská unie, Kanada (v rámci EU) a Japonsko. Byla sestavena speciální skupina odborníků (Special Working Group), která měla za úkol posoudit, zda projekt obrovského tokamaku je tou pravou odpovědí na otázku po vědecké, technologické a ekonomické dostupnosti termojaderné fúze. Druhou alternativou byla stavba řady menších zařízení, z nichž každé by řešilo určitý problém odděleně od ostatních. Odborníci však dali tokamaku – reaktoru – zelenou, neboť prostý součet jednotlivých osamělých řešení by byl jiný než řešení jednoho problému za přítomnosti problémů ostatních. Tato skupina odborníků nicméně doporučila projekt, jehož jméno ITER si někteří politikové zvykli vyslovovat jako „eater“ (jedlík), přepracovat směrem ke skromnější variantě.

V roce 2001 byl dokončen redukovaný projekt o dva metry nižšího zařízení, s objemem plazmatu 837 m<sup>3</sup>, proudem plazmatu 15 MA, třetinovým výkonem 500 MW a  $Q > 10$  v pulzu délky 400 sekund. Uvažuje se o neinduktivním režimu s  $Q \approx 3$  a dobou pulzu 3000 sekund. Nic-





Smlouvu o projektu ITER podepsali v roce 1987 zástupci Evropské unie, Sovětského svazu, Spojených států amerických a Japonska.

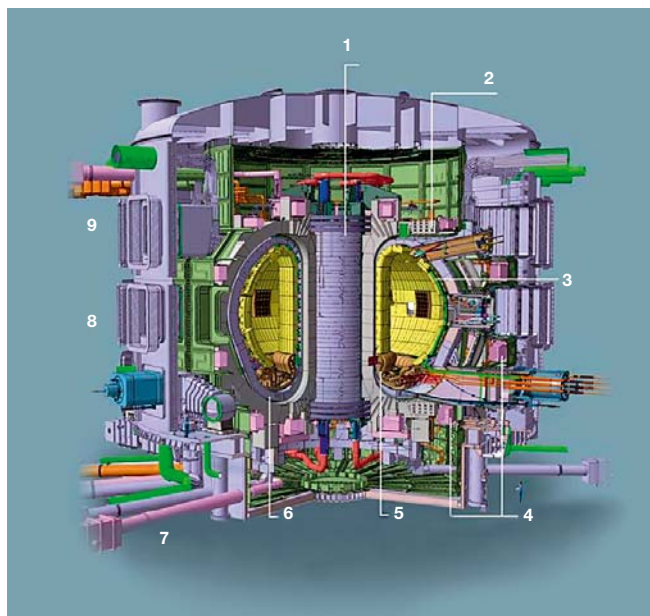
méně i zmenšený ITER by měl být v lineárních rozměrech dvakrát větší než nejmohutnější a rekordní tokamak na světě, JET. U nového ITER se tedy nepředpokládá (ale ani nevylučuje) samovolné hoření termojaderné reakce, nicméně má být prvním termojaderným zařízením, kde bude uvolněná termojaderná energie větší než energie spotřebovaná na ohřev z vnějšku a udržování vysoké teploty, a bude tedy možné studovat prakticky již veškeré procesy, které budou probíhat v pozdějším, skutečném reaktoru. Stěžejní bude testování technologií, které jsou nezbytné pro reaktor termojaderné elektrárny, včetně generace tritia v lithiovém obalu (blanketu) reaktoru.

Řada etap inženýrských aktivit zahrnuje zkoušky důležitých komponent reaktoru: vakuové nádoby, supravodivých cívek, dálkově řízené údržby (např. výměny divertoru) či zdrojů rychlých neutrálních částic a elektromagnetických vln pro dodatečný ohřev plazmatu. V Garchingu u Mnichova se testovaly vnitřní součásti komory tokamaku a v japonské Naka součásti vnějšku komory. Zatímco v roce 1998, v době dokončené první varianty projektu ITER, nikdo neprojevil vážný zájem postavit na svém území neuvěřitelně složité a nákladné monstrum, čím blíže dokončení se jevíly projektové práce, tím více rostl zájem o získání „stavebního povolení“. První se přihlásila Kanada, brzy následovalo Japonsko a pak hned se dvěma místy Evropa. Jinými slovy, na počátku roku 2002 se do výběrového řízení přihlásil kanadský Clarington, japonský Rokkasho-mura, Vandellós ve Španělsku a Cadarache ve Francii. Rok 2003 začal pro

ITER mimořádně slibně. Od konce předešlého roku bylo jasné, že všechna přihlášená místa technické požadavky splnila, a v lednu následovala „bomba“. Po Číně, která projevila zájem přistoupit k projektu, se vrátily Spojené státy americké. V červnu byla oficiálně přijata Jižní Korea. V roce 2005 se přidal zatím poslední partner – Indie. Intenzivně se o členství zajímá Kazachstán, zejména po tom, co ve městě Kurčatov v roce 2010 spustil jediný tokamak ve střední Asii – KTM (**K**azakhstan **T**okamak for **M**aterial **T**esting). Žádný další partner ale přizván nebyl, neboť minimální vklad je poměrně vysoký – 10 % investice.

Evropa se nakonec rozhodla, že do konkurzu o umístění stavby vyšle pouze jednoho kandidáta, a tak v listopadu 2003 dala přednost francouzskému Cadarache před španělským Vandellós.

Bylo smutnou skutečností, že další vývoj ambiciózního vědecko-technického projektu ITER nezáležel na jeho autorech, ale byl v rukou politiků. Spor o místo stavby mezi Evropskou unií a Japonskem, to je mezi jihofrancouzským Střediskem pro výzkum atomové energie (CEA) Cadarache 100 km severně od Marseille a severojaponským rybářským městečkem Rokkasho, se vlekl více než tři roky. Zatímco Cadarache podpořila Čína a Rusko, Rokkasho našlo zastánce v Koreji a USA. Neprošel návrh otce myšlenky projektu ITER J. Velichova rozdělit ITER na dvě části – na reaktor a výpočetní centrum. Kompenzace „odstupujícímu“ kandidátovi nabízené v podstatě oběma stranami – úhrada nákladů nad dohodnutou



- 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.**

hranici, početnější vědecký tým či exkluzivní zakázka pro firmy soupeře – se měly 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 Mitterrand japonskému premiérovi Junichiro Koizumimu, se možná dozvíme nejdříve za padesát let, až se otevřou 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,



Pokládání betonové desky do antiseismické jámy pro reaktor ITER.

respektive jeho zástupce, je volen na čtyři roky z členů Rady. Současným předsedou (2011) je 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 zaměnit 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  $Nb_3Sn$  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  $Nb_3Sn$ . 94 balíčků představuje celkem 130 objednávek (PAs). K 1. lednu 2011 bylo podepsáno 48 PAs, to je 37 % celkového 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.



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

**Hala pro montáž nepřepavitelných cívek poloidálního pole protější strana.**

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 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 JT-60SA 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 přítom žádným





Supravodivé cívký poloidálního magnetického pole (PFCs) pro jejich velikost nelze transportovat – musí se navinout přímo u tokamaku ITER . Na snímku je 257 m dlouhá, 49 m široká a 18 m vysoká hala pro navijení PFCs, Cadarache, Francie.

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 administrativním budovám včetně ředitelství ITER a stavěla se montážní hala pro cívký 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 deu-

teriových experimentech, diagnostika fúzních reakcí, přechod do stacionárního (asi hodinu trvajících) 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 tým 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, trvajících rovněž deset let, bude proto věnová-



## 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 (?)

na hlavní pozornost technologiím: testování součástí a materiálů, zejména posouzení šesti koncepcí lithiového obalu (blanketu) plodícího 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 a bude sloužit 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 na-



Celkový pohled na staveniště tokamaku ITER. Dobře je vidět sesimistická jáma s kruhovým vzorkem podstavců pro tokamakový komplex, za ní v těsné blízkosti je betonová plocha montážní haly, vzadu zkolaudovaná montážní hala cívek poloidálního pole s rozvodnou vpravo. Budova ředitelství je vpředu. Snímek pořízený z ultralehkého letadla ve výšce nad 500 metrů v únoru 2013. © MatthieuCOLIN.com / ITER Organization

vařenými 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.

**Vakuová komora tokamaku**, ve které probíhá v plazmatu termojaderná reakce, je na vysoké vakuu vyčerpáný 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  $1 \times 1,5$  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.

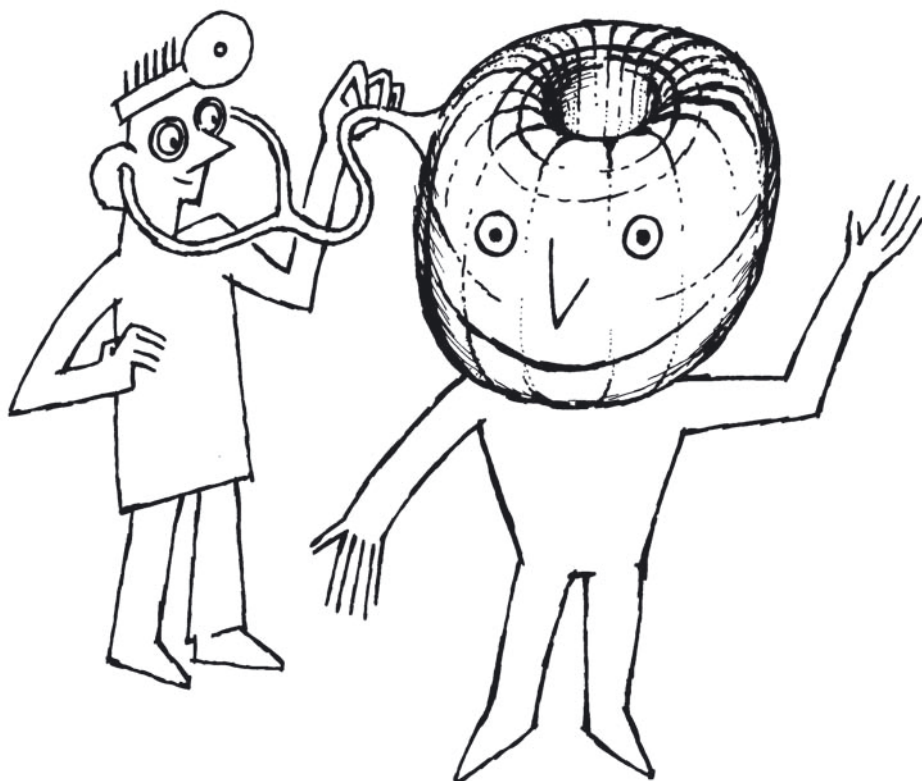
V několika speciálních testovacích segmentech bude lithium, které fúzní neutrony štěpí na tritium, jednu ze dvou složek termojaderného paliva. Ověření možnosti výroby tritia z lithia, a hlavně otestování několika možných tech-

nologií 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 MW/m<sup>2</sup>, přičemž se rozžhavi na teplotu až 3000 °C.

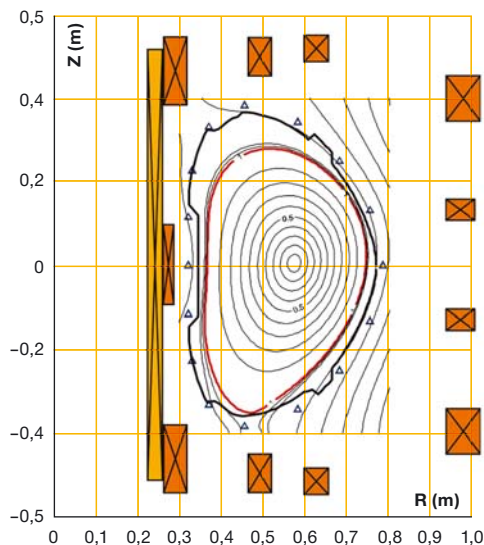
Spuštění fúzních reakcí v ITER lze přirovnat k prvním startům letadel, která mohou létat „sama“, zatímco dnešní tokamaky připomínají spíše jen bezmotorové větroně, co bez pomoci neodstartují. JET má malý dodatečný motor (možnost použít tritium), který dovolí jen výzkum vlivu pohonu na pilotáž. Je dobré si připomenout, že první letadlo bratří Wrightů také nemělo eleganci letu dnešních strojů a daleko nedoletělo – ovšem bez něho by dnes dvoupatrový 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	mikrovlnná interferometrie (B)
lokální hustota plazmatu	mikrovlnná 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 měřících 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, mikrovlnnou, spektroskopickou a sondovou diagnostiku, diagnostiku částic či diagnostiku na svazku a dle principu měření např. Thomsonův rozptyl, mikrovlnnou 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

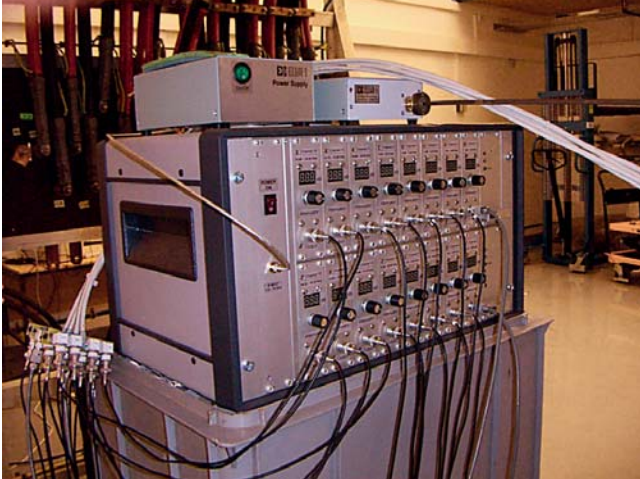
zákonitosti přechodu tokamakového výboje do režimu s vyšším udržením energie a částic (H-mod).

### (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





16kanálový přijímač radiometru. • nahoře



Mikrovlnná anténa 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.

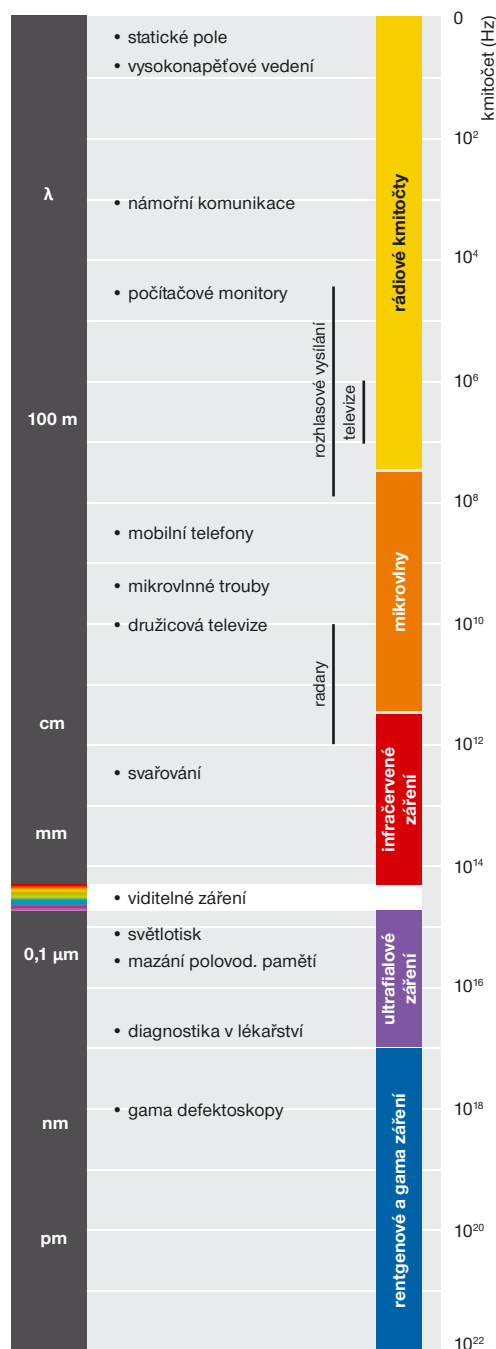
Změny magnetického pole, a tím v tokamacích i jeho absolutní hodnotu, lze zase určit z proudu indukovaného v diagnostických cívkách. Tokamak COMPASS je vybaven více než 400 diagnostickými cívkami pokrývajícími vakuovou komoru v poloidálním i toroidálním směru a umožňujícími měření výše uvedených veličin.

## (B) MIKROVLNNÁ DIAGNOSTIKA

radiometr	elektronová teplota
reflektometr	hustota

Vyzařování tokamakového plazmatu v oblasti mikrovln, případně jeho interakce s mikrovln-

ným zářením, pomáhá určovat jinak jen těžko zjištělné 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 intenzita 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 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 radiového signálu při odrazu radiových vln od ionosféry) Místo, kde se mikrovlny o dané frek-



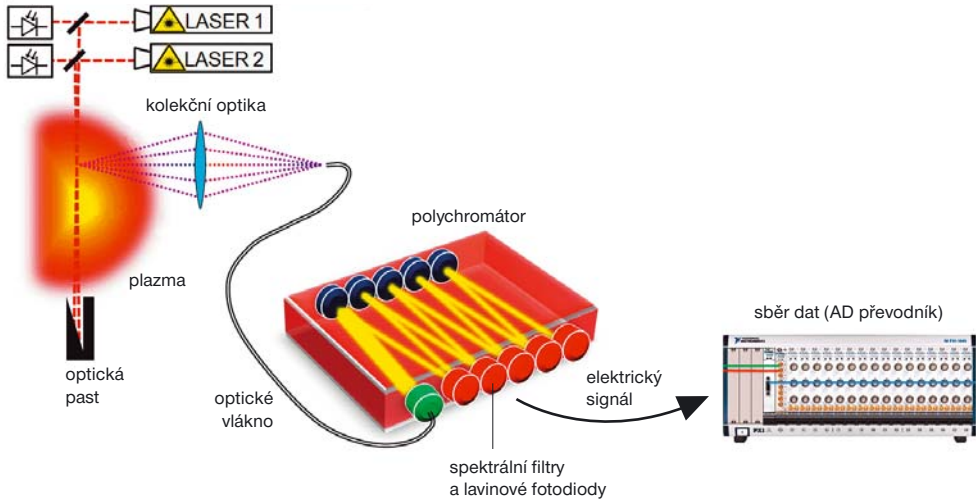
Spektrum elektromagnetického záření.

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

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



**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

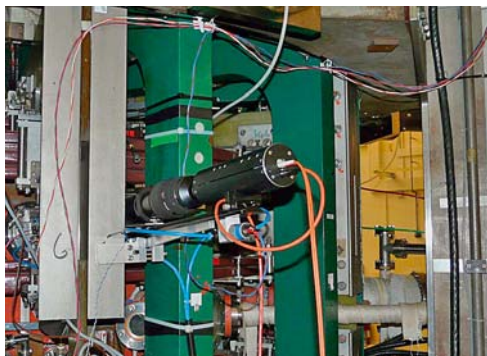
Thomsonův rozptyl	elektronová teplota a hustota
-------------------	-------------------------------

Jednou z nejdůležitějších, avšak velmi složitou, aktivní spektroskopickou diagnostikou 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>.

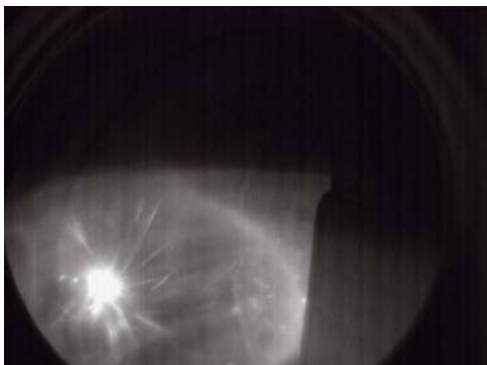
## (E) RYCHLÉ KAMERY PRO DETEKCI VIDITELNÉHO ZÁŘENÍ

vysokeychlostní 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  $800 \times 600$  bodů, expozice 0,6 ms. dole vlevo a vpravo



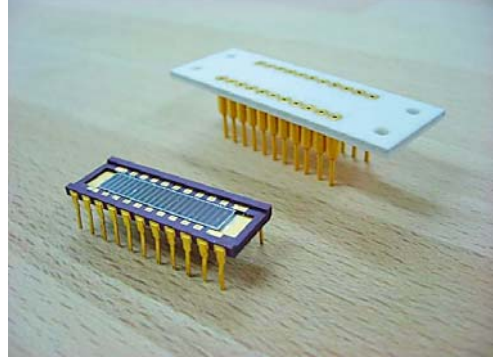
K získání přehledu o vývoji tokamakového výboje a o vzájemném ovlivňování mezi horkým plazmatem a stěnou vakuové nádoby se často používají vysokorychlostní kamery snímající viditelné světlo vyzařované plazmatem. Největší záběr plazmatu dosahují při pohledu tečně k jeho ose, tedy v toroidálním směru. 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.



Pole AXUV detektorů s keramickou patičí.

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

Pro tokamak COMPASS byly vyvinuty dvě speciální vysokorychlostní kamery (1,3mega-pixelový CMOS senzor) s plným rozlišením  $1280 \times 1024$  body při 450 snímcích za sekundu nebo až 116 000 snímcích za sekundu při nižším rozlišení  $16 \times 16$  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.

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.

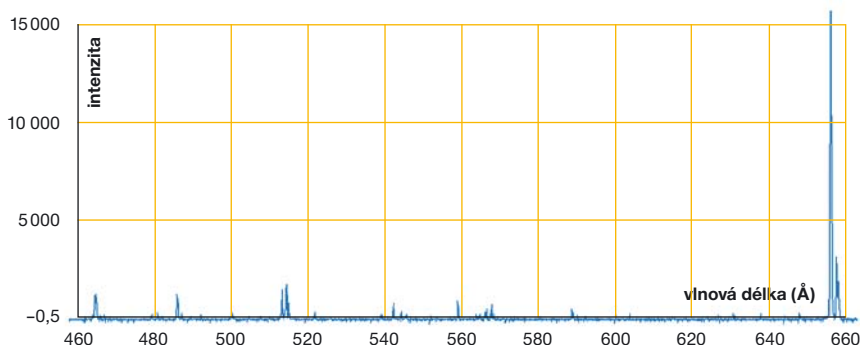
Na tokamaku COMPASS se s prostorovým rozlišením kolem jednoho centimetru monitoruje vyzařování vodíku na vlnové délce 656,28 nm, což je nejintenzivnější spektrální čára vodíku ve viditelném světle, tzv.  $H_{\alpha}$ , a charakteristické čarové spektrum příměsí plazmatu, jakými jsou uhlík, kyslík, železo, 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 ustředněné 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 (krystal  $\text{LiTaO}_3$ ) 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, dání je však snižena 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.

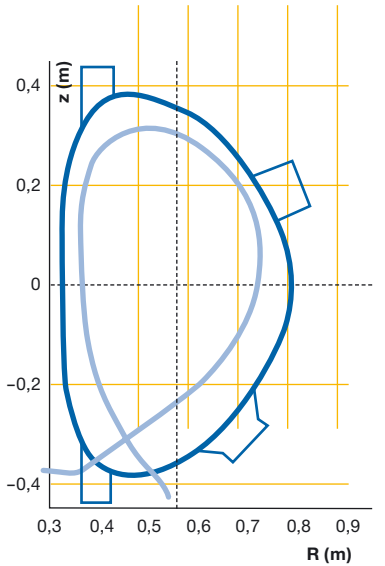
### (H) DIAGNOSTIKA MĚKKÉHO RENTGENOVÉHO ZÁŘENÍ

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 informaci 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 mäkkého rentgenového detektoru (vakuová komora je znázorněna tmavě modře, poslední uzavřený magnetický povrch světle modře, diagnostické porty modře).

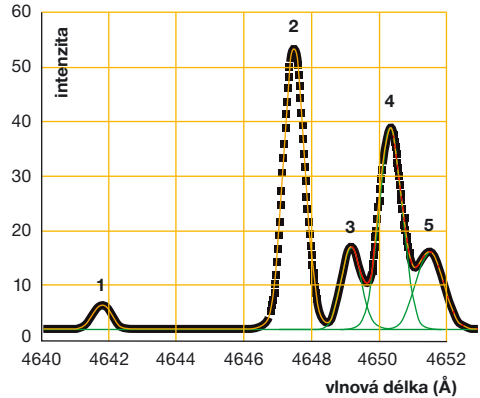
beryliovou fólií o tloušťce 5  $\mu\text{m}$  detekující fotony o energiích 0,5–10 keV. Jejich zorná pole pokrývají středové plazma s prostorovým rozlišením 1–2 cm a díky rychlému zesilovači jsou detektory schopny sledovat změny záření plazmatu v mikrosekundových časech.

## (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 |
| 3 O II – 4649,13 Å  |                     |



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

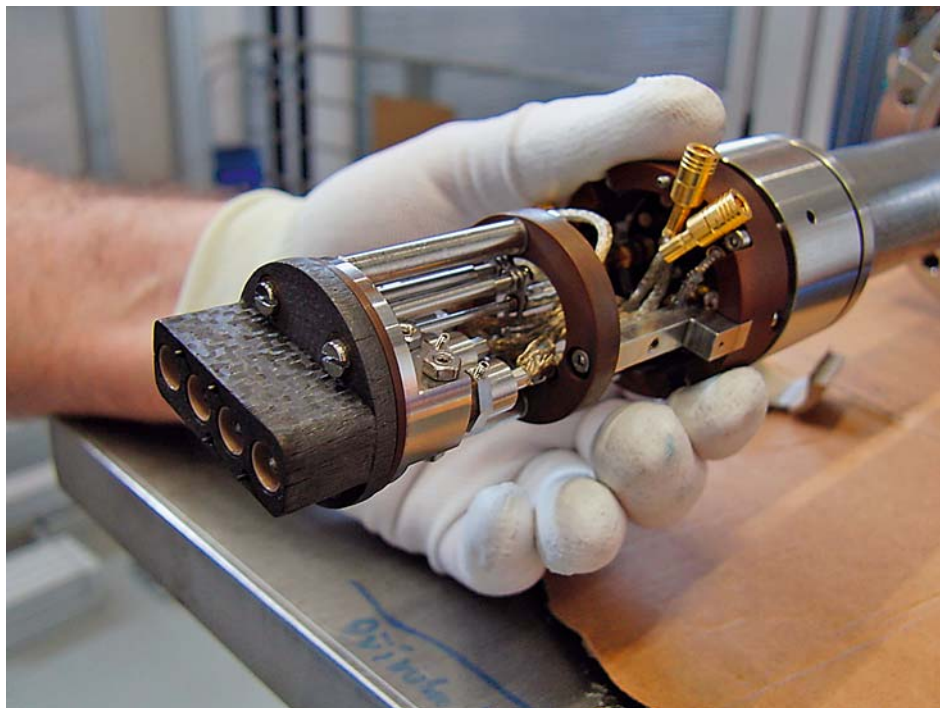
kteřá vzniká složením záření mnoha chaoticky se pohybujících zdrojů, odhadnout iontovou teplotu plazmatu.

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, Peltierovým 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 sonda, obvykle z materiálů s velmi vysokým bodem tání (nad 2000 °C) jako je uhlík nebo wolfram, vstřelí pomocí pneumatického systému na krátký čas do okrajového plazmatu. Běžně jsme schopni zasunout sondu do plazmatu s místní teplotou až 500 000 °C. Zde dosahuje tepelný tok plazmatu na sondu stejné hodnoty jako na povrchu Slunce: okolo 60 W na každý milimetr čtvereční! Jelikož ale sonda je rychle vytažena zpět (v čase kratším nežli 0,1 sekundy), ohřeje se pouze na několik tisíc stupňů Celsia, a tak se nepoškodí.

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 uváděného principu, kdy se kombinuje větší počet sond, mění se jejich tvar či je rozdělena stínící 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 uza-

vřenému 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 Langmuirovu sondu, U-sondu či ball-pen sondu.

### (K) DIAGNOSTIKA POMOCÍ SVAZKU

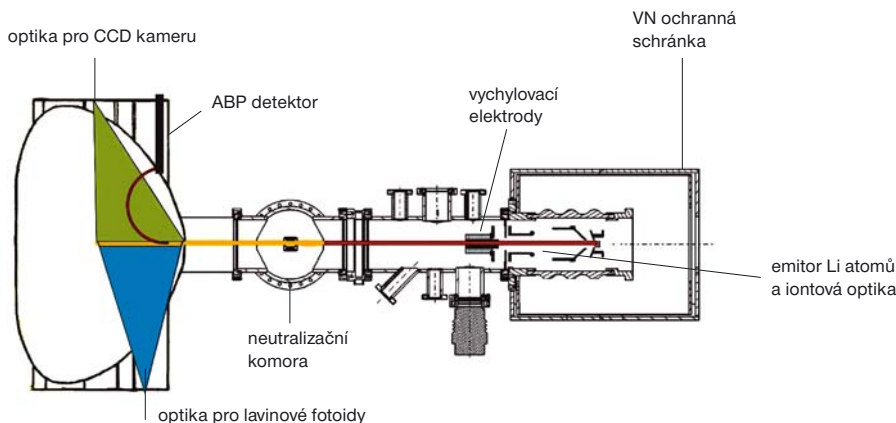
	prostorové rozložení
diagnostické svazky	elektronové hustoty, potenciál plazmatu, elektrický proud na okraji plazmatu

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. Proudění tekoucí

na okraji plazmatu například během nestabilit 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 proudů několika miliampérů. Deexcitaci lithiových atomů svazku budou pozorovat rychlé lavinové fotodiody (monitorování změn 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

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



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

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.

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

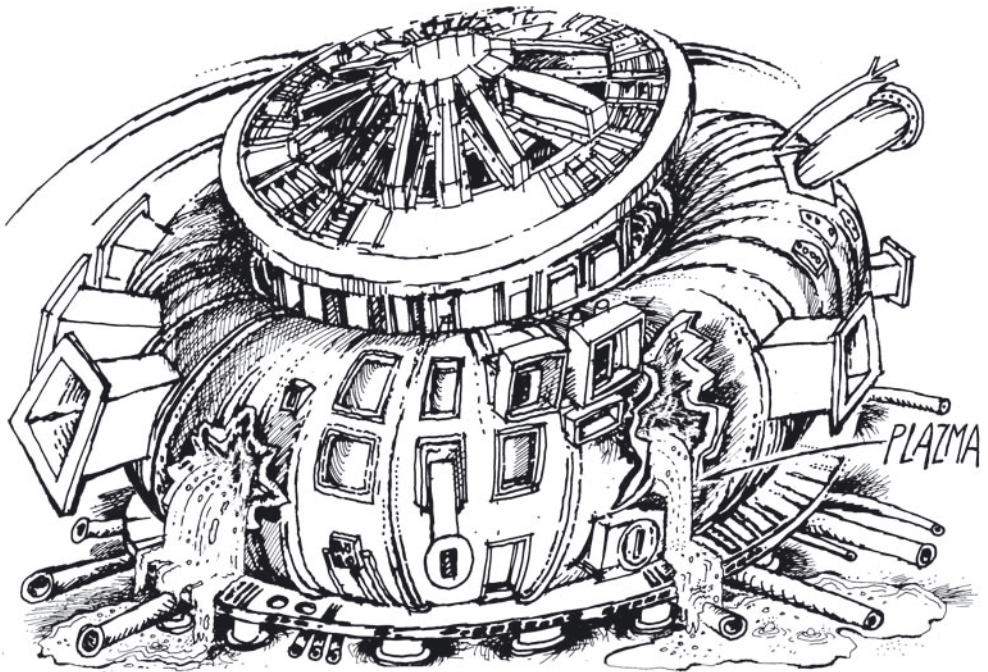
ziónizují a v poli magnetu spektrometru se sleduje poloměr jejich zakřivené dráhy, který souvisí s jejich hmotností.

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 Čerenkovovo 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 vícekanalového systému Čerenkovových detektorů.



# TERMOJADERNÉ TECHNOLOGIE

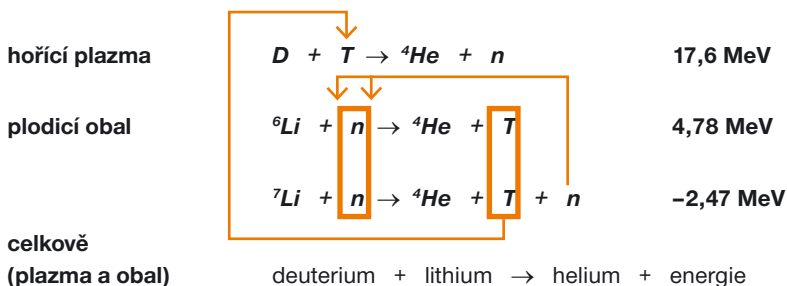


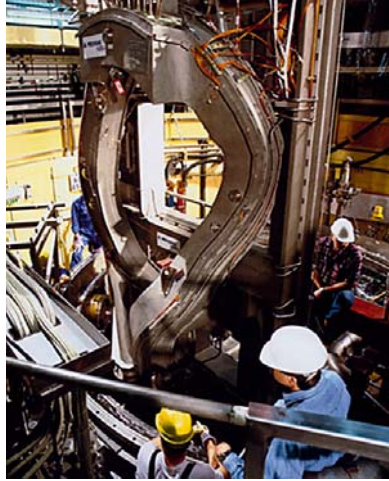
Zatímco fyzikové netrpělivě čekají na první výsledky z připravovaného mezinárodního experimentálního termojaderného reaktoru ITER, který bude dvakrát větší než současný nejmodernější tokamak na světě JET, před inženýry a techniky stojí výzva, se kterou se doposud nesetkali. Na rozdíl od štěpných atomových 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 třídímního 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  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ . vpravo

zuřit plazmová bouře o teplotě stovek milionů stupňů Celsia, za stěnou reaktoru bude teplota blízká absolutní nule. Jen při teplotě tekutého helia  $4,5\text{ K}$  ( $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 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 konstrukční 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 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 nevídaných 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 redukovaná 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 protékanou tlakovou vodou. Kritickým procesem je vodivé spojení kompozitu a Cu slitiny. Pro spojování rozdílných materiálů byla vyvinuta řada technologií – svaření, 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 to-



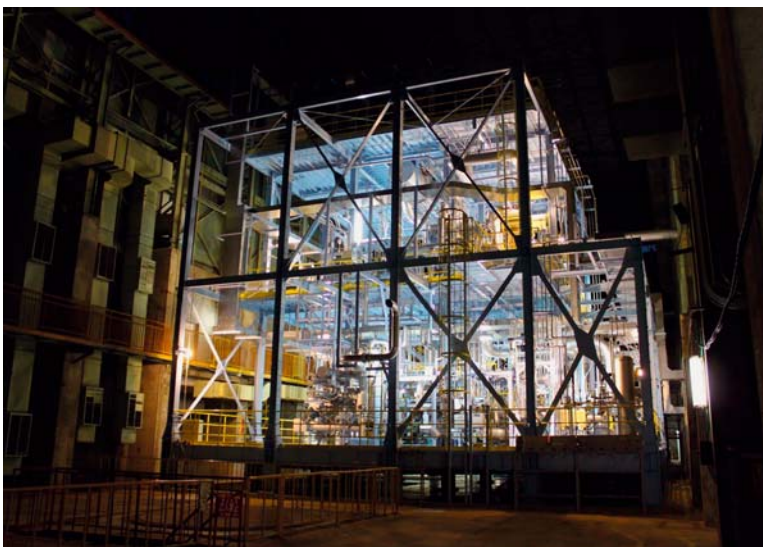
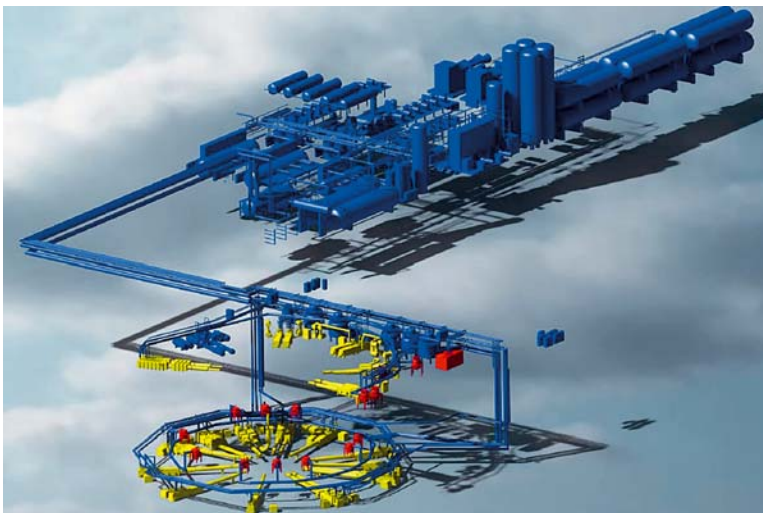


Schéma kryogenního systému pro ITER. nahoře

Zkušební lithiová smyčka pro urychlovač neutronů, který bude používat IFMIF – Mezinárodní fúzní zařízení pro ozařování materiálů neutrony. dole

hoto 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. Vývoj brzy skončil radičním zhroucením – „uhlíkovou katastrofou“ – vyzářený výkon byl větší než výkon dodaný.

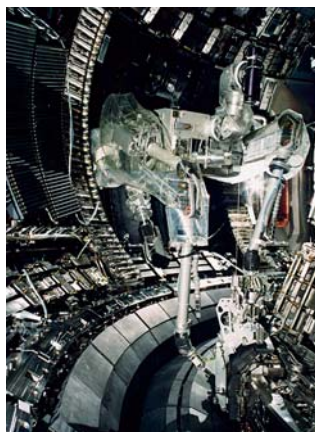
Až v letech 1989–1990 bylo na JET uhlíkové pokrytí doplněno nástřikem berylia, prvku s ještě nižším atomovým číslem, než má uhlík.

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.

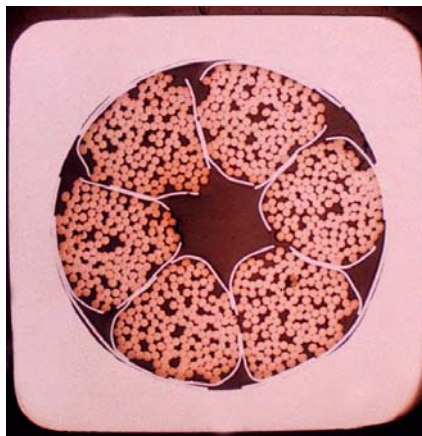




Generátor vysokofrekvenčního elektromagnetického pole pro dodatečný ohřev plazmatu tokamaku – gyrotron.



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 přinejmenším 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.

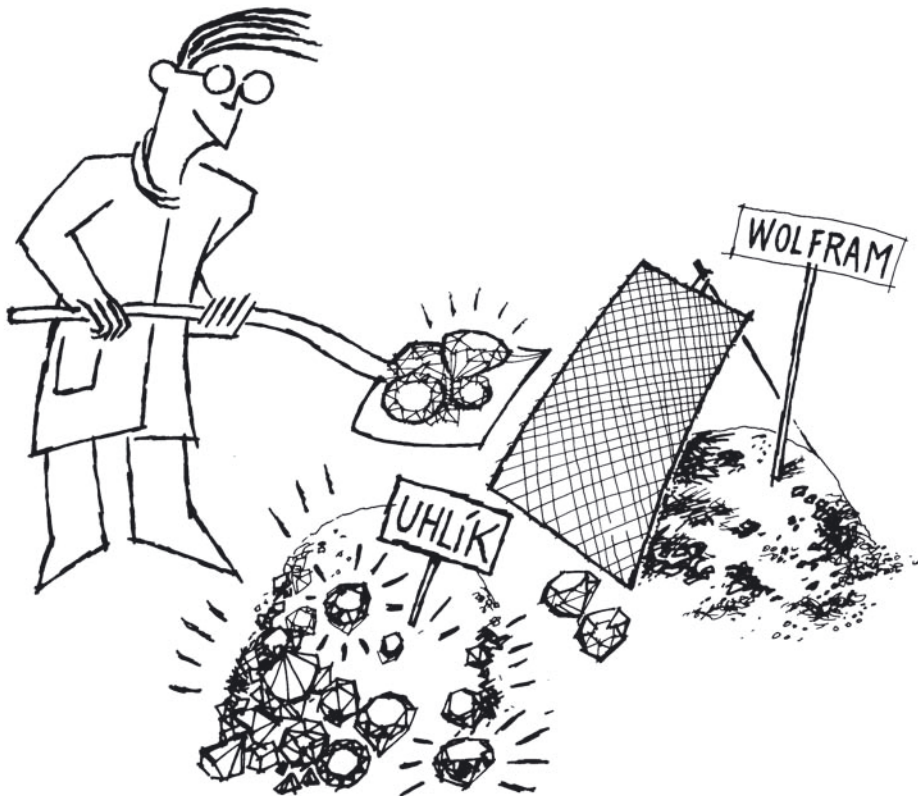
Velmi namáhaná součást uvnitř vakuové komory je divertor. Právě v divertoru ITER budou zpočátku na kontaktní – terčově – stěny použity uhlíkové destičky a velmi nadějný se v tomto směru jeví málo erodující wolfram, který navíc neabsorbuje tritium jako uhlík.

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 (**C**onseil **E**uropeén pour la **R**echerche **N**ucleaire – 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.

# FÚZNÍ MATERIÁLY



Technologická realizace termojaderné fúze by nebyla myslitelná bez odpovídajících materiálů schopných obstát a pracovat v extrémně náročných podmínkách. Těm jsou do značné míry vystaveny i v současných experimentálních fúzních zařízeních. Různé druhy zátěže se často kombinují a zahrnují působení vysokých teplot, mechanického namáhání, chemických reakcí, případně neutronového záření. Díky těmto vlivům jsou materiály a součásti často na hranici svých možností, je proto třeba stále hledat alternativy a vylepšení; vývoj v oblasti materiálových technologií je stejně potřebný jako pokroky ve fyzice plazmatu a ovládání výbojů.

V této kapitole budou vybrané materiálové problémy představeny na příkladech konkrétních součástí a systémů ve fúzním reaktoru – tokamaku. Jedná se zejména o vakuovou nádobu, součásti vystavené plazmatu (plasma facing components), plodící obal (breeding blanket), izolační součásti a permeační bariéry bránící prostupu tritia. V každé z těchto aplikací jsou v různé míře důležité výše zmíněné interakce materiálů s prostředím, které také určují požadavky na použité materiály a jejich výběr.

## INTERAKCE MATERIÁLŮ S PROSTŘEDÍM

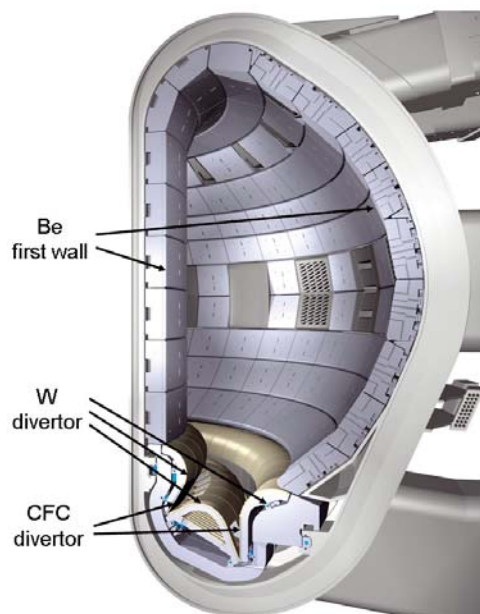
Ve fúzním zařízení je zásadním faktorem interakce materiálů s plazmatem. Tato interakce je oboustranná – materiály jsou vystaveny tokům částic a tepla z plazmatu; naopak plazmový výboj je ovlivněn částicemi uvolňovanými erozí z povrchu první stěny. K erozi bude docházet zejména při tzv. přechodových událostech, jako jsou ELMy, svíslé vychýlení (VDE) nebo disrupce (viz Výkladový slovník). Přestože se

kvalita udržení plazmatu neustále zlepšuje, výboje nelze prodlužovat neomezeně a k těmto událostem bude přes veškerou snahu docházet i v budoucích tokamacích. Podle doby jejich trvání (od stovek mikrosekund v případě ELMů po stovky milisekund trvající VDE), množství energie deponované na povrch (od několika málo % u ELM; až po 100 % u disrupce) a celkového objemu plazmatu se liší i míra a hloubka ovlivnění zasažených materiálů/součástí. U krátkých a málo energetických událostí obvykle dochází jen k mírnému zvýšení teploty, případně lokální erozi na atomové úrovni. V případě vysokých tepelných toků (které mohou např. v ITERu dosahovat řádu  $10 \text{ MW/m}^2$ ) se může teplota i při intenzivním chlazení zvýšit až k bodu tavení nebo sublimace; u déletrvajících událostí dochází i k ovlivnění spojů v hloubce řádově mm. V zasažených materiálech může docházet k následujícím procesům:

- erozi (ať už na atomární úrovni, fyzikálním či chemickým odprašováním (sputtering) nebo vypařováním, nebo na mikro/makroskopické úrovni tavením, praskáním, odlupováním povrchových vrstev apod.),
- absorpci částic z plazmatu, případně chemické interakci,
- redepozici (tj. zpětnému nanášení) erodovaného materiálu.

Tyto procesy nastávají v různé míře nejen v závislosti na vlastnostech plazmatu v místě zasaženého materiálu, ale i na druhu tohoto materiálu (viz dále). Atomy erodované ze zasaženého povrchu se šíří do plazmatu, kde získávají energii (jsou excitovány a ionizovány) srážkami s elektrony a ionty plazmatu. Té se však téměř okamžitě zbavují zářením ve formě tepla (infračervené záření), světla, či energetičtějšího ultrafialového nebo rentgenového záření. Tím

**Řez vakuovou nádobou ITERu s rozmístěním komponent vystavených plazmatu a s označením tří základních materiálů: berylia, wolframu a uhlíkových kompozitů. Posledně jmenované mohou být nahrazeny wolframem.**



zvyšují únik energie z plazmatu a ochlazují jej. Platí zde, že čím těžší prvek (více elektronů), tím vyšší způsobuje radiační ztráty. Proto je snahou tyto jevy co nejvíce omezit. Zatím ovšem není znám způsob, jak erozi materiálů úplně eliminovat, proto je potřeba s ní počítat. Odhaduje se, že při jedné disrupci mohou být erodovány až desítky mikrometrů tloušťky materiálu. V plánech je tedy počítáno s omezenou životností některých součástí a nutností jejich (dálkově řízené) výměny během provozu reaktoru.

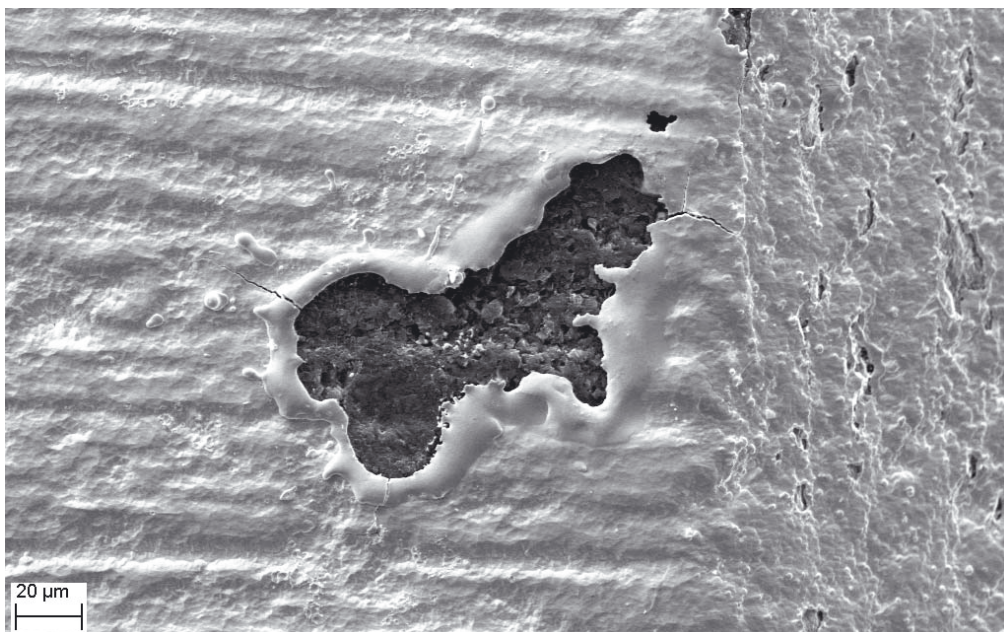
Ve fúzním reaktoru bude za zvýšené teploty také docházet k interakci materiálů s izotopy vodíku (vodík, deuterium, tritium)<sup>35</sup> a heliem, tj. fúzním „palivem“ a „odpadem“. Tyto prvky budou díky velmi malému rozměru atomu pronikat do materiálů – nejen těch přímo vystavených plazmatu – do různé hloubky podle jejich složení, struktury a teploty expozice. V kovových materiálech může docházet k tzv. vodíkovému zkřehnutí. Atomy vodíku nebo jeho izotopů difundují materiálem; uvnitř se pak shlukují do molekul a posléze větších „bublinek“, působí tlakem na okolní materiál a snižují jeho schopnost plastické deformace, což může vést až ke vzniku trhlin. Materiály na bázi uhlíku zase podléhají tzv. chemické erozi – uhlík ochotně reaguje s izotopy vodíku a vzniklé uhlovodíky se v plynné podobě uvolňují a odnášejí s sebou

i původní materiál. Pohlcování a transport tritia, ať už difúzí v pevných látkách nebo v chladicí kapalině či tekutém materiálu obalu, případně erozí a redepozicí materiálu působením plazmatu, je vzhledem k jeho radioaktivitě nežádoucím jevem. Proto je při výběru materiálů zohledňován i požadavek na co nejmenší absorpci a pronikání tritia. Tyto procesy závisí nejen na chemickém složení materiálu, ale také na jeho struktuře a fázovém složení. Obecně jsou usnadněny třeba poruchami v krystalové mřížce, způsobenými např. deformací nebo neutronovým či iontovým zářením. Záření je další typ interakce, který je třeba zmínit.

Neutrony o energii kolem 14 MeV jsou produktem reakce deuteria a tritia. Při pronikání neutronů do materiálu dochází k pružným srážkám s jádry přítomných atomů. Je-li energie neutronů dostatečná, vychylují atomy z jejich původních poloh v krystalové mřížce. Při vysokých energiích dopadajících neutronů nastávají srážky opakovaně, tj. jeden neutron může vyrazit více atomů. Vyražením atomu vznikají dvojice poruch krystalové mřížky – vakance (chybějící atom) a interstice (atom mimo krystalovou mřížku). Tyto změny struktury se nazývají radiační poškození (radiation damage) a jejich mírou jsou jednotky ‘dpa’ (displacement per atom). V ITERu je u komponent uvnitř vakuové nádoby očekáváno poškození řádu jednotek dpa za dobu jejich životnosti, ale v případě demonstračního reaktoru (DEMO) už to budou desítky

<sup>35</sup> V současných – experimentálních – fúzních zařízeních jsou používány všechny tři izotopy. V reaktoru to bude jen deuterium a tritium.





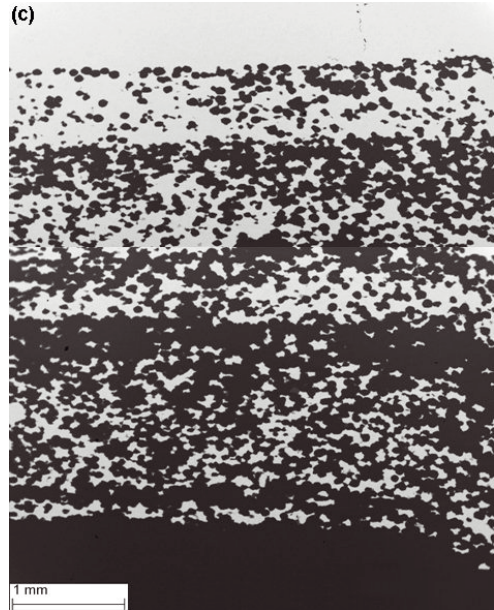
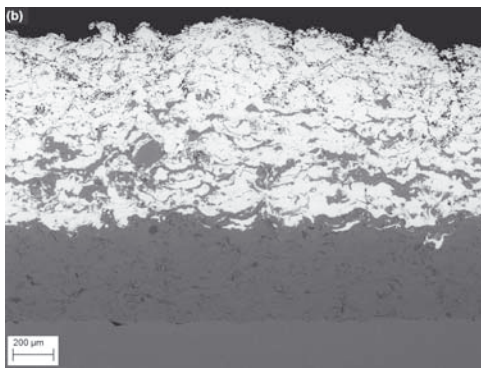
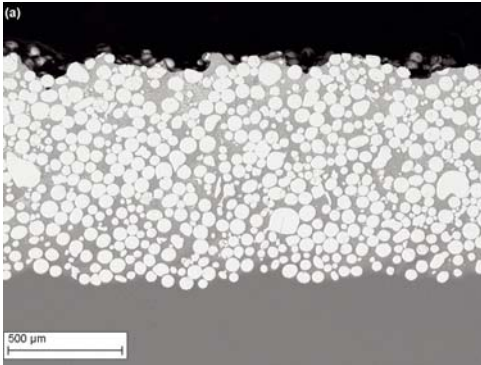
Eroze tenké vrstvy wolframu na grafitové destičce, způsobená unipolárním výbojem v tokamaku Compass. Na okraji erodované oblasti je patrné tavení a praskání povlaku.

dpa. Takto významné změny ve struktuře přirozeně vedou i ke změnám vlastností a chování materiálů, převážně nežádoucím. Patří mezi ně rozměrové změny, křehnutí, snížení pevnosti, tepelné či elektrické vodivosti. V případě zachycení neutronů přicházejí do hry i jaderné transmutace a ozářený materiál se stává radioaktivním. Kromě vysoce energetických neutronů nelze pominout ani ionizující záření, které – díky interakci s elektronovým obalem atomů – může působit změny i při energiích mnohem nižších, než jaké jsou potřeba na vyražení atomu z mřížky. To ovlivňuje zejména keramické materiály a mění jejich elektrickou a tepelnou vodivost. Míra výše zmíněných efektů závisí na složení materiálů, jejich struktuře, energii dopadajícího záření a zejména na teplotě. Za vyšších teplot, kdy jsou atomy pohyblivější, vakance a interstice ochotněji rekombinují a radiační poškození se částečně „zahojí“ (podobný jev zotavení materiálů je s úspěchem využíván při zvyšování životnosti klasických jaderných elektráren). Nicméně s radiačním poškozením a souvisejícími změnami vlastností je třeba počítat při volbě materiálů, návrhu konkrétních komponent a plánování jejich „životního cyklu“.

## MATERIÁLY V KONKRÉTNÍCH APLIKACÍCH

Požadavky kladené na materiály ve fúzních aplikacích jsou komplexní a ne vždy je možné všem bez zbytku dostát. Z hlediska provozu fúzního zařízení mezi ně patří např. schopnost fungovat za zvýšených teplot, dostatečná tepelná a elektrická vodivost a mechanická pevnost, odolnost proti radiačnímu poškození a teplotním šokům, kompatibilita s plazmatem, chladivý a dalšími materiály. Předností je též možnost oprav, ať už uvnitř nebo vně vakuové nádoby. Výrobní hledisko k tomu přidává dostupnost, tzn. dostatek primárních surovin, co nejsnadnější přípravu a opracování. Z hlediska bezpečnosti je žádoucí nízká radioaktivita s rychlým poklesem, usnadňující nakládání s odpadem. Spektrum prvků, které vykazují nízkou aktivaci ozářením je velmi úzké; proto je hledání optimálních materiálů poměrně náročnou disciplínou. Základním konstrukčním materiálem – pro vakuovou nádobu a další konstrukční prvky – jsou speciální korozivzdorné oceli. Je to materiál, se kterým má lidstvo dlouholeté zkušenosti z velkého množství aplikací, včetně např. nádob štěpných reaktorů, kde jsou materiálové požadavky alespoň trochu podobné. Pro ITER, kde





**Příklady funkčně gradovaných vrstev (FGM) wolfram-ocel připravených a) laserovým navařováním, b) plazmovým stříkáním, c) lisováním za horka. Snímky pocházejí z elektronového mikroskopu, kde je kontrast dán atomovým číslem – světlejší fáze je wolfram, tmavší ocel.**

bude k fúzní reakci docházet jen v omezené míře, je pro vakuovou nádobu plánována ocel řady 316LN. Jejimi hlavními příměsmi jsou nikl a chrom; pro použití v ITERu jsou nastaveny přísnější požadavky na složení a čistotu než u běžných aplikací. Tato ocel má výborné mechanické vlastnosti a dobrou radiační a korozní odolnost. Pro DEMO, kde budou toky neutronů řádově vyšší, bude třeba použít nízkoaktivovatelné oceli (bez niklu). Použití za vyšších teplot, tedy s vyšší účinností energetického cyklu, by měly umožnit nejmodernější varianty s disperzním zpevněním (tzv. ODS oceli). Zvažují se ovšem i alternativní materiály – slitiny vanadu nebo kompozity SiC-SiC, dosud ve vývoji. Ojedinelou materiálovou aplikací představují supravodivé cívky. Ty slouží k indukci proudu v plazmatu (centrální solenoid) a k udržování polohy plazmového prstence uprostřed nádoby (cívky toroidálního a poloidálního pole). Supravodivost, tedy schopnost vést elektrický proud prakticky beze ztrát, je nutná pro zajištění velmi silného magnetického pole (několik T); v případě "obyčejného" vodiče, např. mědi, by příslušně vysoké proudy generovaly neúměr-

ně velké množství tepla. To by silně narušilo energetickou bilanci tokamaku - většina vyrobeného fúzního výkonu by se spotřebovala na chlazení cívek. Supravodivost ale není zadarmo - k jejímu docílení musí být slitiny NbTi a Nb<sub>3</sub>Sn, plánované pro cívky ITERu, chlazeny na cca -269 °C, tedy 4 stupně nad absolutní nulou. Volba z těchto dvou materiálů je dána požadavky na intenzitu magnetického pole pro jednotlivé systémy cívek. Pro centrální solenoid je požadováno až 13 T, pro toroidální pole cca 12 T, pro poloidální pole postačí 6.5 T (orientace jednotlivých cívek - viz obr. na str. 38). Pro cívky poloidálního pole lze tedy použít slitinu NbTi, která je supravodivá do cca 7 T; pro centrální solenoid a cívky toroidálního pole je plánována slitina Nb<sub>3</sub>Sn, která je supravodivá až do 14 T, ale vyžaduje speciální tepelné zpracování. To je třeba vzhledem ke křehkosti materiálu provádět až po navinutí cívek. Supravodivost ovšem není jediným požadavkem. V přítomnosti takto silných magnetických polí budou rozměrné cívky vystaveny působení značných mechanických sil, musí tedy mít velmi robustní konstrukci v přísných rozměrových tolerancích. Toho je



Nanášení wolframového povlaku plazmovým stříkáním. Jasně čáry vlevo jsou stopy jednotlivých zrníček wolframového prášku (velikost kolem 70 mikronů), roztavených proudem nízkoteplotního plazmatu (cca 10 000 K), tryskajícího z hořáku vpravo. Jasný „oblak“ uprostřed je kromě roztavených částic wolframu tvořen také vypařujícími se oxidy wolframu.

dosaženo tzv. "cable-in-conduit" designem (viz obr. na str. 141). Cívky jsou složeny z velkého množství vláken z výše zmíněných slitin; jejich počet je dán požadovaným proudem. Celková délka vláken pro cívky toroidálního pole bude 80000 km! Vodiče budou izolovány skelnými vlákny a kaptonem a zality v pryskyřici. Tyto materiály by měly zajistit elektrickou izolaci při vysokých napětích (až desítky kV), a to i v přítomnosti neutronového záření. Jako pojistka pro případ ztráty supravodivosti je ke svazkům supravodičů ještě přidán měděný vodič. Celá sestava, v níž budou ještě chladicí kanály protékající kapalným heliem, bude uzavřena v tuhé schránce z vysokopevné oceli, která zajistí rozměrovou stabilitu. Jen cívky toroidálního pole mají vážit 6500 tun...

Specifickou oblastí, charakteristickou pro fúzní zařízení, jsou komponenty vystavené plazmatu. Od nich je požadována zejména kompatibilita s plazmatem na jedné a konstrukčními materiály na druhé straně, stabilita za zvýšených teplot, odolnost proti erozi, teplotním šokům a ozáření, vysoká tepelná vodivost a nízké zachycování tritia. Všem těmto požadavkům nelze vyhovět jediným „optimálním“ materiálem, a tak jsme zatím nuceni uchýlit se ke kompromisům a materiálovým kombinacím – kompozitům, gradovaným vrstvám apod. Zatímco historické experimentální tokamaky si vystačily s korozivzdornou ocelí a/nebo grafitem a novější jako JET používaly dlaždice s uhlíkovými kompozity (CFC = carbon fibre composites), pro ITER je plánována kombinace berylia, wolframu a uhlíkových kompozitů, která bere v úvahu prostorové rozložení tepel-

ných a částicových toků. S beryliem je počítáno na první stěnu (většina povrchu vystaveného plazmatu) a některé varianty plodícího obalu, s wolframem a CFC pro části divertoru (menší část povrchu, ale nejvyšší zatížení).

Uhlík je v této trojici „tradičním“ materiálem, s nímž jsou již zkušenosti z celé řady fúzních zařízení. Jeho výhodami jsou nízké atomové číslo (a tedy nízké radiační ztráty v případě znečištění plazmatu), vysoká odolnost při tepelném zatížení a fakt, že se netaví. Zásadní nevýhodou je chemická eroze a zachycování tritia, zejména v případě erodovaných a znovu deponovaných vrstev. Uhlík vykazuje poměrně malé objemové změny při ozáření, ale snížená tepelná vodivost zvyšuje termální erozi při disrupcích. Uhlíkové kompozity sestávají z vysoce pevných uhlíkových vláken uspořádaných v uhlíkové matici. Výsledný materiál je anizotropní a vykazuje vyšší pevnost a odolnost proti šíření trhlin než homogenní grafit.

Berylium má ještě nižší atomové číslo než uhlík, nedochází u něj k chemické erozi, ochotně pohlcuje kyslík jakožto nežádoucí nečistotu. Na druhou stranu má poměrně nízkou teplotu tání, snadno se odprašuje a degraduje vlivem neutronového záření. Díky těmto faktorům jej lze použít na komponenty, které jsou sice blízko plazmatu, ale vystavené jen nižším tepelným a částicovým tokům. Nezanedbatelným faktorem je i jeho toxicita; počet institucí, které jej mohou zpracovávat, je velmi omezený.

Wolfram je primárním materiálem plánovaným pro divertor ITERu, zejména pro oblasti vysokých toků neutrálních částic, a hlavní materiál



Ukázky zkušebních modulů (mock-ups) pro zkoušky tepelnými toky s aktivním chlazením. a) Dlaždice z kompaktního wolframu připájené na chladicí blok z Cu slitiny, b) plazmový nástřík wolframu nanesený přímo na chladicí blok s vyfrézovaným reliéfem pro lepší přilnavost.

uvažovaný pro vnitřní povrch reaktoru DEMO. Má nejvyšší bod tání ze všech kovů, nízký tlak par, poměrně dobrou tepelnou vodivost, pevnost za vysokých teplot a netvoří sloučeniny s vodíkem. Vysoké atomové číslo z něj dělá velmi nežádoucí nečistotu v plazmatu, která by působila výrazné radiační ztráty; na druhou stranu má velmi vysoký práh odprašování – tedy pravděpodobnost, že se uvolní do plazmatu je ve srovnání s ostatními materiály malá. Mezi jeho nevýhody patří křehkost, která může působit problémy zejména při teplotních šocích a ještě se zhoršuje ozářením, a obtížná obrábitelnost. Jde také o poměrně vzácný kov. Různé možnosti vylepšení mechanických vlastností wolframu jsou předmětem intenzivního výzkumu a zahrnují slitiny, kompozity a modifikace struktury termomechanickým zpracováním. Kombinace materiálů pro komponenty vystavené plazmatu s sebou nese potenciální komplikace spojené se změnou složení – je-li jeden materiál erodován a deponován na jiný, vznikají vrstvy s odlišným složením a tudíž i chováním, než jaké měl původní povrch. Konkrétní materiálové kombinace, jakož i technologie výroby komponent vystavených plazmatu pro budoucí reaktory, jsou dosud předmětem diskusí. Pro ITER bylo v poslední době počítáno s následujícím „scénářem“: V první fázi beryllium pro první stěnu, wolfram pro části divertoru a CFC pro nejnámáhanější části divertoru (tzv. strike points). Tato volba je dána hlavně vysokou tolerancí uhlíkových kompozitů k tepelnému zatížení při přechodových událostech, kterých lze čekat větší množství právě v první fázi, kdy se bude ovládání plazma-

Materiál	Z	T <sub>m</sub> [°C]	λ [W/m.K]
Be	4	1280	190
C	6		20-40
W	74	3410	163
Fe (oceli)	26	1400-1500	20-90
Cu	28	1080	398
B <sub>4</sub> C	5.2	2450	30-42

Vybrané charakteristiky materiálů důležitých pro komponenty vystavené plazmatu. Z = atomové číslo, T<sub>m</sub> = teplota tání, λ = tepelná vodivost.

tu „trénovat“. V následující fázi s D-T reakcí, kdy by se už naplno projevil nevýhody uhlíku ve vztahu k tritiu, by měl být uhlík v divertoru nahrazen wolframem. Pro poslední fázi s nejvyšším výkonem reaktoru je uvažován celý vnitřní povrch z wolframu. V současnosti prosazovanou alternativou je uhlíkové komponenty „přeskočit“ a začít už v první fázi s wolframem, a to zejména z finančních důvodů. Do budoucna ale není vyloučen ani návrat k první stěně z korozivzdorné oceli...

Vzhledem k vysokým tepelným tokům musí být povrchy vystavené plazmatu aktivně chlazeny – v ITERu to znamená odvést až 20 MW/m<sup>2</sup>. Chladicím médiem má být tlaková voda a konstrukčním materiálem měď. Volba je dána hlavně její vysokou tepelnou vodivostí, snadnou obrábitelností a dostupností. Čistá měď ovšem není příliš pevná za vyšších teplot, proto jsou vyvíjeny



**Ukázka zkoušky odolnosti proti tepelným šokům, kdy jsou podmínky disrupce simulovány intenzivním elektronovým svazkem. Jasně linie jsou stopy rozžhavených mikroskopických částic vyletujících z povrchu zasaženého materiálu.**

disperzně nebo precipitačně<sup>36</sup> zpevněné modifikace. V reaktoru DEMO, který bude D-T reakcí produkovat velké množství neutronů, už ale nebude měď kvůli aktivaci široce použitelná. Proto je vyvíjen chladicí systém na bázi oceli a wolframu.

Izolační materiály jsou či budou potřeba pro elektrickou izolaci vakuové nádoby, diagnostických a pomocných systémů a plodícího obalu. Kromě dielektrických vlastností (vysoká rezistivita a dielektrická pevnost) je od těchto materiálů požadována mechanická odolnost a stabilita ve vakuu. Mezi základní materiály pro tato použití patří oxidická keramika, v menší míře též neoxidická keramika a skla. Rovněž tyto materiály mohou v různé míře podléhat změnám vlivem záření.

Jak bylo zmíněno výše, pronikání izotopů vodíku – především tritia – je důležitým aspektem jak z hlediska bezpečnosti, tak pro palivový cyklus. Tento problém se týká nejvíce plodícího obalu, který bude dodávat tritium pro fúzní reakci, ale v menší míře i komponenty vystave-

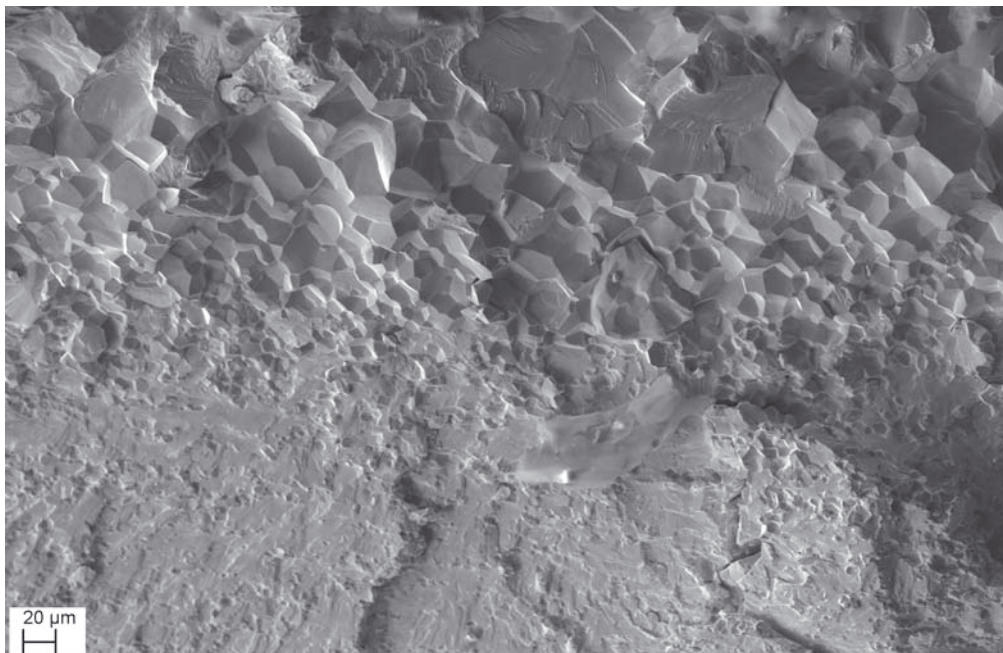
ných plazmatu a dalších souvisejících součástí. Konstrukční materiály obvykle vykazují vysokou propustnost pro izotopy vodíku; ta je dána zejména jeho malými rozměry. Pronikání lze efektivně snížit tenkými povrchovými vrstvami, zvanými permeační bariéry. Mírou „úspěšnosti“ těchto bariér je číslo TPRF = tritium permeation reduction factor, udávající poměr propustnosti obnaženého a pokrytého materiálu. Vhodnými materiály pro permeační bariéry jsou keramiky (oxidy, nitridy) a intermetalika. Pro správnou funkci musí být tyto povlaky homogenní, bez pórů, trhlin a nečistot.

Obě výše zmíněné funkce musí zajišťovat i povlaky v plodícím obalu, ale tím požadavky zdaleka nekončí. Plodící obal je zřejmě nejkompaktnější aplikací, kde je od použitých materiálů očekáváno několik funkcí, navíc v extrémně drsných podmínkách kombinovaného zatížení. Úkolem obalu je a) absorbovat vysokoenergetické neutrony a předávat jejich energii chladivu pro výrobu energie, b) zajistit tvorbu tritia (reakcí s lithiem) a násobení neutronů<sup>37</sup> (reakcí s lithiem nebo beryliem) a c) chránit supravodivé cívky a další vnější komponenty. Pro zajištění funkce b) existují dva základní koncep-

36 Podstatou disperzního zpevnění je přidavek malého množství jemných inertních částic (nejčastěji oxidů – tzv. oxide dispersion strengthening). Tyto částice rozptýlené v kovu fungují jako překážky bránící pohybu dislokací a znesnadňují tak plastickou deformaci. Jejich podíl je přitom tak malý, že neovlivňují významně ostatní vlastnosti. U precipitačního zpevnění se vychází z homogenní slitiny (např. CuCrZr), kde tepelnou úpravou dochází k precipitaci nové fáze; ta má pak stejný účinek jako v předchozím případě.

37 Jak v případě tritia, tak v případě neutronů je třeba zajistit mírný přebytek, protože plodící obal nebude tvořit 100 % povrchu obklopujícího plazma a část reaktivních produktů bude zachycena v přilehlých součástech.





**Lomová plocha kompaktního wolframu, tepelně ovlivněná laserovými pulzy simulujícími ELMy. Materiál byl ozářen shora; k lomu došlo převážně po hranicích krystalových zrn - na lomu jsou patrná zvětšená zrna v tepelně ovlivněné oblasti (horní část), postupně se zmenšující až k neovlivněné, jemnozrnné struktuře (dolní část).**

ty – s tekutým (např. slitina olova a lithia) nebo pevným (lithiová keramika) plodícím materiálem. Spolu s různými variantami chlazení budou tyto koncepty v podobě zkušebních modulů (test blanket module, TBM) testovány v ITERu. Tekuté plodící médium musí být izolováno od ostatních součástí, a to jednak kvůli korozi a jednak kvůli magnetohydrodynamickým efektům. Při nedostatečné izolaci silné magnetické pole indukuje v proudícím kovu elektrický proud, který narušuje proudění, a kanály, jimiž protéká, jsou podrobeny nadměrné mechanické zátěži. Izolační povlaky tedy musí zajišťovat korozní ochranu, elektrickou izolaci i permeační bariéru. Složitá konstrukce fúzního zařízení vyžaduje spojování rozmanitých materiálů. To s sebou nese komplikace spojené s rozdílnými tepelnými a mechanickými vlastnostmi. Při zatížení – ať už mechanickým nebo zvýšené teplotě – je pak jejich důsledkem koncentrace napětí na rozhraní s rizikem porušení spoje. Některé materiály se spolu “nemají rády”, jiné spolu naopak při zvýšené teplotě ochotně reagují a tvoří nežádoucí sloučeniny, některé spojovací materiály nelze použít kvůli aktivaci neutronovým zářením. Proto je stále třeba hledat nové postupy. Možnými řešeními výše uvedených problémů jsou

např. gradované vrstvy, které ostrý přechod nahrazují zvolna proměnlivým složením, aktivace nesmáčivých povrchů, použití vhodných mezivrstev a různé povlakovací technologie.

## TESTOVÁNÍ MATERIÁLŮ

Během vývoje a přípravy nových materiálů je třeba jejich vlastnosti a chování zkoušet. Vedle tradičních materiálových zkoušek a měření, které jsou shodné s ostatními obory, stojí za to zmínit několik druhů testů, které jsou specifické pro oblast fúze. Pro materiály, které mají být vystaveny plazmatu, jsou to zejména zkoušky tepelným zatížením. Ty mají simulovat podmínky v tokamaku, a to jak dlouhodobou (steady-state) tepelnou zátěž, tak přechodové události jako disrupce, VDE a ELMy. K těmto testům se nejčastěji používají elektronová nebo iontová děla. Elektronová děla poskytují výkon od desítek kW po ~1 MW, mají obvykle svazky o průměru řádově mm; k pokrytí větší plochy se používá vysokofrekvenční rastrování. Hloubka pronikání se liší podle atomového čísla ozařovaného materiálu a sahá od několika μm po stovky μm. Iontová děla poskytují výkon řádu několika MW, obvykle jsou schopna pokrýt větší plochu o prů-



měru několika cm a díky menší pronikavosti iontů je ohřev čistě povrchový. Menší tepelné výkony jsou schopny poskytnout infračervené zářiče; jejich výhodou je schopnost čteného opakování pulzů. Dalšími možnými zdroji jsou lasery a různé plazmové generátory, případně jejich kombinace. Ty pak mohou simulovat synergické efekty tepelných a částicových toků. K určení limitů poškození se obvykle používají jednorázové testy s postupně vzrůstajícím tepelným tokem, dále pak opakované zatížení (tzv. tepelné cyklování) s dlouhými i krátkými pulzy (tepelné šoky). Chování testovaných materiálů při tepelné zátěži bývá sledováno celou řadou diagnostických metod. Mezi ně patří např. kalorimetrie k určení absorbované energie, měření povrchové teploty infračervenou kamerou, pyrometry nebo termočlánky, sledování eroze a tavení vysokorychlostní kamerou. Po tepelné zátěži obvykle následuje hodnocení „následků“, tj. stanovení míry a charakteru poškození - pozorování trhlin, vzniku či pohybu taveniny (zejména pomocí elektronové mikroskopie), určení hloubky eroze (povrchovou profilometrií) apod. Kvalitu spojů, např. u povrchových modulů, lze také hodnotit nedestruktivními zkouškami – buď pomocí ultrazvuku, kde se defekt na rozhraní projeví výraznějším odrazem akustických vln, nebo pomocí infračervené termografie, kdy je testovaný vzorek ohříván rovnoměrným tepelným tokem a přítomnost defektu se projeví lokálním zvýšením teploty oproti neporušenému rozhraní.

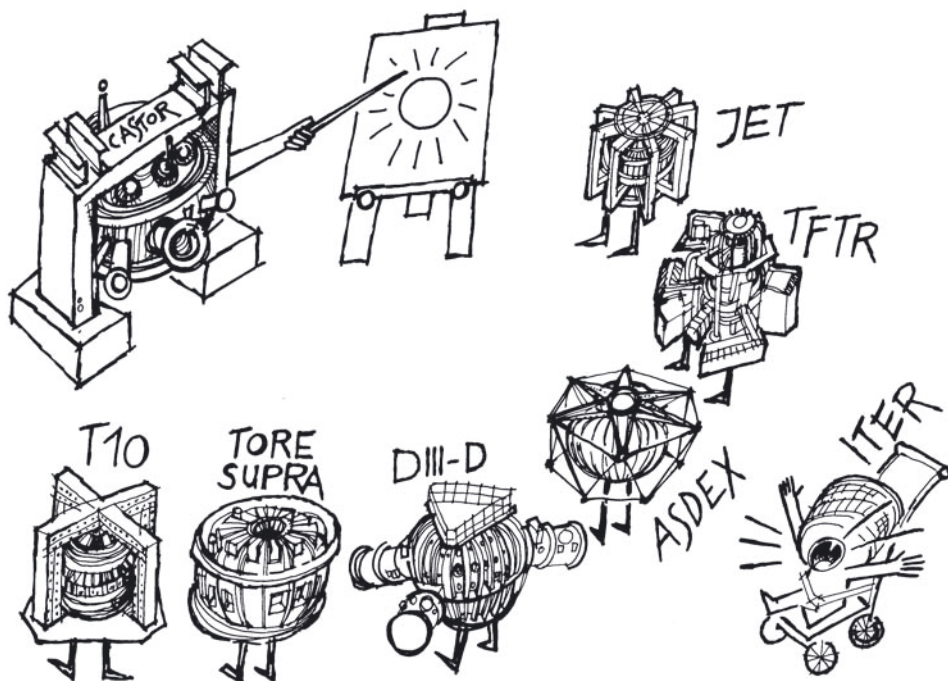
Pronikavost izotopů vodíku a účinnost permeačních bariér se zkouší dvěma způsoby – v plynné fázi a v tekutém kovu. V prvním případě je testovaný vzorek z jedné strany vystaven vodíkovému nebo deuteriovému plynu daného tlaku a na druhé straně je sledován nárůst tlaku v původně evakuované komoře daného objemu, způsobený pronikajícím plynem. Jeho složení bývá rovněž analyzováno hmotnostním spektrometrem. Porovnáním pronikavosti v materiálu bez bariéry a s bariérou je pak stanoven TPRF. Alternativními metodami jsou iontová implantace

nebo jednostranné sycení (hydrogen charging), při kterém je evakuovaná komora se vzorkem naplněna daným množstvím vodíku a následně je sledován pokles tlaku, spojený s jeho pronikáním vzorkem. Ve druhém případě, který je obvykle používán jen na materiály a povlaky, které úspěšně prošly prvním typem zkoušky, jsou tyto na jedné straně vystaveny tekutému kovu (slitině olova a lithia) s obsahem tritia; jeho pronikání na druhou stranu je pak sledováno speciálním monitorovacím systémem.

Jak již bylo řečeno výše, vlastnosti materiálů se mění s ozářením, proto jsou fúzní materiály podrobeny i ozařovacím experimentům. Zde se nejedná o zkoušku v pravém slova smyslu – podstatou je spíše zkoušení žádaných vlastností před a po ozářením. Pro ozařovací experimenty jsou v současné době používány zejména klasické štěpné reaktory. Významnou komplikací je radioaktivita ozářených materiálů – ve většině případů s nimi musí být nakládáno v horkých komorách, což značně omezuje možnosti testování. Energetické spektrum neutronů ze štěpných reaktorů se také poněkud liší od energií fúzních neutronů; porovnání jejich účinků je tedy pouze přibližné. Proto je v rámci tzv. širšího přístupu k fúzi v plánu vybudovat specializované zařízení, zvané IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility), které poskytne dostatečné toky neutronů s energiemi kolem 14 MeV, relevantní pro fúzi.

Materiálové nároky fúzních aplikací jsou vysoké a volají po stále dalších inovacích. Navíc je třeba uvést, že s některými kombinacemi materiálového zatížení, resp. požadavky na odolnost materiálů se ve fúzním programu setkáváme v technické praxi vůbec poprvé v dějinách lidstva a jejich praktické zvládnutí představuje v oboru materiálového inženýrství mimořádnou výzvu. Technologie vzniklé v rámci fúzního programu budou nicméně využitelné i v jiných aplikacích, ať už jde o nové metody povlakování, zpracování kovů s vysokou čistotou, vývoj funkčních kompozitů apod.

# 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 dostaveníčkem 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

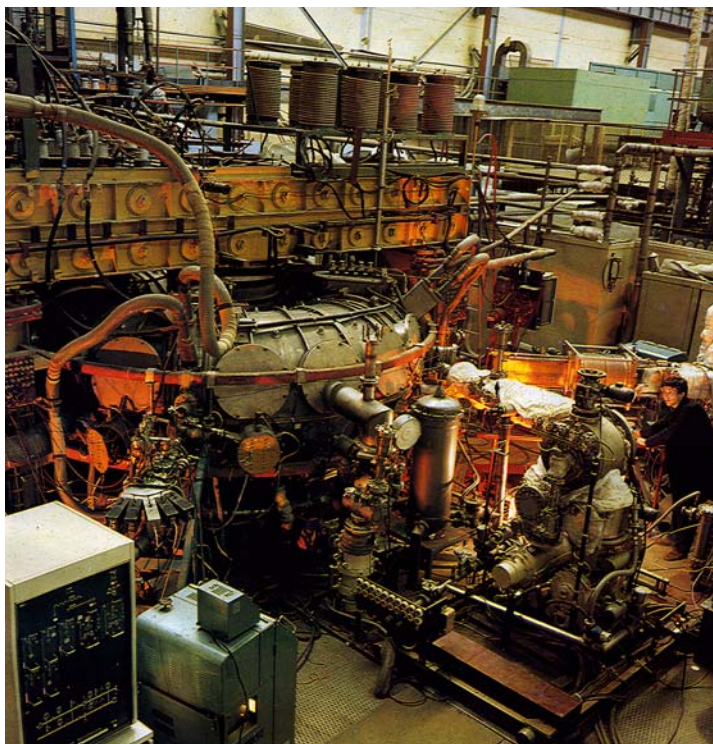




Účastníci VI. zasedání  
Poradního výboru Association  
EURATOM IPP.CR v roce 2003  
před budovou Ústavu fyziky  
plazmatu AV ČR.

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. (zejména prostřednictvím Centra výzkumu Řež, s. r. o.), Ústav fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského AV ČR, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, Ústav jaderné fyziky AV ČR, 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 budíž 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 2012 se při 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 dalších zemí 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 gruzín-



**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.**

ském Tbilisi a konečně s univerzitou ve Lvově na Ukrajině.

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 1994 až 1998 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. Přímou 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 rozšíří. 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



# TOKAMAKY A VESMÍR

Když americký fyzik Irwing Langmuir (1881–1957) poprvé použil slovo plazma pro ionizovaný plyn v doutnavém výboji, asi netušil, jak různorodé stavy látky bude toto slovo v budoucnosti označovat. Ale popořadě. Ve dvacátých letech 20. století pracoval Langmuir ve výzkumné laboratoři společnosti General Electric (*General Electric Research Laboratory*), kde zkoumal vlastnosti doutnavých výbojů na parách mědi. Zatímco v okrajové vrstvě výboje bylo velmi málo elektronů, uvnitř byl jejich počet přibližně roven počtu iontů a prostředí bylo elektricky neutrální. Přesto ale mělo mnohem pestřejší vlastnosti, než má obyčejný plyn. Langmuir začal tomuto prostředí říkat plazma. Pohnutky, které ho k tomu vedly, jsou dodnes nejasné. Jeho tehdejší spolupracovníci se shodují v tom, že mohlo jít buď o podobnost chování nabitých částic s krevní plazmou, nebo že Langmuir použil slovo plasma pro jeho původní význam v Řečtině, kde znamená tvarovat nebo zaujmout tvar [1]. A doutnavé výboje, které zkoumal, se dokázaly snadno zformovat do tvaru nádoby, v níž hořely. Stačí si jen vzpomenout na roztodivné tvary neonových reklam svítících jako podivná mementa na nejnevhodnějších místech.

Langmuir používal slovo plasma pro vnitřní část doutnavého výboje od počátku 20. století. V tištěné podobě ho ale poprvé použil až v roce 1928 v článku *Oscillations in Ionized Gases*, který vyšel v srpnovém čísle věstníku *Proceedings of the National Academy of Sciences* (Proc. Nat. Acad. Sci. 14, 627, 1928). Langmuir zde napsal: „Slovo plasma budeme používat

*k popisu oblasti obsahující vyrovnaný počet iontů a elektronů.“*

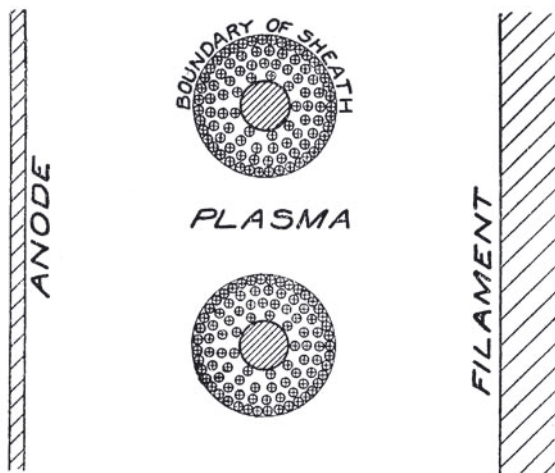
Původně bylo tedy slovo plasma použito pro slabě ionizovaný plyn v doutnavém výboji. Dnes plazmatem nazýváme jakékoli prostředí, které obsahuje volné nosiče nábojů (je tedy nějakým způsobem ionizované), je kvazineutrální (tedy počet kladných a záporných nábojů je přibližně stejný) a vykazuje kolektivní chování (reaguje na elektrická a magnetická pole a samo je vytváří). Do plazmatu zahrnujeme prostředí ionosféry, kanály blesků, obloukové výboje, fúzní plazma, plazma v nitru hvězd, plazma v mlhovinách, plazma hvězdných větrů nebo plazma v mezigalaktickém prostředí.

## PLAZMA VESMÍRNÉ, PLAZMA LABORATORNÍ ANEB ROZDÍL JE V ROZLEHLOSTI

Celý raný vesmír byl v plazmatickém skupenství. V období, kdy ve vesmíru ještě neexistovala látka složená z neutronů a protonů, můžeme hovořit o tzv. kvarkovém-gluonovém plazmatu, které bylo složené z kvarků a gluonů [2]. Jeho éra skončila přibližně stotisícinu sekundy po vzniku světa. V tomto období se vesmír rozepnul natolik, že gluony (z anglického *glue*, lepit) začaly vytvářet jakési podivné lepidlo. Podivné proto, že lepí jen na vzdálenostech větších než  $10^{-15}$  m. Na kratších vzdálenostech nelepí. Je to podobné jako žvýkačka mezi prsty – pocítíte ji teprve tehdy, když od sebe prsty začnete vzdalovat. A toto pojivo začalo ve vesmíru pojit v jedné stotisícině sekundy po jeho vzniku, v okamžiku, kdy byly kvarky ode sebe natolik vzdálené, že gluonové pojivo

## IRWING LANGMUIR

(1881–1957) je americký fyzik a chemik, který získal Nobelovu cenu za chemii pro rok 1932 za výzkum chemických procesů na površích látek. Zabýval se metalurgií, inertními plyny a fyzikou plazmatu. Jako první použil slovo plazma jako název ionizovaného prostředí. Je po něm pojmenována Langmuirova sonda pro měření hustoty, teploty elektronů a potenciálu v plazmatu a Langmuirův soliton (osamocená vlna v plazmatu). Vynalezl vakuovou elektronku. Nezávisle na Sahovi odvodil v roce 1923 Sahovu rovnici pro velikost tepelné ionizace plazmatu. Jako první experimentálně detekoval elektrickou dvojrivrstvu.



Nalevo Irwing Langmuir. Napravo: ručně kreslený obrázek z článku, v němž Langmuir poprvé v roce 1928 použil slovo plazma pro ionizované prostředí.

začalo plnit svou úlohu. Kvarky se slučovaly do dvojic a trojic a v obrovském počtu z nich začaly vznikat protony, neutrony a další částice. Jedna forma plazmatu (kvarkové-gluonové) byla nahrazena jinou formou plazmatu z protonů, elektronů a neutronů. V několika minutách existence vesmíru se protony a neutrony formovaly do lehkých atomových jader. Plazmatické skupenství ale přetrvávalo dále, až do 400 000 let existence vesmíru. V tomto období vesmír ochladnul na několik tisíc kelvinů, atomová jádra a elektrony se spojily v neutrální atomy a vzniknul neutrální plyn. Plazmatické období vesmíru, které nazýváme Velkým třeskem, skončilo. Tento fázový přechod měl velké důsledky. V plazmatickém skupenství je záření vázáno na látku, v plynném nikoli. Ukažme si to na nitru našeho Slunce. Kdyby foton, který se zde uvolní při termojaderné fúzi, letěl přímo k povrchu, trvala by mu cesta něco málo přes dvě sekundy. Jenže takový foton letí plazmatem, uletí sotva několik centimetrů a je chycen látkou a vyzařen zcela

náhodným směrem. Je to jako opilý, který se vydá z restaurace domů. Pokud bude bloudit zcela náhodně, bude sice jeho průměrná poloha i po dosti dlouhé době v místě, odkud vyšel, ale tu a tam se bude ocitát ve stále větších vzdálenostech od restaurace. V řeči matematiky bychom řekli, že jeho průměrná poloha se nemění, ale střední kvadratická fluktuační poloha roste s časem. Předpokládejme, že mu cestou budeme alkohol dodávat, aby náhodou nevystřízlivěl a nevydal se přímou cestou domů. Pokud neusne, po dosti dlouhé době se určitě ocitne ve správné vzdálenosti, ale bohužel ve špatném směru. Fotony v plazmatu se chovají podobně. Od jádra Slunce se vydávají náhodnými směry, jsou zachytávány a znovu vyzařovány. Cesta fotonu k povrchu Slunce tak může trvat i milion roků. Navíc budou fotony, které opustí povrch Slunce, dávnými potomky původního fotonu a tito potomci budou mít mnohem nižší energii [3]. Vazba záření na plazma je společná jak vesmírnému, tak laboratornímu plazmatu. Na konci Velkého třesku se uvolnilo světlo, pro

keré začal být nově vzniklý neutrální plyn průhledný. V té době šlo opravdu o světlo. Jenže vesmír se rozpíná a vlnová délka světla tuto expanzi sledovala. Dnes má toto „světlo“ vlnovou délku v milimetrové oblasti a říkáme mu reliktní mikrovlnné záření. Je svědkem dávných časů, při kterých byl vesmír v plazmatickém skupenství a světlo bylo ještě vázáno na látku.

Slovo plazma tedy označuje mnoho druhů plazmatu, jehož parametry jsou v neuvěřitelném rozsahu hodnot. Teplota plazmatu v nejchladnějších zákoutích vesmíru je jen několik kelvinů a koncentrace je méně než jeden proton v metru krychlovém. Naopak teplota plazmatu, které vzniká při srážkách těžkých iontů na největších urychlovačích světa, je tisíce miliard kelvinů a hustota činí desetinásobky hustoty atomového jádra.

Na první pohled by se mohlo zdát, že laboratorní plazma a plazma v hlubinách vesmíru mají pramálo společného. Opak je ale pravdou! Mnoho jevů probíhá stejně tak v laboratoři jako ve vesmíru. Rozdíl je jen v rozlehlosti dějů. V minulém století byl i podstatný rozdíl ve způsobu zacházení s plazmatem. Laboratorní plazma vytvářeli vědci aktivně ve svých laboratořích, kdežto astronomové jen pasivně pozorovali vzdálené mlhoviny a hvězdy. Situace se ale velmi rychle mění. Plazmoví fyzikové začínají využívat stávající zařízení, jako jsou například tokamaky, k astronomickým pozorováním (například temné hmoty) a astronomové připravují v laboratořích plazma s takovými parametry, jaké mělo ve zlomcích sekundy po vzniku vesmíru. V roce 2000 se v komplexu CERN podařilo po šesti letech experimentů poprvé

připravit kvarkové-gluonové plazma a pozorovat stav látky, ve kterém byl vesmír pouhou stotisícinu sekundy po svém vzniku. Jakýsi „Malý třesk“ v laboratoři. Započalo plodné období spolupráce plazmových fyziků, částicových fyziků a astronomů a jednotlivé vědní disciplíny začaly vzájemně doplňovat skládku poznání vlastností hmoty za – z hlediska člověka – extrémních podmínek.

## CHVÁLA PODOBNOSTI

Často se stává, že jevy v přírodě probíhají v různých měřítcích. Vibrace skutečného letadla za letu můžeme nahradit vibracemi mnohem menšího modelu v aerodynamickém tunelu. Rozměry letadla jsou sice jiné, ale jiný je i tlak, rychlost proudění okolního prostředí a časové škály probíhajících dějů. Pokud víme, že dané hodnoty parametrů v aerodynamickém tunelu odpovídají nějakým skutečným hodnotám pro letadlo letící například ve výšce 10 kilometrů, máme vyhráno. Jevy naměřené v tunelu určitým přesně definovaným způsobem odpovídají dějům probíhajícím na opravdovém letadle. Fyzikové tomu říkají *škálovací transformace*. Zkrátka, změna měřítka je doprovázena přesně definovanými změnami dalších parametrů. U plazmatických dějů je tomu podobně. Často nalézáme podobné útvary jak v laboratorním, tak ve vesmírném plazmatu. Příkladem mohou být vlákna zkroucená do šroubovic. Nalézáme je nejen v plazmatu vzniklém při explozi drátku, na jehož konce bylo přivedeno napětí, ale i v ohonech komet s rozměry stovek milionů kilometrů nebo v obřích plazmových vláknecích

nacházejících se v blízkosti středu naší Galaxie, jejichž délka činí dokonce desítky světelných roků. Jiné prostorové měřítko s sebou přináší i jinou koncentraci, teplotu a magnetické pole u těchto útvarů.

V pozadí všech jevů je stejný mechanismus, který souvisí s magnetickým polem. Plazma s magnetickým polem má nejmenší energii, pokud jsou magnetické siločáry zkroucené právě do šroubovic. Za vznikem šroubovic tedy stojí přirozená snaha systému zaujmout co možná nejnížší energii. A je jedno, zda jde o centimetrový výboj v laboratoři, kometární ohon nebo o obří plazmové vlákno v blízkosti středu Galaxie. Obdobný jev pozorujeme i v tokamaku. Pokud by měl tokamak jen toroidální pole (ve směru komory), bude plazma v něm velmi nestabilní. Pokud je v tokamaku přítomno pole toroidální i poloidální (ve směru kolem plazmového sloupce), výsledné pole má tvar šroubovice a plazma bude výrazně stabilnější, neboť je systém jako celek blíže energetickému minimu. Původně chtěl sovětský fyzik Andrej Sacharov (1921–1989) poloidální složku generovat proudem v pevném vodiči, levitujícím ve vakuové komoře, ale nakonec nechal proud téci přímo plazmatem.

Šlo o geniální nápad, který učinil tokamak jedničkou mezi fúzními zařízeními.

Základním podobnostním prvkem v plazmatu jsou samotná vlákna. Ta jsou totiž typická pro elektromagnetickou interakci. Samotná gravitace preferuje kulovité struktury. Plazma je ovšem dominantně ovládáno elektromagnetickými procesy, při kterých vznikají lineární a plošné

útvary. Plazmatem teče snadno elektrický proud a oblast, kterou proud protéká, vytváří kolem sebe magnetické pole. Toto pole oblast stlačuje do podoby vlákna. Různé oblasti fyziky plazmatu tato vlákna nazývají různě: pinče, výtrysky, vlákna, filameny. Nicméně podstata jevu je opět stejná od milimetrových škál do škál desítek světelných roků: oblast protékající elektrickým proudem je držena vlastním magnetickým polem. Změna měřítka s sebou přináší jen různé koncentrace, teploty a hodnotu magnetického pole u jednotlivých útvarů. Již nás nepřekvapí, že vlákno zkroucené do šroubovice je stabilnější než jednoduché vlákno válcovitého tvaru. Elektromagnetická interakce vytváří také plošné útvary, například překrásné stěny vlnících se polárních září.

V roce 2010 vyfotografovala Herschelova vesmírná observatoř molekulární mračno VELA C v infračerveném oboru. Jde o oblak plynu a prachu v blízkosti roviny Galaxie, jenž se nachází ve vzdálenosti 2 300 světelných roků od nás v souhvězdí Plachet. Mračno je známé jako hvězdná porodnice s překotnou tvorbou hvězd. Analýza snímků pořízených dne 18. října 2010 na pěti vlnových délkách (70, 160, 250, 350 a 500  $\mu\text{m}$ ) se prováděla v letech 2011 a 2012. Překvapení bylo veliké. Celá oblast je propletením mnoha vláken a předhvězdná jádra vznikají jako malé svítící uzlíky v těchto vláknecích. Zdá se, že i při zrodu hvězd hraje elektromagnetická interakce nemalou roli [4].

Slyšeli jste někdy, že mají tokamaky něco společného s černými dírami? Na první pohled se zdá, že jde o naprosto odlišné oblasti vědy,

## HERSCHELOVA VESMÍRNÁ OBSERVATOŘ

je sonda Evropské kosmické agentury, která byla vynesena do vesmíru 14. května 2009. Jde o obří infračervenou observatoř se zrcadlem o průměru 3,5 metru, která byla umístěna do Lagrangeova bodu L2 soustavy Země-Slunce, tj. 1,5 milionu kilometrů za Zemí směrem od Slunce, kde se vyrovnávají přitažlivé síly Země, Slunce s odstředivou silou oběhu sondy kolem Slunce. Observatoř pokrývá obor vlnových délek od 55  $\mu\text{m}$  a je pojmenována po vynikajícím anglickém astronomovi a objeviteli infračerveného záření Williamu Herschelovi. V současnosti jde o vůbec největší dalekohled umístěný lidstvem ve vesmíru. V infračerveném oboru je možné pozorovat nejchladnější zákoutí vesmíru, ve kterých se rodí nové hvězdy a galaxie.



Část oblasti Vela C fotografovaná Herschelovou vesmírnou observatoří 18. října 2010. Obrázek je kompozicí v nepravých barvách. Červená barva byla přiřazena přijímacím anténkám (umístěným v ohnisku dalekohledu) s vlnovou délkou 250  $\mu\text{m}$ , zelená koresponduje s vlnovou délkou 160  $\mu\text{m}$  a modrá s vlnovou délkou 70  $\mu\text{m}$ . Na kratších vlnových délkách se zobrazuje modře horký prach v mlhovině RCW 36. Na delších vlnových délkách je v červené barvě dobře patrná síť chladných hustých vláken s rodícími se hvězdami. Zdroj ESA.

které spolu nemohou nijak souviset. Ale není tomu tak. V tokamaku je toroidální komora, ve které je velmi husté a horké plazma držené magnetickým polem. Černé díry známe dvojího typu. Jedny vznikají v závěrečných fázích vývoje hvězd a jejich hmotnosti jsou několika-násobkem sluneční hmotnosti. Druhý typ sídlí v centrech větších galaxií. Hmotnosti těchto obřích černých děr (veleděr) jdou od milionů do miliard hmotností Slunce. Kolem obou typů černých děr se nachází rotující plyn a prach, který

postupně padá do černé díry. Padající látka podléhá vnitřnímu tření a intenzivně se zahřívá. V blízkosti černé díry proto vzniká toroidální oblast rotujícího plazmatu, které říkáme akreční disk. Toroidální geometrií ale podobnost s tokamakem nekončí. V plazmatu akrečního disku je silné magnetické pole, dochází zde k rozvoji nejrůznějších vln a nestabilit, k přepojení magnetických siločar doprovázených prudkým ohřevem plazmatu, kvaziperiodickým oscilacím atd. Všechny tyto jevy jsou společné všem



třem prostorovým škálám: metrům u tokamaků, desítkám kilometrů u hvězdných černých děr a stovkám světelných roků u akrečních disků veleděr. Připomeňme si, že myšlenka tokamaků pochází z padesátých let 20. století. Myšlenku existence černých děr vyslovil anglický filosof a geolog John Michell (1724–1793) již v roce 1783, ale za objev první černé díry je považován až rok 1971, kdy anglický astronom Paul Murdin (\*1942) ztotožnil rentgenový zdroj Cyg X1 v souhvězdí Labutě s hvězdnou černou dírou o hmotnosti 8 Sluncí.

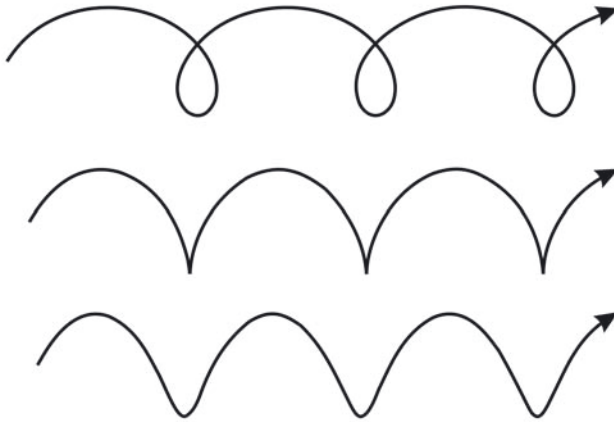
Škálovatelnost dějů v plazmatu (bez přítomnosti gravitace) umožňuje provádět počítačové simulace některých dějů při jediném výpočtu – aniž bychom museli rozlišovat, zda jde o plazma laboratorní nebo o plazma astronomické. Jednotlivé proměnné (hustota, teplota, magnetické pole, čas, délka) se převedou do bezrozměrných proměnných, ve kterých probíhá numerická simulace. Po skončení simulace se výsledky přeškálují do všech potřebných situací. Takové výpočty se provádějí ve velkých výpočetních centrech, například v Superpočítačovém centru v San Diegu (SDSC, *San Diego Supercomputer Center*) [6] nebo v německém Leibnizově superpočítačovém centru v Garchingu u Mnichova (LRZ, *Leibniz-Rechen Zentrum*) [7]. Numerické simulace jsou ve fyzice plazmatu nedílnou součástí tří pilířů plazmové fyziky: experimentu, teorie a simulací.

Říká se, že každé pravidlo má svou výjimku. Nejinak je tomu i zde. Gravitace vytváří nepochybně kulovité struktury (planety, hvězdy), nicméně podle teorie by ve vesmíru mohly

existovat i lineární gravitační útvary, kterým se říká *gravitační struny*. I přes obrovské úsilí se je dosud nepodařilo nalézt, a tak je jejich existence nejistá. A naopak: u elektromagnetické interakce dominují lineární a plošné útvary, ale při bouřkách je tu a tam pozorován kulový blesk – zjevně kulovitá struktura neznámé povahy, jejíž podstatu se dosud nepodařilo vysvětlit. Jak u gravitační, tak u elektromagnetické interakce nám prozatím některá jejich tajemství zůstávají skryta [5].

## DRIFTY

Na nabitou částici působí v magnetickém poli poněkud zvláštní síla. Je totiž kolmá jak na magnetické siločáry, tak na rychlost částice. Tato síla je oběma veličinám úměrná, čím silnější je magnetické pole a čím větší je rychlost částice, tím větší je působící síla. V homogenním magnetickém poli je výsledkem pohyb částice po kružnici. Tento základní krouživý pohyb se nazývá gyrace neboli Larmorova rotace, poloměru kružnice říkáme Larmorův poloměr podle irského fyzika Josepha Larmora (1857–1942), který se zabýval kontrakcí délek, dilatací času, zářením nabitých částic a jejich vzájemnou interakcí s magnetickým polem. Jako jeden z prvních předpokládal, že geomagnetické bouře souvisí se slunečními erupcemi a jsou způsobeny elektrony přicházejícími ze Slunce. Frekvence základního krouživého pohybu částic se nazývá cyklotronní frekvence, protože obdobný pohyb vykonávají částice urychlované v cyklotronu.



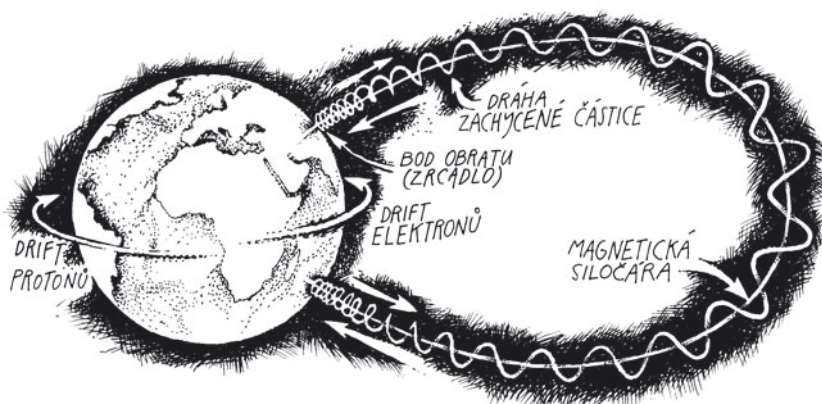
**Trochoidy.** Prostřední trochoida se nazývá *cykloida*, odpovídá nulové počáteční rychlosti nebo pohybu bodu na okraji kola auta bez prokluzování. Horní (dolní) křivka odpovídá jízdě automobilu, při které je obvodová rychlost vyšší (nižší) než při běžné jízdě – kolo se protáčí (netočí dosti rychle).

Pokud má částice složku rychlosti podél siločar, zachovává si ji a výsledkem je pohyb po šroubovici podél magnetických siločar. Poněkud odlišná situace ale nastane v přítomnosti dalších silových polí nebo pokud se magnetické pole nějakým způsobem pomalu mění. Nejjednodušší je, jestliže na částici kromě homogenního magnetického pole působí navíc homogenní elektrické pole. Střed gyračního pohybu se začne zdánlivě nepochopitelně přesouvat kolmo na obě dvě pole (tedy kolmo na pole elektrické i magnetické). Takovým příčným pohybům říkáme drifty. Pojdme si objasnit, jaká je jejich příčina. Samotné magnetické pole energii nemění, mění jen směr rychlosti částice. Elektrické pole je potenciální pole a částice se při krouživém pohybu dostává do oblastí s různě velikou potenciální energií. Tím se mění její kinetická energie a současně rychlost. Různě rychlé částice mají ale různý Larmorův poloměr, a tak se při krouživém pohybu částice dynamicky upravuje Larmorův poloměr podle toho, jaká je v daném místě potenciální energie. A výsledek? Zkuste si vzít papír a nakreslit kružnici. Ale nikoli obyčejnou kružnici, vždy když budete dole, zmenšíte její poloměr a když vás tužka zavede nahoru, naopak poloměr zvětšíte. Už víte, jaký bude výsledek? Pokud jste kroužili ve směru hodinových ručiček, začne se kružnice odvalovat směrem doprava. Pokud jste kroužili

naopak, odvaluje se směrem doleva. Výsledná křivka se nazývá *trochoida* a přesně po takové křivce se pohybuje nabitá částice v kombinaci elektrického a magnetického pole.

Tuhle křivku dostaneme i jinak. Stačí sledovat kolo jedoucího automobilu, na jehož obvodu je nalepena nějaká značka. Pokud kola neprokluzují, opisuje značka cykloidu, která také patří do rodiny trochoid. Pokud se bude auto rozjíždět na ledu a začnou mu prokluzovat kola, dostanete přesně tu křivku, kterou jste kreslili na list papíru – trochoidu. Při brždění na ledu bychom dostali další z rodiny trochoid. U nabitých částic závisí druh trochoidy na počáteční rychlosti částice. Je-li počáteční rychlost nulová, bude křivka, po níž se pohybuje částice, cykloidou.

V přírodě existuje značné množství driftů, nejenom drift v případě elektrického a magnetického pole [8]. Drifty vznikají i v přítomnosti gravitačního pole, v poli odstředivých sil nebo k jejich vzniku postačí pouhé zakřivení magnetických siločar. Drifty se nevyhnou částicím v plazmatu jakýchkoli rozměrů, pokud je splněna základní podmínka: všechna pole se musí měnit jen málo v porovnání s jednou Larmorovou otočkou částice. Rozumí se málo jak časově (za dobu jedné otočky), tak prostorově (na rozměrech jedné otočky). Driftování částic je jednou z mnoha příčin úniku nabitých částic



Driftování v zemském magnetickém dipólu.

z tokamaku. Drift v nehomogéním magnetickém poli nejprve rozdělí částice podle znaménka náboje a posléze drift v takto vzniklém elektrickém poli nasměruje plazma jako celek na stěnu vakuové komory. Částečně se úniku nabitých částic driftý dá zabránit přítomností poloidálního pole, které siločáry magnetického pole stočí podobně jako je tomu v krouceném laně, a tím umožní vznik kompenzačních proudů. Driftování se nevyhnu ani elektrony a protony slunečního větru nebo kosmického záření zachycené magnetosférou Země. Tyto částice se pohybují po šroubovicích podél magnetického pole Země od pólu k pólu. V polárních oblastech je hustší pole vytlačí a způsobí jejich odraz zpět. Takovému jevu říkáme magnetické zrcadlo. Částice konají tedy dva základní periodické pohyby: 1) gyraci (kroužení kolem siločar); 2) pendlování od pólu k pólu. K těmto dvěma pohybům se přidává drift způsobený zakřivením magnetických siločar. Částice jsou kromě dvou výše zmíněných pohybů pomalu unášeny driftem ve směru kolem rovníku. Tento pohyb vede ke vzniku tzv. prstencového proudu magnetosféry. Driftové pohyby probíhají i na mnohem větších škálách, například v akrečních discích černých děr v centrech galaxií. Driftování proto opět patří k jevům, které pozorujeme na všech prostorových škálách, pokud se přítomná pole mění málo za jednu Larmorovu

otočku částice kolem magnetické siločáry. Magnetická zrcadla, která přirozenou cestou vznikají v dipólovém poli Země, lze vytvořit za pomoci soustavy cívek i v laboratoři. Dříve patřila k nadějným směrům udržení plazmatu pro řízenou fúzi. Na jedné straně relativně jednoduchá konstrukce (oproti uzavřeným systémům), ovšem na straně druhé enormní ztráty částic otevřenými konci. Nevhodná křivost magnetických siločar vedla k nestabilitám, které myšlenku magnetických zrcadel ve hře o fúzi diskvalifikovaly.

## REZONANCE A UBÍHAJÍCÍ ELEKTRONY

Plazma se velmi snadno rozvlí. Stačí nepatrný podnět a vzniknou vlny nejrůznějších druhů na nejrůznějších frekvencích. Jedna z nich ale přece jen bývá zastoupena nejčastěji – plazmová frekvence elektronů. Je to nejpřirozenější frekvence, při které se elektrony vychylují vzhledem k iontům tu na jednu a tu na druhou stranu. Nikoli každý zvlášť, jde o kolektivní proces, jakoby všechny elektrony současně táhly za jeden provaz sem a tam. Obecně probíhají pohyby elektronů na vyšších frekvencích než pohyby iontů. To je způsobeno jejich podstatně nižší hmotností. S pohyby iontů jsou většinou spojeny různé formy akustických vln šířících se

plazmatem, elektrony naopak snadno reagují na elektromagnetické vlny a svými pohyby je samy vytvářejí. Módů jednotlivých vln je bezpočet. Vlnoplochy už zdaleka nejsou kulové, jak jsme zvyklí u vln v jednoduchém prostředí, často jsou různě deformované a je jich několik vnořených do sebe. V některých směrech se určité módy nešíří vůbec. Tuto anizotropii přináší přítomnost magnetického pole.

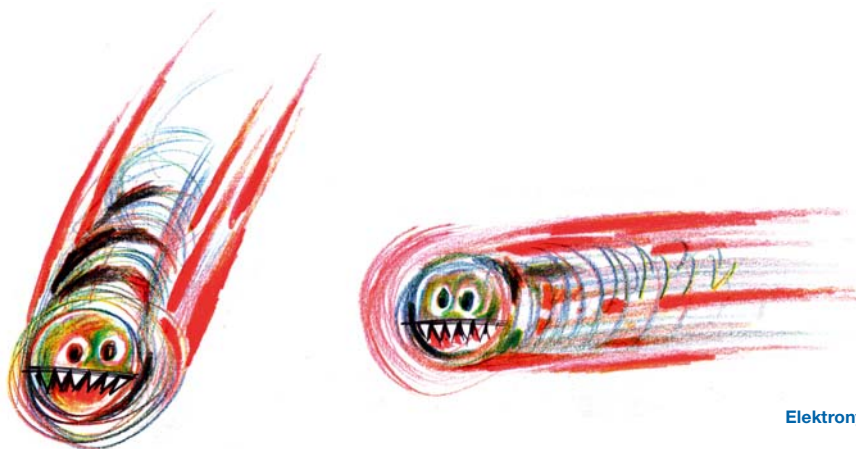
Věnujme se nyní šíření elektromagnetických vln plazmatem. Pokud je plazma bez magnetického pole, je situace relativně jednoduchá. Vlny vysokých frekvencí plazmatem procházejí, vlny nízkých frekvencí nikoli. Hranicí je právě plazmová frekvence elektronů. Frekvence, které jsou na hranici mezi šířitelností a nešířitelností vlny, se obecně nazývají *mezní*, anglicky *cut-off* frekvence. Na nižších frekvencích jsou elektrony schopny reagovat na zákmity elektrického pole a výrazně šíření vlny ovlivní. Plazmová frekvence závisí jednoduchým způsobem na koncentraci plazmatu a pokud se nám podaří detekovat práh šířitelnosti elektromagnetické vlny, snadno z toho určíme koncentraci plazmatu. Touto metodou lze určovat koncentraci plazmatu jak v laboratorním, tak ve vesmírném plazmatu.

V přítomnosti magnetického pole je situace výrazně složitější a prostředím se šíří více vlnových módů. Jmenujme alespoň vlnu řádnou a mimořádnou ve směru kolmém na pole nebo vlnu pravotočivou a levotočivou šířící se ve směru pole. Názvy pravotočivá a levotočivá souvisí se stáčením roviny polarizace, tedy roviny kmitů elektrického pole. Jednotlivé módy se šíří jen

v některých pásmech frekvencí, a tak je zde mezních frekvencí větší množství.

Velmi zajímavé jsou tzv. *rezonance*. Jde o situace, kdy se index lomu šíření elektromagnetické vlny blíží k nekonečnu. Index lomu je podílem rychlosti světla a rychlosti šíření fáze vlny. Nekonečný index lomu znamená, že fázová rychlost vlny je nulová. Interakce částic a vln je natolik intenzivní, že vlnu zastaví a částice přeberou její energii. Právě proto jsou rezonance tak důležité. Vyšleme-li do plazmatu vhodnou vlnu vhodné frekvence tak, aby došlo k rezonanci, nabitě částice převezmou energii vlny, což znamená, že se plazma zahřeje. Na tomto principu fungují různé dodatečné ohřevy plazmatu elektromagnetickými vlnami v tokamacích i jiných zařízeních. Nejčastěji se využívá tzv. dolní hybridní frekvence, jde o jednu ze dvou rezonančních frekvencí mimořádné vlny (nazývají se dolní a horní hybridní frekvence). V principu je možné využít i další rezonanční frekvence (například cyklotronní frekvenci elektronů nebo cyklotronní frekvenci iontů).

Při interakci nabitých částic s vlnou tedy může dojít k přebírání energie vlny nabitou částicí. To může mít samozřejmě zajímavé důsledky. Představme si elektron pohybující se v elektrickém poli. Ve standardním režimu vedení elektrického proudu je urychlování elektrickým polem právě kompenzováno srážkami elektronu s okolním plazmatem. Výsledkem je pohyb elektronu konstantní rychlostí. Pokud elektron získá vyšší rychlost, než je určitá mez, situace se dramaticky změní. Pro rychle se pohybující částici účinný průřez interakce elektronu s plazmatem



Elektrony – zabijáci.

klesá a urychlování elektrickým polem převládne. Srážky už na kompenzaci urychlování nestačí. Elektron se dostane do režimu neustálého urychlování a získá až relativistické energie. Takovým elektronům říkáme *ubíhající elektrony* (anglicky *runaway electrons*). Z fyzikálního hlediska jde o velmi zajímavý jev, nicméně pro zařízení, jako je tokamak, mohou být velmi nebezpečné. Ubíhající elektrony mohou ve velkých přístrojích, jakým bude například ITER, snadno získat takové energie, že by mohly poškodit stěnu výbojové komory. V roce 1968 zveřejnili Sověti na Mezinárodní konferenci v Novosibirsku ohromující výsledky tokamaku T-3. Američané nejprve nevěřili, že údaj 1 keV oznámený Arcimovičem může být skutečnou teplotou plazmatu (ve stupních tomu odpovídá teplota téměř 12 milionů kelvinů) a z počátku se domnívali, že jde o energii ubíhajících elektronů.

K obdobnému jevu dochází i v magnetosféře Země. Za bouřek se některé elektrony dostanou do ubíhajícího režimu, je možné, že přesprahovou počáteční rychlost získaly ze srážky kosmického záření s atmosférou. Předpokládá se, že tyto elektrony rezonančně interagují s pravotočivými vlnami (tzv. R vlnami), které mají velmi nízké frekvence, pohybují se podél magnetických siločar zemského pole a vznikají například za bouřek. Říká se jim hvizdy. Frekvence těchto elektromagnetických vln je tak nízká, že odpovídá běžným zvukovým

frekvencím. Poprvé hvizdy pozoroval německý inženýr Heinrich Barkhausen (1881–1956) v roce 1918. Tehdy ještě probíhala první světová válka a hvizdy se projevovaly jako pískavé rušení odposlouchávané nepřátelské komunikace. Rovina polarizace těchto nízkofrekvenčních vln se stáčí přesně ve směru, ve kterém elektrony krouží kolem magnetických siločar zemského pole. Pokud se frekvence kroužení elektronů přiblíží frekvenci stáčení vlny, dojde k rezonanci, která je schopna elektrony urychlit na extrémní rychlosti. Říkáme jim *zabíjäcké elektrony*, jsou velmi nebezpečné, dokáží snadno poškodit přístroje sond. K tomuto jevu nedochází jen za silné bouřkové aktivity. Nízkofrekvenční elektromagnetické R vlny vznikají i při interakci plazmoidů vyvrhovaných ze Slunce s magnetosférou Země. Magnetické pole je narušeno, dochází ke geomagnetickým bouřím, elektrony excitují atmosféru a ta se rozzáří nádhernými polárními zářemi [9]. Každá krásná podívaná má ale svou stinnou stránku. U polárních září jsou to R vlny urychlující ubíhající elektrony na energie pro naše přístroje velmi nebezpečné.

## PŘEKOTNÉ DĚJE

V plazmatu občas dochází k různým typům nestabilit, které vedou k velmi rychlým dějům, v průběhu nichž se změní konfigurace plazmatu a uvolní se značné množství energie. Pro nestabi-





Záclony polárních září pod aurorálním oválem. Expedice Aurora, Birtavarre, 10. 9. 2012, Pentax K200D, ISO 800, expozice 20 s, foto Michal Malůšek. Zkuste najít Velký vůz!

lity je charakteristický exponenciální nárůst změn, mají tedy pro vnějšího pozorovatele charakter prudkých vzplanutí až explozí. Nejčastější nestability explozivního typu jsou spojeny se změnami topologie magnetických siločar. Někdy dojde jen k přepojení (rekonekci) siločar do jiné, energeticky výhodnější konfigurace, jindy ke kompletnímu přebudování magnetického pole (tzv. katastrofické rekonekci). Jiné typy eruptivních nestabilit souvisí s výměnou různých oblastí plazmatu, která vede k celkově nižší energii systému.

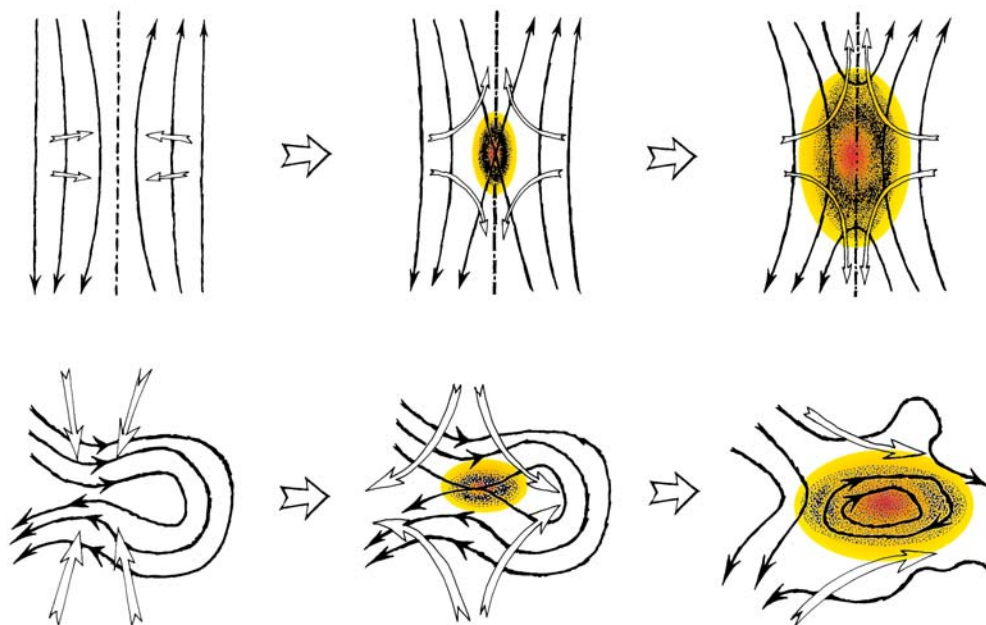
Věnujme se nejprve přepojení (rekonekci) magnetických siločar. Pokud se v určité oblasti dostanou magnetické siločáry proti sobě, je mezi nimi tzv. nulová vrstva magnetického pole. Zpravidla jde o různě zvlněnou plochu. Na jednu stranu od ní mají siločáry jeden směr, na druhou stranu opačný směr. V takové situaci je často plazma tlačeno spolu se siločárami k nulové ploše. Vede ho k tomu přirozená difúze, driftu a často i mohutné vnější toky v plazmatu. Taková situace je jakoby stvořená pro rekonekci. Magnetické siločáry jsou natlačovány do nulové plochy, kde se přepojují do nové konfi-

gurace. Ta má nižší energii. Rozdíl energií silně zahřeje plazma, objeví se vzplanutí až záblesk, nezřídka v rentgenovém oboru.

K explozivním nestabilitám, ať již způsobeným rekonekcemi či jinými jevy, dochází opět na nejrůznějších škálách. Jako první příklad uveďme výrony koronální hmoty (CME, *Coronal Mass Ejection*) na Slunci. Zde jde o typickou rekonekci magnetických siločar. Výsledkem přepojení je rentgenové vzplanutí v blízkosti povrchu Slunce a vznik plazmoidu se zamrzlým magnetickým polem, který opustí Slunce a vydá se na pouť sluneční soustavou.

TŘÍDA	TOK ENERGIE *	KLASIFIKACE
B	$< 10^{-6} \text{ W/m}^2$	nevýrazný pik
C	$10^{-6} \text{ až } 10^{-5} \text{ W/m}^2$	malé vzplanutí
M	$10^{-5} \text{ až } 10^{-4} \text{ W/m}^2$	střední vzplanutí
X	$> 10^{-4} \text{ W/m}^2$	intenzivní vzplanutí

Klasifikace rentgenových vzplanutí na Slunci (\* v rozsahu vlnových délek 0,1 až 0,8 nm).



**Obr. 7. Rekonekce. Toky plazmatu jsou znázorněny dutými šipkami, siločáry černými čarami. V druhém řádku je mechanismus výronu koronální hmoty na Slunci.**

V průměru Slunce opustí dva plazmoidy denně, v období zvýšené sluneční aktivity i více. Pokud si to takový plazmoid namíří k Zemi, budou se dít věci nevidané. Po prvotním nárazu do čelní rázové vlny naší magnetosféry odteče většina plazmatu po bocích magnetosféry. Část plazmatu se ale dostane do magnetosféry a výrazně ji naruší. Dojde ke vzniku magnetické bouře, střílka kompasu se bude divoce komíhat a nabitě částice, většinou elektrony, vybudí horní vrstvy atmosféry. Ty se potom rozzáří stěnami polárních září. Narušené magnetické pole může indukovat nežádoucí napětí v rozvodných sítích elektrického proudu, způsobit poruchy telekomunikačních sítí a dalších citlivých zařízení. Proto jsou blížící se plazmoidy pečlivě monitorovány a dokonce byla založena webová stránka věnovaná kosmickému počasí, na které můžete zjistit aktuální stav naší magnetosféry, předpověď vzniku polárních září a upozornění na k Zemi se blížící plazmoidy [10].

K nejzohlednějším nestabilitám tohoto druhu patří katastrofické rekonekce magnetarů. Magnetary jsou neutronové hvězdy s extrémně silným magnetickým polem (až  $10^{12}$  T). S tak extrémně silným magnetickým polem nemá

žádný fyzik na Zemi zkušenost. Jednotlivé atomy by v takovém poli měly být protaženy podél siločar v poměru 100:1 a šroubovicový pohyb nabitých částic by měl podléhat kvantovým zákonům, neboť pro Larmorův poloměr a rychlost pohybu částice je potřeba použít relace neurčitosti. Extrémní magnetické pole si po vzniku magnetaru postupně „sedá“ do nižší energetické hladiny. Znamená to občasná přepojení siločar doprovázená nepravidelně se opakujícími záblesky v rentgenovém až gama oboru spektra. Zatím se třikrát v historii podařilo detekovat obří záblesk, který neznamenal kosmetickou úpravu magnetického pole magnetaru, ale kompletní přebudování topologie pole, tzv. katastrofickou rekonekci. Všechny tři případy byly doprovázeny tak silným gama zábleskem, že jeho maximum bylo mimo dosah přístrojů na družicích, které tento záblesk pozorovaly. „Divoká“ fáze života magnetaru trvá několik desítek tisíc roků, pak se magnetar dostane do tiché fáze života a přestane být pro nás pozorovatelný. V naší Galaxii známe zhruba tucet aktivních magnetarů.

K explozivním nestabilitám dochází i v tokamacích, k neznámějším patří ELMy. Zkratka ELM

pochází z angličtiny a znamená Edge Localised Mode (okrajový lokalizovaný mód). Na okraji plazmatu se náhle objeví řada periodicky (byť nepravidelně) se opakujících explozí plazmatu, jež jsou doprovázena vznikem vláknitých struktur [11], [12]. Každá exploze má několik fází. Po období relativního klidu přichází pomalý nárůst tlaku na okraji plazmatu. Poté následuje prudký pokles tlaku a na závěr se objeví silné

pozorován na tokamaku ASDEX provozovaném v německém Max Planck Institutu pro plazmovou fyziku v Garchingu u Mnichova v roce 1981. Dnes se výzkumem těchto nestabilit zabývá řada fúzních pracovišť po celém světě. Dalším problémem je rekonekce vytvářející v tokamaku magnetické ostrovy, které přebírají úlohu Larmorova poloměru při difúzi napříč polem. Protože jsou rozměry magnetických

ZDROJ	SOUHVĚZDÍ	VZDÁLENOST	UVOLNĚNÁ ENERGIE	DATUM VZPLANUTÍ
SGR 0525-66	Mečoun (LMC)	165 000 ly	$6 \times 10^{37}$ J	5. 3. 1979
SGR 1900+14	Orel	20 000 ly	$2 \times 10^{37}$ J	27. 8. 1998
SGR 1806+20	Střelec	50 000 ly	$2 \times 10^{39}$ J	27. 12. 2004

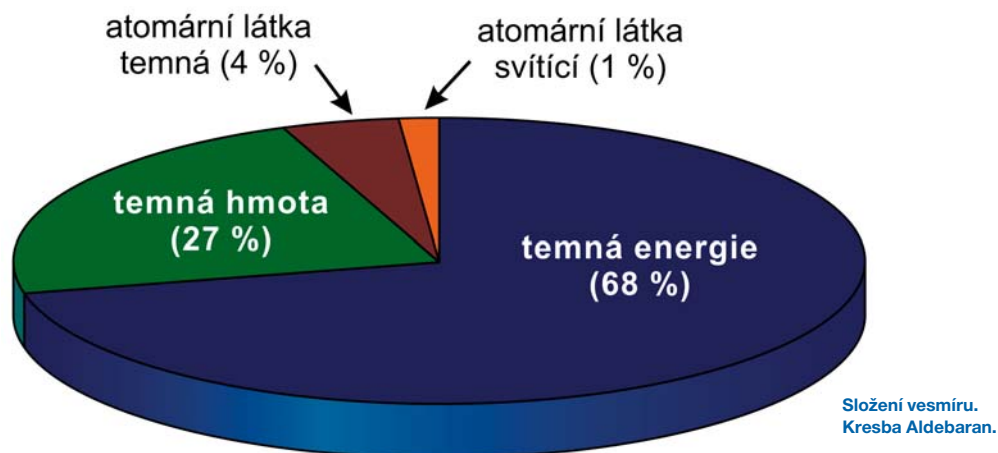
#### Katastrofické rekonekce magnetarů v historii

záření z oblasti divertoru. Tlak se stabilizuje a přichází relativní klid před dalším vzplanutím. Z teoretického hlediska tyto nestability patří do skupiny tlakem řízených magnetohydrodynamických nestabilit. Nestabilitu způsobuje výměna plazmatu mezi dvěma sousedními magnetickými siločarami, která je z energetického hlediska výhodná. Za stálých podmínek se ELMy neustále opakují, frekvence může být kolem 200 vzplanutí za sekundu. Tato vzplanutí odčerpávají podle druhu zařízení 1 až 7 procent energie plazmatu a navíc znamenají neúměrnou tepelnou zátěž na konstrukci divertoru. Je nutné buď nalézt způsob, jak vznik těchto nestabilit potlačit, nebo najít režim provozu tokamaku, ve kterém vůbec nevznikají. Jev byl poprvé

ostrovů větší než Larmorův poloměr, difúze je mnohem rychlejší, a tím i pro tokamakové plazma zhoubnější.

## TEMNÁ HMOTA

Když se podíváme v noci dalekohledem na oblohu, uvidíme planety, hvězdy, mlhoviny a galaxie. To, co spatříme, je jedno jediné procento celku – svítící atomární látka. Další tři procenta hmoty a energie ve vesmíru jsou tvořena nesvítící atomární látkou – plynem, prachem a tmavými objekty. Co je ale zbytek? Temná hmota a temná energie [13]. Přestože oba názvy zní podobně, skrývají se za nimi zcela odlišné entity. *Temná hmota*, které je přibližně 27 %, patří k látce a tvoří ve vesmíru strukturu



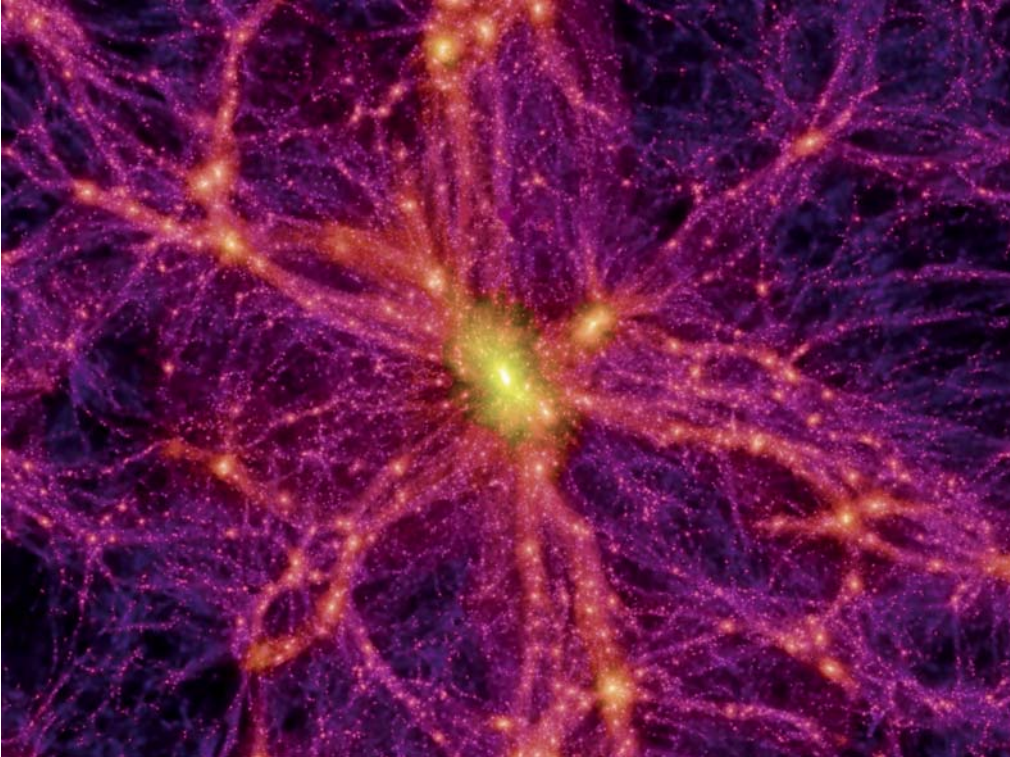
## SÍLY V PŘÍRODĚ

**Gravitační interakce** je interakce působící na všechny částice bez výjimky. Má nekonečný dosah a její intenzita ubývá s druhou mocninou vzdálenosti. Současnou teorií gravitace je obecná relativita publikovaná Albertem Einsteinem v roce 1916. Podle této teorie kolem sebe každé těleso zakřivuje prostor a čas a v tomto pokriveném světě se tělesa pohybují po nejrovnějších možných drahách, tzv. geodetikách. Obecná relativita předpověděla řadu jevů, které z Newtonovy teorie gravitace nevyplývají.

**Elektromagnetická interakce** je interakce působící na všechny částice s elektrickým nábojem. Má nekonečný dosah, mezi tělesy ubývá s druhou mocninou vzdálenosti. Polními částicemi jsou fotony, které vytvářejí mezi nabitými tělesy elektromagnetické pole. Nemají elektrický náboj, mají nulovou klidovou hmotnost a spin rovný jedné. Teorie elektromagnetické interakce se nazývá kvantová elektrodynamika (QED).

**Silná interakce** je interakce krátkého dosahu, přibližně  $10^{-15}$  m. Silná interakce je výběrová, působí jen na částice s barevným nábojem, tj. kvarky. Polními částicemi silné interakce jsou gluony (z anglického *glue*, lepit, lepidlo). Gluony spojují kvarky do větších celků, tzv. hadronů. Nejznámější jsou proton a neutron složený ze tří kvarků. Silná interakce je odpovědná za soudržnost atomárního jádra. Polní částice mají barevný náboj a proto mohou působit samy na sebe. Barevný náboj na malých vzdálenostech (při vysokých energiích) slábne a kvarky se chovají jako volné částice. Hovoříme o tzv. asymptotické volnosti kvarků. Teorií silné interakce se nazývá kvantová chromodynamika (QCD).

**Slabá interakce** je interakce s konečným dosahem, který je přibližně  $10^{-18}$  m. Působí pouze na levotočivé kvarky a leptony. Polními částicemi jsou vektorové bosony  $W^+$ ,  $W^-$  a  $Z_0$  se spinem rovným jedné. Hmotnosti polních částic jsou v rozmezí (80±90) GeV. Typickým slabým procesem je například beta rozpad neutronu. Teorie slabé interakce se nazývá kvantová flavourdynamika (QFD).



Rozložení temné hmoty (fialově) a atomární látky (žlutě) ve vesmíru. Numerická simulace podložená reálnými daty. Zdroj: MPI.

– vlákna a stěny. Její částice interagují s okolím gravitačně a s největší pravděpodobností ještě slabou interakcí. Neinteragují ani elektromagneticky, ani silně. Hustota temné hmoty, jak se na látku sluší a patří, s expanzí vesmíru postupně klesá. *Temná energie* je něco zcela jiného. Je to entita zodpovědná za zrychlenou expanzi vesmíru. Rovnoměrně vyplňuje celý vesmír a s expanzí její hustota buď vůbec neklesá, nebo se mění velmi málo. Snad jde o kvantové projevy samotného vakua, možná o novou neznámou sílu a nebo se prostě gravitace na velkých vzdálenostech chová jinak, než jsme si dosud představovali. Temné energie by mělo ve vesmíru být kolem 68 %.

Věnujme se poněkud podrobněji temné hmotě. Ukázalo se totiž, že by tokamaky mohly posloužit jako její citlivé detektory [14]. Problém temné hmoty otevřel švýcarsko-americký fyzik Fritz Zwicky (1898–1974) již na počátku třicátých let 20. století. Tehdy si povšimnul, že průměrný pohyb galaxií v kupě galaxií ve Vlesech Bereni-

ky neodpovídá gravitačnímu zákonu a dospěl k závěru, že v kupě je mnohem více látky, než pozorujeme. V roce 1968 došla americká astronomka Vera Rubinová (\* 1928) ke stejnému závěru v rámci jednotlivých galaxií. Hvězdy na periferii galaxií obíhají rychleji, než odpovídá gravitačnímu zákonu, což opět naznačuje, že v galaxiích je více hmoty, než ve skutečnosti vidíme. Gravitační projevy temné hmoty byly pozorovány v mnoha experimentech. Temná hmota také způsobuje gravitační čočkování světla přicházejícího ze vzdálených galaxií. Právě na základě gravitačního čočkování je možné temnou hmotu mapovat. Ukazuje se, že je rozložena nerovnoměrně a vytváří jakousi síť vláken, základní předivo vesmíru, které určuje i rozložení atomární látky. Ta se soustřeďuje v kříženích a uzlech vláken temné hmoty. Částice temné hmoty běžnou látkou procházejí podobně jako třeba neutrina. Na tom není nic divného: pokud bychom zvětšili atom tak, aby jeho jádro bylo veliké jako pomeranč, nacházel



## KANDIDÁTI NA TEMNOU HMOTU

**Wimpy** jsou zatím nejvážnějším kandidátem na částice temné hmoty. Jejich název vzniknul z anglické zkratky WIMP (Weakly Interacting Massive Particle, slabě interagující hmotná částice). Mělo by jít o reliktní superpartnery z období po Velkém třesku, kterým fyzikální zákony zabránily v následném rozpadu. Wimpy jsou usilovně hledány v několika desítkách experimentů, za všechny jmenujme italský experiment DAMA.

**Axiony** jsou málo hmotné, slabě interagující bosony se spinem 0 postulované kvantovou chromodynamikou. Souvisí s nepozorováním narušení CP symetrie (zrcadlová symetrie kombinovaná se symetrií mezi hmotou a antihmotou) v silné interakci. Měly by vznikat v období krátce po Velkém třesku. Jsou hledány například v experimentech CAST v komplexu CERN, ADMX na americké univerzitě ve Washingtonu nebo ALPS v německé DESY. Axiony získaly název podle čistícího prostředku používaného ve Spojených státech, neboť pomáhají „odstranit“ některé problémy teorie.

**Chameleony** jsou slabě interagující bosony se spinem 0, které interagují sami se sebou a jejich efektivní hmotnost závisí na okolním prostředí. V mezigalaktickém prostoru by měly mít výrazně menší hmotnost než v prostředí sluneční soustavy. Hledají se v obdobných experimentech jako axiony, například v experimentu ADMX na americké univerzitě ve Washingtonu nebo v experimentu GammeV v americkém Fermilabu. Název chameleon má upozornit na schopnost částice vykazovat za různých podmínek různou hmotnost.

by se první elektron přibližně ve vzdálenosti 5 kilometrů od jádra. Mezi tím zdánlivě pusto a prázdno. Tedy pusto a prázdno pro nenabitě částice, jako jsou například neutrino, která elektromagneticky neinteragují. Neinteragují ani silně, takže procházejí i atomovým jádrem, pokud se přímo netrefí do některého neutronu nebo protonu. V takovém případě interagují slabou interakcí. Neutrino mají ale příliš velké rychlosti a jejich celková hmotnost je příliš malá na to, aby vysvětlila existenci temné hmoty. Dnes jsou nejvážnějšími kandidáty na částice temné hmoty wimpy, axiony a chameleony. Tyto částice se usilovně hledají v několika desítkách experimentů po celém světě.

Zatím nejúspěšnější bylo hledání wimpů za pomoci různých scintilačních detektorů. Do roku 2011 zaznamenával jakýsi signál pouze italský detektor DAMA/Libra (je umístěn v hloubce 1500 metrů pod horou Gran Sasso). V roce 2011 zaznamenaly obdobný signál také detektory CRESST (opět pod horou Gran

Sasso) a CoGeNT v americkém dole Soudan. Interpretace naměřeného signálu je zatím nejasná a nelze ho v tuto chvíli považovat za objev wimpů. Hledání ostatních částic (axionů a chameleonů) bylo dosud zcela neúspěšné. Při detekci se využívá skutečnosti, že by se tyto částice měly v silném magnetickém poli konvertovat na snadno detekovatelné fotony. Popíšme si trochu podrobněji cernský experiment CAST (*CERN Axion Solar Telescope*). Experiment CAST hledá od roku 2003 axiony, které by měly vznikat v jádru Slunce při interakci fúzních fotonů s elektrony. CAST je dalekohled, který by měl v silném magnetickém poli konvertovat axiony z nitra Slunce na fotony rentgenového záření. Většina dalekohledu vznikla z nepotřebných dílů jiných experimentů. Firmy zabývající se recyklací odpadu by tomuto projektu mohly závidět. Jako magnet byl využit již nepotřebný prototyp dipólového magnetu pro LHC. Je dlouhý 9,2 metru a dosahuje magnetické indukce 9 T. Pro detekci vznikají

cích rentgenových fotonů slouží tři detektory, část detekční soustavy byla původně postavena pro vesmírný rentgenový dalekohled ABRIXAS. Dalekohled CAST je umístěn v budově, která kdysi sloužila pro urychlovač LEP. Bohužel, mnoho let pečlivých experimentů nepřineslo žádné výsledky.

Obdobně funguje i americký experiment ADMX, který započal již v roce 1995. Stejně jako ostatní experimenty využívá faktu, že v silném magnetickém poli by se axiony měly konvertovat na fotony, v případě zařízení ADMX (Axion Dark Matter eXperiment) na mikrovlnné fotony. Experimentální zařízení se skládá ze supravodivého magnetu o indukci 8 T, který má hmotnost 6 tun. Magnet je navinutý na vnějšku mědí potaženého ocelového válce. V nitru tohoto válce je rezonanční dutina s dvěma ladicími tyčemi, kterými lze pohybovat krokovými motory a měnit sledovanou frekvenci. Slabý signál axionů konvertovaných na fotony poté prochází zesilovačem. Bohužel se ani v tomto experimentu nepodařilo nalézt ani axiony, ani chameleony, které se hledají obdobně.

Základním problémem těchto experimentů je malý objem oblasti, ve které se nachází silné magnetické pole. U detektoru CAST je to například pouze 0,06 m<sup>3</sup>. A přitom je pravděpodob-

nost konverze axionu na foton úměrná součinu objemu a druhé mocniny intenzity magnetického pole. Právě tady by mohly pomoci velké tokamaky. Například tokamak Tore Supra má objem 31 m<sup>3</sup>. Pokud se doplní potřebnými detektory, měl by při hledání axionů být nejméně 150krát účinnější než CAST a několiknásobně účinnější než ADMX, který je současným standardem pro hledání axionů a chameleonů. Zatím probíhají předběžná jednání o využití některých velkých tokamaků i k tomuto účelu. Opět jde o krásnou ukázkou toho, že astronomie, fyzika plazmatu a částicová fyzika mají mnoho společného a některé experimenty jsou schopné řešit i na první pohled vzdálené problémy z jiných oblastí vědy.

Nakonec souvislost vesmíru a tokamaku, jakou jste určitě nečekali!

Originální spojení vesmírného a tokamakového plazmatu nabízí totiž osobnost Vladimíra Remka. První evropský kosmonaut byl tak blízko vesmírného plazmatu jako nikdo jiný v Československu, tím spíše v Česku.

Na sklonku své profesionální kariéry coby náhradník Výboru Evropského parlamentu pro průmysl, výzkum a energetiku se intenzivně zajímá o řízenou termojadernou fúzi, tedy o tokamakové plazma.



Cern Axion Solar Telescope (CAST). Foto Aldebaran 2007.

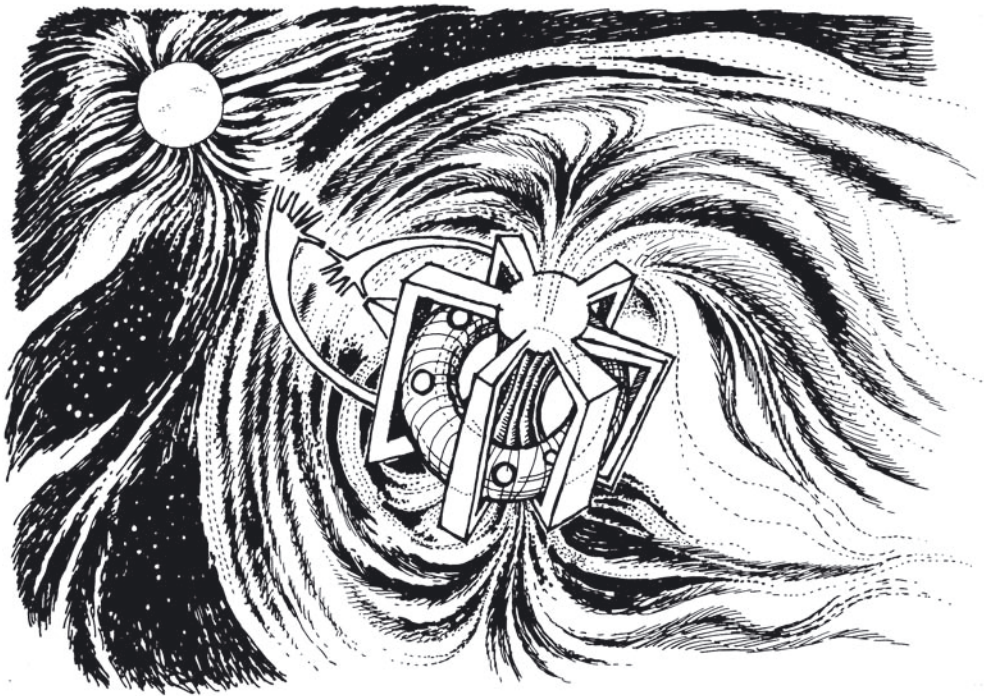
Při návštěvě největšího tokamaku JET v Culhamu v říjnu 2005 měl to štěstí a po několika měsíční odstavce tokamaku byl svědkem „prvního“ plazmatu. Namodralá záře výboje mu připomněla slova jeho kolegy Gubareva na kosmické lodi Saljut: „*Máš obrovské štěstí. Hned tak někomu se nepodaří vidět Auroru Borealis z vesmíru v takové intenzitě jako tobě!*“

Dvě štěstí jednoho člověka propojila tokamakové a vesmírné plazma způsobem, který jen tak někdo nezopakuje.

## LITERATURA

- [1] L. Tonks: *The birth of 'plasma'*; Amer. J. Phys., vol. 35, pp. 857–858, 1967
- [2] F. Antinori et al.: *ALICE and quark-gluon soup*; CERN 2004. Česká lokalizace AGA 2009; online verze: <http://www.aldebaran.cz/download/Alice.pdf>
- [3] J. Kleczek: *Život se Sluncem a ve vesmíru*; Paseka 2011
- [4] P. Kulhánek: *V molekulárním mračnu v Plachtách vznikají hvězdy ve vláknech*; Aldebaran bulletin 40/2012; online: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2012\\_40\\_vel.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_40_vel.php)
- [5] O. Kopáček, V. Karas: *Gravitace versus magnetismus*; Vesmír 91, 332, 2012
- [6] SDSC, San Diego Supercomputer Center; domovská stránka: <http://www.sdsc.edu/>
- [7] LRZ, Leibniz-Rechen Zentrum; domovská stránka: <http://www.lrz.de/>
- [8] Aldebaran: *Plazmový vesmír*; online: <http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/plazma>
- [9] Aldebaran: *Expedice Aurora aneb cesta na sever a zase zpátky*; online: [http://www.aldebaran.cz/actions/2012\\_Aurora/](http://www.aldebaran.cz/actions/2012_Aurora/)
- [10] T. Phillips: *Space Weather* (kosmické počasí); online: [www.spaceweather.com](http://www.spaceweather.com)
- [11] University of York: *Edge Localised Modes* (ELMs); 2009; online: <http://www.york.ac.uk/physics/research/plasma-physics/research/mcf/elms/>
- [12] EFDA: *Edge Localised Modes*; online: <http://www.efda.org/fusion/focus-on/edge-localised-modes/>
- [13] P. Kulhánek: *Moderní kosmologie*; Hvězdárna Valašské Meziříčí 2011; online verze: <http://www.aldebaran.cz/download/Kosmologie.pdf>
- [14] R. Arnoux: *Will tokamaks unveil the #1 mystery of the Universe?*; ITER newline 227, 15 Jun 2012; online: <http://www.iter.org/newsline/227/1196>

# 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-

#### plazma

D-T reakce: 80 % energie odnášejí neutrony unikající skrz magnetické pole a 20 % energie zůstává se zachycenými alfa částicemi v plazmatu.

#### obal [blanket]

Neutrony vyrábějí z lithia tritium a ohřívají obal.

#### stínící struktura

#### výměník

Teplo vyrábí páru pohánějící běžnou turbínu.

#### supravodivé magnety

#### deuteriové palivo

#### kryodestilace

Tritium a deuterium se vrací zpět do plazmatu, helium je odpad.

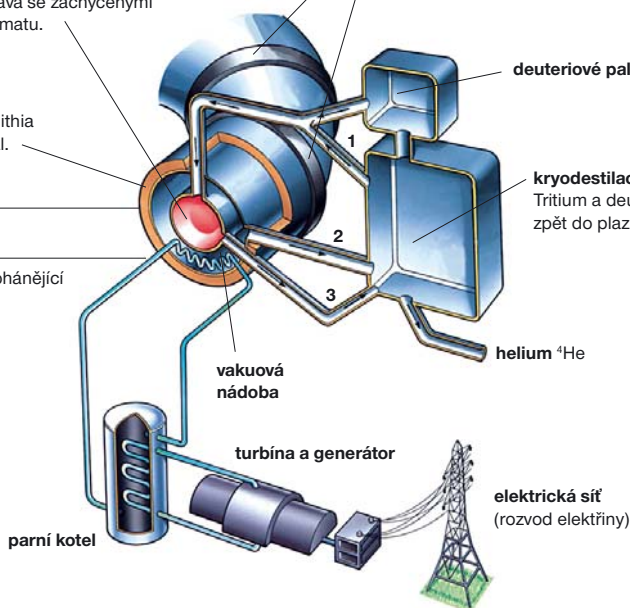
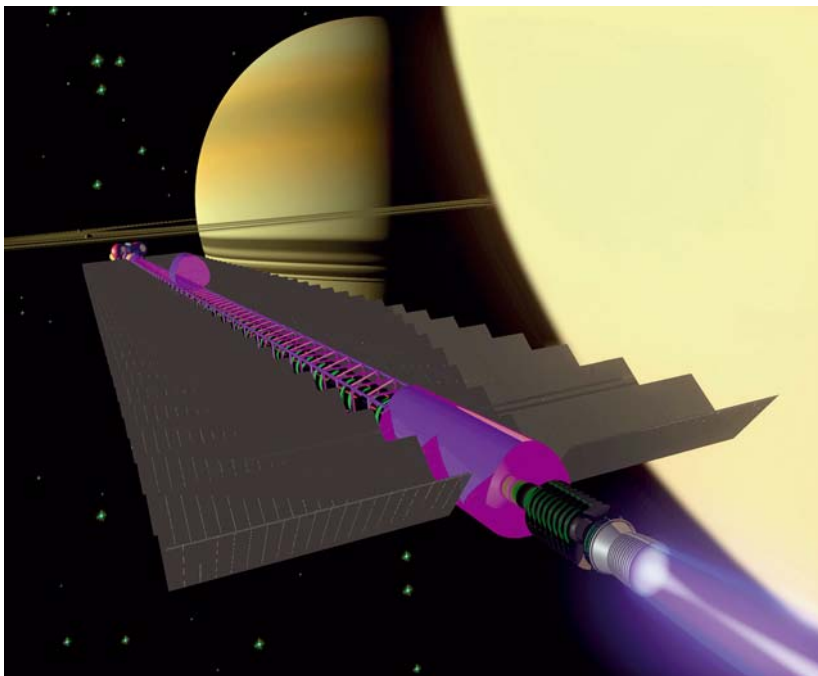


Schéma termojaderné elektrárny.

- 1 T
- 2  $T + {}^4\text{He}$
- 3  $D + T + {}^4\text{He}$



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. Těžiště 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 diferenciacce 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 ušlechtilější 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.

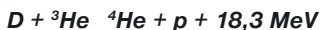
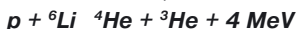
O zajímavé, zdaleka ne nové, myšlenky hybridních reaktorů jsme se zmínili. Fúze nemusí být zdrojem energie, ale mohou se využít jiné produkty reakce – neutrony. Perspektivou využití fúzních neutronů se zabývá několik soukromých společností. Privátní kapitál je další šancí jak rozšířit možnosti termojaderné 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 zahřívát 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  $\mu$  ( $m_\mu$ ), 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...

V roce 1989 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, zápalom 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

<http://fusionforenergy.europa.eu/> – Fusion for Energy (F4E)

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 – État 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
Slovensko	Association EURATOM – MHEST
Slovensko	Association EURATOM – CU
Bulharsko	Association EURATOM – INRNE
Polsko	Association EURATOM – IPPLM
Litva	Association EURATOM – LEI



JET <http://www.jet.efda.org>  
ITER <http://www.iter.org>

### TOKAMAKY (EU = EVROPSKÁ UNIE)

ASDEX Upgrade (EU) <http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/pr/forschung/asdex/>  
TEXTOR (EU) <http://www.fz-juelich.de/ief/ief-4/textor/>  
TCV <http://crppwww.epfl.ch/tcv>  
Tore Supra (EU) <http://www.fusion-magnetique.cea.fr>  
COMPASS (EU) <http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/>  
MAST (EU) <http://www.ccfе.ac.uk/MAST.aspx>  
GOLEM (EU) <http://golem.fjfi.cvut.cz/>  
FTU (EU) <http://www.fusione.enea.it/FTU/>  
ISTTOK (EU) [http://www.cfn.ist.utl.pt/eng/Prj\\_Tokamak\\_main\\_1.html](http://www.cfn.ist.utl.pt/eng/Prj_Tokamak_main_1.html)  
TFTR <http://www.pppl.gov/projects/pages/tftr.html>  
JT-60SA <http://www.jt60sa.org>  
NSTX <http://nstx.pppl.gov/>  
KSTAR <http://www.nfri.re.kr/english/>  
Alcator C-MOD <http://www.psfc.mit.edu/research/alcator/>  
DIII-D <https://fusion.gat.com/global/DIII-D>  
SST-1 <http://www.ipr.res.in/sst1/SST-1.html>

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

RFX (EU) <http://www.igi.pd.cnr.it>

### STELARÁTORY (EU = EVROPSKÁ UNIE)

W 7-X (EU) <http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/for/projekte/w7x>  
TJ-II (EU) [http://www.fusion.ciemat.es/New\\_fusion/en/TJII/](http://www.fusion.ciemat.es/New_fusion/en/TJII/)  
LHD <http://www.lhd.nifs.ac.jp/en/>

### PINČE

Z <http://www.sandia.gov/z-machine/>

### SVAZKY TĚŽKÝCH IONTŮ

NDCX <http://www.afrd.lbl.gov/fusionibt.html>

**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>

# VÝKLADOVÝ SLOVNÍK

## **ADMX (Axion Dark Matter eXperiment)**

Experiment hledající částice temné hmoty (axiony) na americké univerzitě ve Washingtonu, který funguje od roku 1995. Obdobně jako ostatní experimenty využívá faktu, že v silném magnetickém poli by se axiony měly konvertovat na fotony, v případě zařízení ADMX na mikrovlnné fotony. Experimentální zařízení se skládá ze supravodivého magnetu o indukci 8 T, který má hmotnost 6 tun.

## **AERE – Atomic Energy Research Establishment**

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

## **Akreční disk**

Plazmatický disk v okolí kompaktního objektu, zpravidla černé díry. Plazma dopadá po spirále na centrální objekt, vnitřním třením se zahřívá a intenzivně září v rentgenovém oboru.

## **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.

## **ALPS (Axion Like Particle Search)**

Experiment hledající částice temné hmoty (axiony) v německé laboratoři DESY (Hamburg). Fotony emitované z laditelného laseru na volných elektronech by měly být v silném magnetickém poli (6 magnetů, každý s indukcí 2,24 T) konvertovány na axiony, které po průchodu neprůhlednou deskou budou opětovně převedeny na fotony. Měření s negativním výsledkem probíhalo od roku 2008.

## **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 učenou společností byla Královská česká společnost nauk (1784–1952). Od roku 1952 do roku 1992 fungovala ČSAV.

#### **Axion**

Hypotetická částice temné hmoty, málo hmotný, slabě interagující boson se spinem 0 postulovaný kvantovou chromodynamikou. Souvisí s nepozorovaným narušením CP symetrie v silné interakci. Je jedním z kandidátů na temnou hmotu. Měl by vznikat v období krátce po Velkém třesku.

#### **Berylium**

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 k 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 tokama-

cích 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]**

Tlustá 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).

#### **Bohmova difúze [Bohm diffusion]**

Pohyb (a tedy i difúze) nabitých částic ve směru napříč magnetickým polem 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.

### Bosony

Částice, které mají celočíselný spin a nespňují Pauliho vylučovací princip, tj. může se jich nacházet více v jednom kvantovém stavu. Při nízkých teplotách se bosony mohou hromadit v základním stavu. Bosony se spinem nula nazýváme skalární, se spinem 1 vektorové. K vektorovým bosonům patří polní částice (fotony, gluony, Z, W).

### Buzení proudů (neinduktivní)

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

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

### Buzení transformátorem [Transformer drive]

Použití účinku transformátoru při vytváření elektrického proudů 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.

### CAST (CERN Axion Solar Telescope)

Experiment hledající částice temné hmoty (axiony) v evropském středisku jaderného výzkumu CERN. Jde vlastně o dalekohled určený pro pozorování axionů vznikajících v nitru Slunce. Silný magnet o indukci 9 T a délce 10 m by měl některé sluneční axiony konvertovat zpět na RTG fotony, které je možné zachytit detektory. Dalekohled funguje od roku 2003 s nulovým výsledkem.

### 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.

### CoGeNT (Coherent Germanium Neutrino Technology)

Experiment hledající částice temné hmoty (zejména wimpy), který je provozován v americkém dole



Soudan v Minnesotě. Aktivní látkou je mimořádně čistý krystal germania o hmotnosti 440 gramů, který je chlazen na teplotu kapalného dusíku. Kolem je stínění ze tří vrstev olova  $^{210}\text{Pb}$ , polyetylénu s borem, hliníku a 20 cm tlusté vrstvy plastu. Detektor začal sbírat data v prosinci 2009. V květnu 2011 obsahovala data z 442 dnů pozorování několik set záblesků s dobře patrnou roční periodicitou signálu. Jde o jeden ze tří detektorů s nenulovým signálem.

#### **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 „zažehnuto“ plazma. Tokamak má geometrii magnetického pole podobnou tokamaku JET a je lineárně zhruba desetkrát menší než ITER.

#### **CP symetrie**

Levoprává symetrie kombinovaná se symetrií částice – antičástice. Označení CP pochází z anglických slov „charge“ a „parity“. Základní otázkou je, zda experiment připravený podle zrcadlového obrazu z antičástic by fungoval shodně s původním experimentem. Narušení CP symetrie v přírodě prokázali James Cronin a Val Fitch v roce 1964 v experimentech s rozpadem kaonů.

#### **CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers)**

Experiment hledající částice temné hmoty (zejména wimpy), který je umístěn pod italskou horou Gran Sasso. Skládá se ze 17 modulů obsahujících scintilační látku  $\text{CaWO}_4$ , jenž pracují za extrémně nízké teploty 15 mK. Při této teplotě lze detekovat zahřátí modulu způsobené interakcí s wimpem. Detektor tedy pra-

cuje jako mimořádně citlivý kalorimetr. Na detektoru CRESST bylo v roce 2011 nalezeno 67 signálů, které odpovídají interakci wimpů s detekční látkou a nelze je vysvětlit žádným jiným známým způsobem.

#### **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 poslední oběžné dráze jen jeden elektron. Tento elektron, nacházející se po srážce ve vybuzeném 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 vyzařující nečistoty, případně z Dopplerova posunu i rychlost jejího pohybu.

#### **Cyg X1**

Rentgenový zdroj objevený v roce 1964, který byl v roce 1971 identifikován anglickým astronomem Paulem Murdinem jako první černá díra. Hmotnost této černé díry je 8 Sluncí, je součástí dvojhvězdy – jejím průvodcem je modrý obr HDE 262868. Objekt se nachází v souhvězdí Labutě, v blízkosti hvězdy Éta.

### Cyklotronní 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 cyklotronní 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.

### Černá díra

Objekt, který kolem sebe zakříví čas a prostor natolik, že z něho nemůže uniknout ani světlo. Část z nich vzniká kolapsem hvězdy v závěrečných fázích vývoje, jiné, obří černé díry, sídlí v centrech galaxií. Rotující černé díry kolem sebe vytvářejí akreční disky látky a v ose rotace výtrysky vysoce urychlených částic. Paradoxně akreční disky i výtrysky vznikající v bezprostředním okolí černé díry velmi intenzivně vyzařují.

#### Čerpaný divertor [Pumped divertor]

Divertor s magnetickými siločarami končícími na terčovách 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 ovládáním 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.

#### DAMA/LIBRA

Experiment hledající částice temné hmoty (wimpy) v italské národní laboratoři pod horou Gran Sasso. Experiment poskytuje jakýsi signál již od roku 1996. Jde o scintilační NaI detektor. V první fázi (1996 až 2002) byl detektor provozován s 87 kilogramy scintilační látky pod názvem DAMA (DARk MATter). Od roku 1998 byla v signálu rozpoznána relativně slabá roční variace. Ta by mohla být způsobena tím, jak Země v průběhu roku letí střídavě ve směru toku wimpů a proti toku wimpů vázaných gravitačně s Galaxií. Od roku 2003 pracuje detektor pod názvem Libra s 233 kg scintilační látky NaI/Th a v získávaném signálu jsou roční variace velmi výrazné.

#### 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.

#### DESY (Deutsches Elektronen SYNchrotron)

Německé výzkumné centrum částicové fyziky s laboratořemi v Hamburku a Zeuthenu, které bylo založeno v roce 1959. K nejvýznamnějším zařízením patří urychlovače HERA, PETRA a laser na volných

elektronech FLASH s délkou 260 m. V současnosti se zde staví tříkilometrový laser na volných elektronech XFEL.

#### **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 Atomics, 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 MW/m<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 ohřívány pouze ohmicky indukovaným elektrickým proudem, nazýváme další způsob ohřevu plazmatu, např. rezonanční cyklotronní absorpci elektromagnetických vln elektrony ECR, ionty ICR nebo vstříkem 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 „po-

pela“, tj. produktů fúze. Dodávka čerstvého paliva do plazmatu může být realizována buď jednoduše napouštěním plynu od stěn komory či lépe „vstřelováním“ peletů zmraženého paliva s rychlostí i několika km/s (palivo proniká mnohem blíže oblasti, v níž fúze probíhá) či pomocí NBI (vstřík 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 rozptylu 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**

##### **Supraconducting 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 lovuška]**

Použití magnetického pole k ochraně mřížek při IEC vedlo ke vstřícným polím s jednou či mnoha štěrbinami. Osová štěrba je u obou verzí stejná, mění se pouze počet prstencových štěrbin. Díky „správné“ křivosti magnetického pole je plazma MHD stabilní a díky nulovému magnetickému poli ve středu zařízení neexistují ztráty brzdným zářením. Elektromagnetické pasti se studovaly pod vedením Olega Alexandroviče Lavrentěva ve Fyzikálně-technickém ústavu v Charkově v letech 1960 až 1985.

**Elektronová mikroskopie (Řádkovací)**

Metoda studia materiálů, využívající úzkého elektronového svazku. Oproti světelné mikroskopii dosahuje řádově vyšších zvětšení a větší hloubky ostrosti. Podle druhu elektronů vylétujících ze vzorku lze docílit kontrastu daný buď morfologií povrchu nebo atomovým číslem zasaženého materiálu.

**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 ve 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 – ELEktrOMAgetická Nádoba****[Electromagnetic bottle]**

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

**ENEA – Ente 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 tokamacích je početnější skupina termalizovaná s teplotou v rozsahu 1 až 30 keV. Méně početná třída energetických částic má podstatně vyšší energii – až do několika MeV. Energetické částice mohou být vytvářeny elektrickými poli, fúzními reakcemi, vstříkem 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 převzala DOE.

**ESA (European Space Agency)**

Evropská kosmická agentura, která spojuje úsilí 18 evropských zemí na poli kosmického výzkumu. Centrální sídlo je v Paříži, pobočky jsou v mnoha členských zemích. ESA byla založena v roce 1973 jako přímý následovník organizací ESRO a ELDO. Nejznámější nosnou raketou využívanou ESA je Ariane. Česká republika vstoupila do ESA v listopadu 2008.

**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).

### Fermilab

Komplex urychlovačů ve Spojených státech, ve státě Illinois. Fermilab byl založen v roce 1967, prvním ředitelem se stal Robert Wilson, vynálezce mížné komory. V roce 2011 zde byl ukončen provoz druhého největšího urychlovače světa – Tevatronu. K nejvýznamnějším objevům patří objev kvarku „b“ (1977), kvarku „t“ (1995) a tau neutrino (2000). Fermilab se zabýval výzkumem „b“ a „t“ kvarku, výrobou a výzkumem antivodíku, narušením CP symetrie, zkoumáním platnosti CPT symetrie a výzkumem řady dalších vlastností hmoty a antihmoty za vysokých energií.

### Fermiony

Částice, které mají poločíselný spin a splňují Pauliho vylučovací princip, tj. dva fermiony nemohou být ve stejném kvantovém stavu. Patří mezi ně všechny leptony, kvarky a baryony – například elektron, neutrino, proton a neutron. Při nízkých teplotách fermiony obsazují stavy postupně, až po tzv. Fermiho mez.

### Ferriticko-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.

### Filament

Vlákno, pinč. Jde o lineární útvar v plazmatu, který dlouhodobě přežívá díky rovnováze mezi gradientem tlaku plazmatu a silou, kterou působí vlastní magnetické pole na plazma. Toto pole je generováno proudem protékajícím plazmatem. Nejstabilnější jsou vlákna s helikální (šroubovicovitou) strukturou magnetického pole.

### 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 nebudou radioaktivní prvky („popelcem“ bude obyčejné helium) a pak to, že bude jen obtížně zneužitelná (reakce probíhá jen za velmi vysokých teplot – i nejsnáze realizovatelná reakce vyžaduje stovky milionů stupňů).

### Fúze katalyzovaná mezony

#### [Muon-Catalysed Fusion]

Náhradou elektronů cca 200× hmotnějšími záporně nabitými mezony 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 jí 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).

#### **Fyzika částicová**

Odvětví fyziky zkoumající elementární částice a interakce mezi nimi. Současná fyzika elementárních částic je postavena na standardním modelu elementárních částic. Zejména důležité je zkoumání interakce mezi částicemi za extrémních situací – vysokých energií (na urychlovačích) nebo nízkých teplot (zde přechází fyzika elementárních částic ve fyziku nízkých teplot). Kolektivním chováním souboru volných nabitých částic (s celkovým nulovým nábojem) se zabývá fyzika plazmatu.

#### **Fyzika plazmatu**

Odvětví fyziky, které se zabývá kolektivním chováním souboru nabitých částic, jenž je navenek kvazineutrální (obsahuje stejný počet kladně i záporně nabitých jedinců) a vede elektrický proud. Předmětem fyziky plazmatu je velké množství forem látky (nízkoteplotní plazma, fúzní plazma, kvarkové-gluonové plazma, astronomické plazma) jak z hlediska základního výzkumu, tak z hlediska plazmových technologií.

#### **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.

#### **Galaktické kupy**

Jedny z největších gravitačně vázaných objektů ve vesmíru tvořené třemi hlavními složkami: 1) stovkami galaxií obsahujícími hvězdy, plyn a prach; 2) obrovskými oblaky horkých plynů; 3) temnou hmotou zatím neznámé povahy. Kupy mohou vytvářet nadkupy, vlákna a stěny.

#### **GammeV**

Experiment hledající částice temné hmoty (axiony, chameleony) v americké laboratoři Fermilab. V roce 2007 byla zkoumána možná konverze fotonů (gama) na axiony (s hmotností v meV) v magnetickém poli 5 T. Název detektoru je zkratkou z gama-meV. V následujícím běhu v roce 2008 pod názvem CHASE (CHAMELEON SEARCH) byl hledán svit chameleonů (dalších kandidátů na temnou hmotu) zachycených v magnetickém poli. V obou dvou případech byl výsledek experimentů záporný.

### General Electric Research Laboratory

Laboratoř společnosti General Electric, která byla založena v roce 1900, v době počátků elektrifikace Ameriky. V laboratoři byla například v roce 1908 vyvinuta žárovka s wolframovým vláknem a v roce 1916 žárovka plněná plynem. V laboratoři pracoval Irwing Langmuir, nositel Nobelovy ceny za chemii, který začal ionizované plyny ve výbojových trubicích nazývat plazma.

### Geodetika

Nejkratší možná dráha v pokriveném prostoročase. Jde o dráhu, po které se pohybují částice v gravitačním poli popsaném obecnou relativitou.

### Geomagnetická bouře

Narušení magnetického pole Země, zpravidla je způsobeno plazmoidy ve slunečním větru nebo koronálními výrony hmoty. Geomagnetická bouře se projevuje komiháním stříelky kompasu s periodou kolem desítek sekund, indukci napětí v dálkových vedeních, narušením telekomunikačních sítí a dalšími jevy.

### GLOBUS-M

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

### Gluony

Polní částice silné interakce. Celkem známe 8 gluonů. Tyto polní částice jsou nositeli barevného náboje (náboje silné interakce). Tím se silná interakce odlišuje od elektromagnetické a slabé interakce. Název vzniknul z anglického slova „glue“ (lepit, pojít).

### Gravitační čočka

Ohyb světla hmotným objektem. Efekt gravitační čočky předpověděl v roce 1924 ruský fyzik Orest Chvolson a v roce 1936 Albert Einstein. Hmotný objekt

(zpravidla velká galaxie) ležící mezi zdrojem záření a pozorovatelem zakřivuje světelné paprsky podobně jako skleněná čočka v laboratoři. Jsou-li objekty dokonale na přímce, vznikne jako obraz vzdálené galaxie tzv. Einsteinův prstenec. Jsou-li objekty mimo osu, vznikne buď oblouk, několikanásobný obraz nebo zdeformovaný obraz vzdálené galaxie či kvazaru. První gravitační čočka byla objevena v roce 1979.

### Gravitační struny (kosmické struny)

Hypotetické lineární gravitační útvary, které by měly vznikat při chladnutí vesmíru jako topologické defekty v důsledku narušení válcové symetrie. Postupně by se měly rozpadat za vzniku gravitačních vln. Odhaduje se, že v dnešním vesmíru by nemělo být více jak 40 kosmických strun. Pro představu: cca 10 km kosmické struny by mělo mít hmotnost jako naše Zeměkoule.

### Greenwaldův limit/hustota

#### [Greenwald limit/density]

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

### Gyrace

Rotační pohyb nabitých částic kolem magnetických siločar, který je způsoben Lorentzovou silou (je kolmá na pole a na rychlost částice). Pohyb má často tvar spirály, jejíž osou je magnetická siločára. Pohybu se někdy říká Larmorova rotace nebo cyklotronní pohyb.

### 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 „studeným“ 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.

**Herschelova vesmírná observatoř**

Sonda ESA, která byla vynesena do vesmíru v roce 2009. Jde o obří infračervenou observatoř se zrcadlem o průměru 3,5 metru, která byla umístěna do Lagrangeova bodu L2 soustavy Země-Slunce. Observatoř pokrývá obor vlnových délek od 55  $\mu\text{m}$  do 672  $\mu\text{m}$  a je pojmenována po vynikajícím anglickém astronomovi a objeviteli infračerveného záření Williamu Herschelovi. V současnosti jde o vůbec největší dalekohled umístěný lidstvem ve vesmíru.

**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),

kteřý 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, H-mód]**

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.

**Hvězda**

Přibližně kulový útvar, u kterého je gravitační pole v rovnováze s gradientem tlaku látky. V nitru aktivních hvězd je zdrojem energie termojaderná syntéza. Hvězdy slučující vodík na helium nazýváme hvězdy hlavní posloupnosti.

**Hvizdy**

Nízkofrekvenční elektromagnetické vlny (300 Hz až 30 kHz) šířící se podél magnetických siločar. Charakteristické je krátkodobé trvání s postupně klesající frekvencí vlny. Jde o modifikaci R vln. Poprvé byly pozorovány v kanálech blesků na Zemi Barkhausenem v roce 1919.

**Chameleon**

Hypotetická částice temné hmoty, u níž je hmotnost výraznou funkcí hustoty energie okolního prostředí. Hmotnost chameleonu je proto v mezigalaktickém prostředí mnohem nižší než ve sluneční soustavě. Částice by měla být slabě interagujícím bosonem se spinem 0.

**IAEA – Mezinárodní agentura pro atomovou energii (Spojené národy)****[International Atomic Energy Agency], Vídeň, Rakousko**

Projekt ITER je zastřešen zárukou IAEA.

**IC – iontová cyklotronová frekvence**

Frekvence rotace iontu kolem magnetické siločary.

**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. Takového 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.

**Intermetalika**

Směsi dvou či více kovů, které tvoří samostatnou fázi, tj. liší se krystalovou strukturou od příslušných čistých kovů. Tím se liší od slitin, kde se atomy jednotlivých kovů vzájemně nahrazují v téže krystalové mřížce.

**Intersticiální atom**

Porucha krystalové mřížky; atom nacházející se mimo pravidelnou polohu v mřížce.

**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.

**Ionosféra**

Slabě ionizovaná oblast atmosféry Země, dělí se na vrstvy E (60÷90 km), D (90÷150 km), F (150÷800 km). Přes den se vrstva F dělí na F1 a F2. Ve výšce 300 km je koncentrace částic  $10^6 \text{ cm}^{-3}$ .

**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 – Mezinárodní termonukleární experimentální reaktor**

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

Po řadě let trvající mezinárodní spolupráci 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 2020. Teprve v roce 2026 by však mělo být použito tritium, tedy skutečné D-T palivo.

### **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.

### **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 diverтору), 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>.

### **Katastrofická rekonekce**

Náhlá změna magnetického pole, která vede ke kompletnímu přebudování topologie magnetického pole a uvolnění velkého množství energie. U magnetarů vyústí katastrofická rekonekce v obří záblesk v rentgenovém a gama oboru. Taková rekonekce byla pozorována zatím třikrát (1979, 1998, 2004).

### **Keramika**

Anorganický nekovový materiál. Keramické materiály jsou obvykle tvrdé a křehké, odolné proti korozi a působení vysokých teplot, dobré tepelné a elektrické izolanty. Typickými představiteli jsou oxidy, nitridy a karbidy, tj. sloučeniny kovových prvků s kyslíkem, dusíkem, uhlíkem.

### **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.

### **Kometární ohon**

Uvolněné atomy, molekuly a ionty z kometárního jádra, které vytvářejí při přiblížení komety ke Slunci velmi řídkou strukturu o délce kolem milionu kilometrů. Plynný ohon míří od Slunce a je odtlačován tlakem slunečního záření. Prachové ohony jsou částečně ovládnuty gravitací. V některých kometárních ohonech bylo detekováno magnetické pole a vláknité struktury.

Při vzdalování od Slunce se kometa opět stává nevýrazným objektem.

#### **Korekční cívky [Correction coils]**

Cívky, 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 supravodičem ze slitiny *NbTi*.

#### **Koronální výron hmoty (Coronal Mass Ejection, CME)**

Výrony slunečního plazmatu do meziplanetárního prostoru s vmrznutým magnetickým polem. K výronům CME dochází pravidelně, jejich četnost odpovídá sluneční aktivitě – v minimu dochází k CME přibližně jednou za den, v maximu dochází k CME až třikrát denně. Rychlé výrony CME se mohou dostat až do vzdálenějších oblastí sluneční soustavy.

#### **Kosmické počasí**

Souhrn dějů ovlivňujících stav magnetosféry a ionosféry Země. K nejvýraznějším charakteristikám kosmického počasí patří sluneční vítr a koronální výrony hmoty letící od Slunce k nám. Kosmické počasí je sledováno řadou družic a sond. Kosmickému počasí je věnována stránka [www.spaceweather.com](http://www.spaceweather.com).

#### **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 cívky 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).

#### **Kulový blesk**

Kulovitá svítící struktura velikosti pinpongového míčku až několiknásobku průměru fotbalového míče, která se často objevuje jako doprovodný jev klasických bouřek. Podstata je dosud neznámá, s největší pravděpodobností pod tímto fenoménem označujeme několik fyzikálních jevů.

#### **Kvantová elektrodynamika (QED)**

Současná teorie elektromagnetické interakce. Teorie je postavená na Diracově rovnici pro elektron a na kvantové verzi teorie elektromagnetického pole. Polní částicí interakce je foton, který není nositelem elektrického náboje (náboje interakce). Elektromagnetická interakce působí na nabitě částice, má nekonečný dosah a zásadně ovlivňuje děje v plazmatu.

#### **Kvantová flavour-dynamika (QFD)**

Teorie slabé interakce, jejímž nábojem je vůně. Polními částicemi jsou bosony Z a W. Slabá interakce působí na kvarky a leptony a má konečný dosah. V současnosti je teorie slabé interakce propojena s teorií elektromagnetické interakce do jednotné teorie elektroslabé interakce.

#### **Kvantová chromodynamika (QCD)**

Současná teorie silné interakce, jejímž nábojem je barva. Polními částicemi jsou gluony (jsou nositeli barevného náboje, tím se silná interakce výrazně liší od elektromagnetické). Silná interakce působí na kvarky

a má konečný dosah. Silná interakce drží pohromadě kvarky v neutronech a protonech a je zodpovědná za soudržnost atomového jádra.

#### **Kvarky**

Částice, ze kterých jsou tvořeny těžké částice s vnitřní strukturou (hadrony). Hadrony dělíme na baryony složené ze tří kvarků (například protony a neutrony) a na mezony tvořené kvarkem a antikvarkem (například piony). Kvarky se dělí do tří generací, první tvoří kvarky „d“ (down) a „u“ (up), druhou kvarky „s“ (strange) a „c“ (charm) a třetí kvarky „b“ (bottom nebo beauty) a „t“ (top nebo truth). Kvarky mají neceločíselné (třetinové a dvoutřetinové) elektrické náboje. Jsou také nositeli barevného náboje silné interakce.

#### **Lagrangeovy body**

Pět bodů v sousedství dvou obíhajících hmotných těles, ve kterých je gravitační a odstředivá síla vyrovnána. Polohu těchto bodů poprvé vypočítal italsko-francouzský matematik Joseph-Louis Lagrange. Velmi výhodné je například umístění sondy do Lagrangeova bodu  $L_2$  soustavy Země-Slunce, který je vzdálený od Země 1,5 milionů km ve směru od Slunce (WMAP, Planck, Herschel) nebo do  $L_1$ , který je 1,5 milionů km ve směru ke Slunci (SOHO, Wind, ACE).

#### **Langmuirova 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.

#### **Leptony**

Skupina částic, mezi které patří elektron, těžký elektron (mion) a supertěžký elektron (tauon) a jejich neutrino (elektronové, mionové a tauonové). Tyto částice nepodléhají silné interakci, ale jen slabé a elektromagnetické (pokud jsou nabitě).

#### **Liebniz-Rechen Zentrum (LRZ)**

Evropské superpočítačové centrum v Garchingu u Mnichova. Založené bylo v roce 1962, administrativně je součástí Bavorské akademie věd. Od roku 2012 je zde provozován SuperMUC, nejrychlejší evropský superpočítač.

#### **Limiter**

Materiálový objekt zasahující do tokamaku tak, že definuje okraj plazmatu, čímž zabraňuje přímému kontaktu plazmatu se stěnou nádoby.

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

Kódovaný název pozdějšího Ústavu atomové energie I. V. Kurchatova, 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.



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

USA.

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

Doposud neúčinnější 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.

### **Magnetar**

Neutronová hvězda s mimořádně silným magnetickým polem až  $10^{12}$  T. Kůra je již nestabilní, praská, dochází k pravidelným magnetotřesením doprovázeným přepojením magnetických siločar a záblesky v měkkém gama oboru. První projevy magnetaru byly detekovány v roce 1979 (opakované záblesky gama neboli SGR). První magnetar identifikovala v roce 1998 Chryssa Kouveliotou z Marshallova kosmického letového střediska v NASA. Výjimečně mohou opakovat se záblesky přejít v jeden mohutný, neopakovatelný záblesk.

### **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.

### **Magnetosféra**

Oblast magnetického vlivu planety nebo jiného nebeského tělesa. U naší Země je dipólové magnetické pole vytvářeno v jádru elektrickými proudy o řádové hodnotě  $10^9$  A. Toto pole je deformováno interakcí se slunečním větrem do charakteristického tvaru s čelní rázovou vlnou a protáhlým ohonem. Magnetosféry planet jsou přirozeným ochranným štítem před nabitými částicemi slunečního větru.

### **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****[Magnetohydrodynamics]**

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 cívký [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.

**Mlhoviny**

Oblaka plynu a prachu v mezihvězdném prostoru. Tato oblaka mají nejrůznější velikost a původ. Zpravidla mlhoviny dělíme na planetární (pozůstatky odhozených obálek hvězd), reflexní (svítí odraženým světlem blízkých hvězd), emisní (svítí vlastním světlem, zdrojem excitace je světlo blízké hvězdy), temné, pozůstatky supernov atd. Z některých mlhovin vznikají další generace hvězd.

**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.

**Molekulární mračno VELA C**

Nejvýraznější oblast z hřebene molekulárních mračen v souhvězdí Plachet. V oblasti dochází k překročné tvorbě hvězd širokého spektra hmotností. V infračerveném oboru je patrné, že hvězdy vznikají v zúženích vláknitých struktur.

**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 neut-

rálních atomů určených pro ohřev plazmatu pomocí NBI. Tyto atomy, letící napříč magnetickým polem, „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 tĕrmojadernyj reaktor]**

Projekt udržení plazmatu silovým polem iniciovaný O. A. Lavrentěvem, zhmotněný do ideje tokamaku A. Sacharovem a J. Tammem. Experimentální práce vedl N. A. Javlinskij 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 vyletujících 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 impuls). NBI používá celá

řada tokamaků (START, MAST, JET a mnoho dalších). NBI bude používat i pražský tokamak COMPASS.

##### **$Nb_3Sn$ , NbTi, $MgB_2$**

Supravodivé materiály používané ve výzkumu magnetického udržení plazmatu.

##### **$Nb_3Sn$ vodič [Nb<sub>3</sub>Sn conductor]**

Supravodič pro magnetické pole do 14 T. Křehký materiál vyžaduje tepelné zpracování.

##### **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 „zředí“.

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 loading]**

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 násobič 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 slučovací 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. Těto 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 stříhu“ má bezpečnostní faktor minimum mimo střed plazmatu. Pomocí obráceného nebo malého stříhu („optimalizovaný stříh“) některé tokamaky, jmenovitě DIII-D a TFTR v USA, JT-60U v Japonsku a JET v Evropě, dosáhly mnohem vyšších

parametrů plazmatu. Obrácený stříh je potenciální scénář stacionárního tokamaku.

**Odprašování [sputtering]**

Proces eroze na atomární úrovni. Atomy jsou vyráženy z materiálu dopadem vysoce energetických částic (iontů nebo elektronů).

**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 neúčinným.

**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.

#### **Permeační bariéra**

Bariéra proti pronikání izotopů vodíku, nejčastěji ve formě nepropustného povlaku na kovovém materiálu, kterým izotopy vodíku difundují snadno.

#### **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 [PFW, Primary First Wall].

#### **PIN – Síť 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 Group, 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.

#### **Plazmoid**

Kompaktní plazmový útvar, někdy nazývaný plazmový oblak, zhustek, shluk, cluster. Plazmoid s sebou může unášet tzv. vmrznuté magnetické pole.

#### **Plazmová frekvence [Plasma 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 elektromag-



netickými poli. V tokamacích nabývá hodnoty až jednoho sta GHz.

#### **Plodící obal [Breeding blanket]**

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 tětvách současně umožňuje určení radiálního profilu poloidální složky magnetického pole a tedy i profilu bezpečnostního faktoru  $q(r)$  (viz také Faradayova rotace).

#### **Polární záře**

Světelný jev v atmosféře, který vzniká excitací atomů a molekul ve výškách 70 km až 1000 km působením elektronů slunečního větru. Polární záře se nazývá Aurora Borealis na severní polokouli a Aurora Australis na jižní. Polární záře se vyskytují zejména v polárních oblastech v období zvýšené sluneční aktivity. Nejvýraznější je zelená barva způsobená spektrální čarou neutrálního kyslíku o vlnové délce 555,7 nm.

#### **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 charkovských 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 neprotnou (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 jistě, 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 „quenču“ 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 ( $Q \approx 10$ ).

#### **Radiační ztráty**

Nejvýkonnějším mechanismem ochlazování plazmatu v tokamaku je čárové spektrum záření elektronových přechodů v částečně ionizovaných nečistotách.

Čím více má atom elektronů, tím více září. Proto je žádoucí bránit výskytu nečistot s vysokým atomovým číslem. U tokamakového plazmatu jsou radiační ztráty dány dále srážkami částic (brzdné záření, de-excitace, rekombinační záření) a v důsledku zakřivení drah nabitých částic v magnetickém poli (cyklotronní a synchrotronní záření).

#### **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 magnetic-

kých 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 dceřinými produkty), 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. Skutečně 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.

#### **Redepozice**

Znovunášení materiálu, který byl předtím erodován.

### Reflektometrie [Reflectometry]

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

### Relativita obecná

Teorie gravitace publikovaná Albertem Einsteinem v roce 1915. Její základní myšlenkou je tvrzení, že každé těleso svojí přítomností zakřivuje prostor a čas ve svém okolí. Ostatní tělesa se v tomto pokriveném světě pohybují po nejrovnějších možných drahách, tzv. geodetikách.

### Relaxace [Relaxation]

Změna plazmatu směřující ke stavu s nižší energií.

### Rezonanční ionty/elektrony

#### [Resonant ions/electrons]

Částice, jejichž některý parametr (například cyklotronní 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 Coppioho v M.I.T. RIGATRON financoval 12 milionů 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.

### San Diego Supercomputer Center (SDSC)

Americké superpočítačové centrum, které bylo založené v roce 1985. Je součástí Kalifornské univerzity v San Diegu. SDSC je jedním ze čtyř zakládajících

členů sítě terragrid. V SDSC je spravována celosvětová třírozměrná databáze bílkovin a nukleonových kyselin.

#### **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.

#### **Sluneční vítr**

Proud nabitých částic ze Slunce, které zaplavují celou sluneční soustavu. Zejména jde o protony, elektrony a alfa částice (jádra hélia). Typická rychlost částic u Země je kolem 500 km/s (rychlost zvuku v tomto prostředí je 50 km/s), teplota 3 eV (30 000 K) a koncentrace několik protonů v m<sup>3</sup>. Částice vylétávající v polárním směru mají vyšší rychlost (přibližně 750 km/s) a nazýváme je rychlý sluneční vítr. Sluneční vítr objevil anglický astronom Richard Carrington v roce 1859, kdy bylo za půl dne po slunečním vzplanutí narušeno magnetické pole Země.

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

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

#### **Soliton Langmuirův**

Oblast plazmatu se sníženou koncentrací elektronů (dutina v plazmatu). Lokální snížení tlaku plazmatu je kompenzováno zvýšením hustoty energie elektrického pole. Dutina zaplněná polem se pohybuje plazmatem beze změny tvaru. Langmuirův soliton je pojmenován po americkém fyzikovi a chemikovi Irwingu Langmuirovi (1881–1957), který jako první upozornil na existenci vln, z nichž tento soliton vzniká. Někdy se mu také říká kaviton (vyplňuje kavitu – dutinu).

#### **Souhvězdí Labuť (Cygnus)**

Výrazné souhvězdí severní oblohy, uspořádání hvězd skutečně připomíná letícího ptáka. V souhvězdí je Řasová mlhovina – pozůstatek po explozi supernovy a nachází se zde první identifikovaná černá díra, která je známá jako rentgenový zdroj Cyg X1.

#### **Souhvězdí Plachty (Vela)**

Souhvězdí jižní oblohy, část bájně lodi Argo. Francouzský astronom Nicolas Louis de Lacaille rozdělil Argo na tři souhvězdí: Plachty, Lodní kýl a Lodní zád'. V souhvězdí je rozsáhlý komplex mlhovin s překotnou tvorbou hvězd.

#### **Souhvězdí Vlasy Bereniky (Coma Berenices)**

Jedno ze souhvězdí severní oblohy, pojmenováno bylo podle vlasů egyptské královny Bereniky. Do souhvězdí zasahuje severní část rozsáhlé Kupy galaxií v Panně a v souhvězdí je samostatná Kupa galaxií ve Vlasech Bereniky. Souhvězdí obsahuje severní galaktický pól.

#### **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.

### Spin

Vlastní (vnitřní) rotační moment částice souvisící s Lorentzovou symetrií. Pro částici v centrálním poli se přirozeným způsobem skládá s momentem hybnosti. Částice s nenulovým spinem se mohou chovat jako elementární magnetické dipóly, aniž by měly elektrický náboj. Takové částice reagují na vnější magnetická pole.

### 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).

### Standardní model elementárních částic

Současný obecně přijímaný model částic a interakcí. Obsahuje kvarky, leptony, polní částice jednotlivých interakcí (fotony, gluony,  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ) a Higgsovu částici jakožto zdroj hmotnosti ostatních částic. Součástí modelu není gravitační interakce.

### 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 neprotékané elektrickým prou-

dem. 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 stelarátory 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).

### Sublimace

Skupenská přeměna pevné látky na plynnou bez průchodu kapalnou fází.

### 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.

### **Světelný rok**

Vzdálenost, kterou světlo ve vakuu urazí za jeden rok,  $1 \text{ ly} \approx 9,46 \times 10^{12} \text{ km}$ .

### **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).

### **Šroubovice**

Jeden z nejčastějších útvarů ve vesmíru. Šroubovice známe od molekulární úrovně (DNA) až po obří šroubovice plazmových vláken v mezihvězdném prostoru. Po šroubovicích se pohybují nabitě částice v magnetickém poli, pole ve tvaru šroubovice má nejnižší možnou energii.

### **Transformace škálovací (cejchovací, kalibrační)**

Transformace (zpravidla zvětšení či zmenšení násobícím faktorem) parametrů popisujících systém, při které se nezmění rovnice popisující děje probíhající v systému.

### **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 plyným 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 stolicí 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).

### **Tepečná 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 uvolňována v blanke-

tu. Hustota výkonu dopadajícího z plazmatu na první stěnu bude v poloidální směru silně nerovnoměrná. Průměrná hodnota tepelného toku pro ITER se předpokládá  $0,5 \text{ MW/m}^2$  a pro návrh demonstračního tokamaku se počítá s rozmezím  $2,0\text{--}2,5 \text{ MW/m}^2$ . Nejvíce zatížené budou desky divertoru, které budou muset odolat toku  $10\text{--}20 \text{ MW/m}^2$ .

#### **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 součástek 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):  $1 \text{ T} = 1 \text{ V} \cdot \text{s/m}^2 = 10\,000 \text{ gaussů}$ .

#### **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  $10,6 \text{ MW}$  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 Forschungszentrum 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 [TORoidální 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 jakožto 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 vstřikováním 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.

#### **Toroidální pole [Toroidal field]**

Komponenta magnetického pole v toroidálním směru zařízení. V tokamaku se jedná o zdaleka nejsilnější pole. V ITER bude toroidální pole generovat 18 supravodivých cívek ze supravodiče  $Nb_3Sn$  protékáných proudem v poloidálním směru (závitem buzené pole má směr kolmý na rovinu závitu), každá o hmotnosti 360 t.

#### **Torsatron**

Stelarátorová konfigurace se spojitými šroubovicovými cívkami.

#### **Torus, toroid [Torus]**

Těleso, které vznikne rotací kruhu kolem osy ležící v rovině kruhu, ale umístěné mimo plochu tohoto kruhu. Toroidem je například preclík, nafouknutá pneumatika a... také vakuová komora tokamaku.

#### **TOSKA**

Velké zařízení pro zkoušky supravodičů (Association EURATOM-FZK, Karlsruhe, Německo).

#### **TPRF (Tritium permeation reduction factor) –**

Číslo vyjadřující účinnost permeační bariéry. Viz **Permeační bariéra**. Číslo TPRF udává, kolikrát je pronikavost tritia materiálem s pokrytím nižší než v případě nepokrytého materiálu.

#### **Transmutace jaderná**

Přirozená nebo umělá přeměna prvků na jiné jadernou reakcí.

#### **Transport**

Proces přenosu částic či energie prostorem. Magnetické pole tento přenos ve směru kolmém na jeho siločáry silně omezuje. Transport pozorovaný v tokamacích je však oproti předpovědím teorie mnohem vyšší (proto se hovoří o transportu anomálním).

#### **Transportní bariéra [Transport barrier]**

Za jistých podmínek (např. v tzv. H-modu) se v tokamacích vytvoří radiálně lokalizovaná úzká oblast se zvýšeným radiálním gradientem tlaku plazmatu, tzn. se silně sníženým transportem energie. Takovou oblast nazýváme transportní bariérou.

#### **Troitsk**

Místo nedaleko Moskvy, ve kterém se nachází středisko fúzního výzkumu, původně jako součást pobočky Kurčatovova ústavu a později nezávislé výzkumné organizace s názvem TRINITI. Podle dohody mezi Itálií a Ruskem z roku 2010 by se tu měl uvést do provozu tokamak IGNITOR.

#### **Trojný fúzní součin [Fusion triple product]**

Hodnota součinu (iontové) hustoty, (iontové) teploty a doby udržení energie v daném zařízení je mírou energetické bilance fúzního procesu v tomto zařízení.

### Tritium

Izotop vodíku, který má v jádru jeden proton a dva neutrony. Tritium se nevyskytuje v přírodě volně, neboť je slabě radioaktivní s poločasem rozpadu 12,3 roku. Pro fúzní reaktor se bude tritium vyrábět v plodícím obalu obklopujícím plazma ve vakuové komoře, nebudete jej proto nutno k reaktoru transportovat.

### Turbulence

Náhodně fluktuující vlnový proces (na rozdíl od koherentního). Například turbulentní úpatí vodopádu může být popsáno pouze pomocí ustředěných veličin, jako jsou rozměry a doba trvání turbulentních fluktuací, zatímco mnohem systematictější popis lze uplatnit pro vlny na hladině klidného rybníku.

### Turbulentní transport

#### [Turbulent transport]

Anomální transport spojený s turbulencí plazmatu.

### Tvar plazmatu [Plasma shape]

Popisuje poloidální průřez plazmatu: kulatý, protáhlý, trojúhelníkový, tvaru písmene D [D-shape], divertorový s jedním [single null] či se dvěma nulovými body [double null] atd.

### T-10

Konvenční tokamak s kruhovým průřezem výbojové komory a ohřevem plazmatu elektronovou cyklotronní frekvencí pracující v Kurčatovově ústavu v Moskvě, Ruská federace, již od r. 1977.

### Ubíhající elektrony [Runaway electrons]

Síla coulombovského tření (síla částice brzdící) mezi nabitými částicemi klesá rychle s růstem jejich vzájemné rychlosti, zatímco urychlující síla elektrického pole (v tokamacích toroidálního pole, budící elektrický proud) se s jejich rychlostí nemění. Stoupne-li tak rychlost některých elektronů v tokamaku nad určitou hodnotu, v přítomnosti elektrického pole nejrychlejší

elektrony „uběhnou“ z Maxwellova rozdělení a při každém oběhu získají další energii rovnou napětí na závit. Ve velkých tokamacích mohou pak tyto ubíhající elektrony nabývat postupně energií až desítek MeV. Podobné runaway elektrony se podílejí v přírodě na tvorbě blesku a v tokamaku mohou poškodit stěnu vakuové komory.

### Udržení plazmatu [Plasma confinement]

Radikální snížení úniku plazmatu a jeho energie z prostorově omezené oblasti (z vakuové nádoby reaktoru).

### ÚFP AV ČR – Ústav fyziky plazmatu

**Akademie věd České republiky, v. v. i. [IPP AS CR, v. v. i. – Institute of Plasma Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic, v. v. i.], Praha, Česká republika**

Koordinátor Association EURATOM-IPP.CR.

### University of Latvia

Partner EFDA v Association EURATOM-University of Latvia, Lotyšsko.

### Vakance

Porucha krystalové mřížky, v níž chybí atom ve své pravidelné poloze.

### Vakuová nádoba [Vacuum Vessel]

Vakuová nádoba představuje kovovou, pro jakýkoli plyn naprosto neprostupnou stěnu, navíc schopnou vydržet atmosférický tlak (tj. vzdorovat síle deseti tun na čtvereční metr). V tokamaku ohraničuje prostor, v němž bude umístěn obal [blanket] a bude existovat plazma. Bude chránit plazma před nečistotami a pohlcovat také veškeré toky energie unikající z plazmatu a tím zamezovat nežádoucímu tepelnému toku na další části tokamaku, především na supravodivé cívky magnetického pole.



**Vakuová vývěva [Vacuum pump]**

Vývěva je zařízení odčerpávající plyn/vzduch z uzavřeného objemu. Existuje mnoho druhů vývěv, lišících se jak velikostí čerpací rychlosti (od jednotek litrů až po desetitisíce litrů za sekundu), tak i „hloubkou“ vakua, kterého jsou schopny docílit (od 0,01 atmosféry až do prakticky kosmického vakua s 15 nulami za desetinnou čárkou). ITER bude používat různé druhy vývěv, jeho výbojová komora o objemu téměř 1000 m<sup>3</sup> bude muset být čerpána před zahájením výboje na „zbytkový“ tlak o minimálně deseti nulách. Celý kryostat, který však nemusí být čerpán tak dokonale, bude mít objem 8500 m<sup>3</sup>, což je největší evakuovaný objem na světě.

**VDE – Rychlý vertikální únik plazmatu****[Vertical Displacement Event]**

Rychlý vertikální pohyb plazmatu způsobený nestabilitou, existující v tokamacích v případě nekruhového průřezu plazmatu. Bez zásahu rychlé zpětné vazby vede tento jev ke ztrátě kontroly vertikální polohy plazmatu následované disrupcí, to je jeho zánikem. Při tomto procesu po kontaktu separatrixy (tj. proudového prstence plazmatu) s kovovou stěnou vakuové komory tokamaků se indukují poloidální „haloproudy“ značné intenzity, které v důsledku přítomnosti silného toroidálního pole a tím i Lorentzovy síly o intenzitě až tisíců tun představují u velkých tokamaků velké nebezpečí mechanického poškození komory.

**Velký třesk**

Plazmatické období vesmíru od nejteplejší a nejhustší fáze až po vznik atomárních obalů v období 400 000 let po vzniku světa. Velký třesk končí fázovým přechodem vesmíru z plazmatického do plynného skupenství. Na konci Velkého třesku se oddělilo tzv. reliktní záření, které bylo v plazmatickém skupenství

vázáno na látku a v plynném skupenství se pohybuje vesmírem relativně volně.

**Vodík [Hydrogen]**

Nejlehčí prvek, jehož jádro tvoří pouze jeden proton, atomový obal pak jeden elektron. Izotopy vodíku s jedním nebo dvěma neutrony v jádře navíc jsou deuterium nebo tritium.

**VR – Švédská rada pro výzkum****[Vetenskpsradet], Švédsko**

Partner EFDA v Association EURATOM-VR.

**Vstřícné pole [Cusp field]**

Dvě cívky umístěné na stejné rotační ose, protékané však opačně orientovanými elektrickými proudy, vytvoří v prostoru mezi cívkami magnetickou 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 štěrbinami [cusps] a tím se tato konfigurace nezdá být pro reaktor použitelná.

**Vrstva gradovaná**

Vrstva s pozvolna proměnlivým složením nebo strukturou; cílem pozvolného přechodu je snížit koncentraci napětí a zlepšit přilnavost oproti ostrému rozhraní.

**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).

**Vyrovnání [Break-even]**

Zesílení výkonu fúzního reaktoru **Q** je popisováno poměrem výkonu uvolněného fúzní reakcí k výko-

nu použitého k ohřevu plazmatu. Podle konvence, vyrovnání [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.

#### Wimp (Weakly Interacting Massive Particle)

Vážný kandidát na částice temné hmoty. Mělo by jít o reliktní superpartnery z období po Velkém třesku, kterým fyzikální zákony zabránily v následném rozpadu. Wimpy by měly s běžnou látkou interagovat gravitační a slabou interakcí. Jsou usilovně hledány v několika desítkách experimentů, tři z nich mají nenulový signál, jehož interpretace je zatím nejasná.

#### 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 XR).

#### Zachycené částice

##### [Trapped particles]

Střed dráhy nabitě částice rotující kolem magnetické siločáry se přemisťuje volně podél siločáry s po-

délnou rychlostí částice. V tokamacích to znamená pohyb podél šroubovice z vnější oblasti tokamaku s menším polem do vnitřní oblasti tokamaku, kde pole narůstá (nepřímo 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 iontů v 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.

#### Zkřehnutí vodíkové [hydrogen embrittlement]

Snížení schopnosti plastické deformace u kovových materiálů. Je způsobeno difúzí vodíku, který se časem shlukuje a vytváří miniaturní kavity, které působí tlakem na okolní kov, snižují pevnost a mohou působit trhliny.

#### 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.

**Zpevnění disperzní (dispersion strengthening) –**

Zvýšení pevnosti kovového materiálu pomocí jemně rozptýlených (dispergovaných) submikroskopických částic. Ty znesnadňují plastickou deformaci, ale jejich objemový podíl je obvykle tak malý, že neovlivňuje významně ostatní vlastnosti.

**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 (Magnetic)]**

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 příčné a podélné 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 cívků 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.

**2XII B**

Zařízení s magnetickými zrcadly v LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA), produkující jako prvé vysokoenergetické, husté a stabilní plazma.

# PŘEDPONY PRO VEDLEJŠÍ JEDNOTKY

<b>deka</b>	da	10 <sup>1</sup>	deset
<b>hekto</b>	h	10 <sup>2</sup>	sto
<b>kilo</b>	k	10 <sup>3</sup>	tisíc
<b>mega</b>	M	10 <sup>6</sup>	milion
<b>giga</b>	G	10 <sup>9</sup>	miliarda
<b>tera</b>	T	10 <sup>12</sup>	bilion
<b>peta</b>	P	10 <sup>15</sup>	biliarda
<b>exa</b>	E	10 <sup>18</sup>	trilion
<b>zetta</b>	Z	10 <sup>21</sup>	triliarda
<b>yotta</b>	Y	10 <sup>24</sup>	kvadrilion

<b>deci</b>	d	10 <sup>-1</sup>	desetina
<b>centi</b>	c	10 <sup>-2</sup>	setina
<b>mili</b>	m	10 <sup>-3</sup>	tisícina
<b>micro</b>	μ	10 <sup>-6</sup>	miliontina
<b>nano</b>	n	10 <sup>-9</sup>	miliardtina
<b>pico</b>	p	10 <sup>-12</sup>	biliontina
<b>femto</b>	f	10 <sup>-15</sup>	biliardtina
<b>atto</b>	a	10 <sup>-18</sup>	triliontina
<b>zepto</b>	z	10 <sup>-21</sup>	triliardtina
<b>yokto</b>	y	10 <sup>-24</sup>	kvadriliontina

# REJSTŘÍK VĚCNÝ

## SYMBOLY

2XIIB 219

## A

Abelova inverze 129, 132  
 Aditya 82  
 ADMX (Axion Dark Matter eXperiment) 172, 173, 184  
 AEC 21, 62, 63, 189  
 AERE (Atomic Energy Research Establishment) 184  
 Akreční disk 161, 184, 188  
 Aktivační analýza 125, 135, 136  
 Albuquerque 17, 65, 112, 156  
 Alcator C-Mode (Alto Campo Torus) 51, 62, 73, 74, 85, 86, 182, 184, 197, 203, 210  
 Alfa 25, 66, 86, 156, 177, 184, 188, 211  
 ALPS 172, 184  
 ASDEX (Axially Symetric Divertor Experiment) 15, 44, 60, 72, 73, 77, 78, 80, 116, 141, 169, 182, 184, 189, 195, 197  
 ASDEX Upgrade 77, 78, 141, 182, 184, 189, 197  
 ASIPP (Academy Sinica Institut of Plasma Physics) 184  
 Asociace EURATOM IPP.CR 17  
 Aspect ratio 184  
 Association 69, 155, 181, 184, 186, 187, 188, 191, 192, 193, 195, 197, 198, 201, 203, 205, 206, 209, 210, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218  
 Astronomie 58, 173, 235, 236, 240  
 ATEKO, a.s. 70, 156, 213  
 Atomové číslo Z 149  
 Attosecond Facility 106  
 AV ČR (Akademie věd České republiky) 6, 8, 9, 14, 17, 18, 69, 70, 96, 134, 154, 155, 156, 185, 186, 205, 216, 234, 235, 236, 239, 240, 241  
 Axion 172, 173, 174, 184, 185, 186

## B

Beryllium 148, 185  
 BESTH 70, 156  
 Beta 170, 185, 205  
 Beta rozpad 170  
 Bezpečnostní faktor 185, 204, 205, 207, 210, 212  
 Biologické stínění 86, 185  
 Bolometr 125, 131, 132  
 Bootstrap 42, 60, 86, 185, 186, 204, 215  
 Bór 179  
 Boson vektorový 185  
 Breakeven 12, 13, 65, 76  
 Budkerův Ústav jaderné fyziky v Novosibirsku 35, 155

Buzení proudu;  
 neinduktivní 79, 80;  
 transformátorem 186, 212

## C

Cadarache 17, 18, 79, 115, 117, 118, 120, 121, 140, 198, 215  
 CAPEX (Capillary Experiment) 186  
 CAST (CERN Axion Solar Telescope) 172, 173, 174, 186  
 CASTOR (Czech Academy Sciences Torus) 15, 18, 69, 70, 74, 85, 86, 154, 186, 238, 239  
 CCEF (Culham Centre for Fusion Energy) 194  
 CDA (Conceptional Design Activity) 15, 198  
 CDX-U (Current Drive Experiment-Upgrade) 186  
 CEA/CESTA 104  
 Cena;  
 Nobelova 13, 46, 47, 55, 64, 158, 194  
 Centrální solenoid (Central solenoid - CS) 39, 118, 119, 121, 122, 140, 147, 186  
 Centrum výzkumu Řež, s.r.o. 70, 156  
 Centurion/Halite 15  
 CERN (Conseil Européen pour la Reserche Nucleare) 72, 120, 142, 156, 159, 172, 175, 186, 237  
 CIEMAT - Centro de Investigaciones Energéticas Mediambientales y Tecnológicas 155, 181, 182, 186, 214  
 Cívky;  
 diagnostické 125, 126;  
 korekční (Correction Coils) 122, 140, 200, 219;  
 Mirnovovy 203;  
 modulární 56;  
 planární 89, 91;  
 poloidálního pole (Poloidal Field Coils – PFCunit) 37, 39, 42, 57, 82, 84, 118, 120, 122, 123, 147, 164, 200, 207, 219;  
 RMP (Resonant Magnetic Perturbation) 88;  
 sedlové (Saddle Coils) 88, 211;  
 supravodivé 40, 80, 81, 82, 117, 121, 139, 200, 215;  
 toroidálního pole (Toroidal Field Coils – TFC) 37, 39, 57, 60, 84, 87, 118, 122, 139, 147, 148, 160, 198, 204, 210, 215, 216, 217;  
 vertikální stability (Vertical Stability Control Coils) 122  
 Clarendon Laboratory, Oxford University 11, 55  
 Clarington 17, 117  
 CLEO (Close Line Electron Orbit) 186  
 CoGeNT 172, 186  
 Compact Fusion Neutron Source - CFNS 64

- COMPASS (Compact Assembly) 3, 9, 10, 18, 59, 70, 72, 74, 80, 87, 88, 124, 126, 127, 128, 129, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 155, 182, 184, 186, 187, 198, 204, 211, 236, 237, 238, 239, 241
- Coronal Mass Ejection (CME) 167, 200
- CP symetrie 172, 185, 187, 192
- CRESST 172, 187
- CRPP (Centre de Recherches en Physique des Plasmas) 155, 187, 206, 212, 241
- C-stellarator 208
- CT-6 80
- Culham 18, 56, 63, 74, 186, 194, 195, 236, 239
- CXRS (Charge Exchange Recombination Spectroscopy) 187
- Cyg XI 187, 211
- Cykloida 163
- Částice;
  - alfa 184, 188, 211;
  - polní 170, 186, 194, 212
- Černá díra 187, 188, 211
- Černobyl 8
- Československo 16, 57, 83
- ČSAV (Československá akademie věd) 13, 15, 57, 60, 61, 63, 68, 156, 185, 188, 191, 239
- Chameleon 172, 196
- Charkov 20, 191
- Chicago Pile-1 11
- Chování;
  - kolektivní 27, 157, 164, 193, 206
- D**
- Dálková manipulace 188
- Dálkově řízená údržba 117
- DAMA 172, 188
- DCU (Dublin City University, Irsko) 188
- Deexcitace 135, 187, 209
- Deformace;
  - plastická 145, 150, 218, 219
- DEMO (Demonstrační reaktor) 18, 25, 118, 120, 122, 139, 145, 147, 149, 150, 177, 178, 188, 193, 213
- Detektor;
  - Čerenkovův 125, 135, 136;
  - Hallův 125, 126;
  - polovodičový 125, 130, 132;
  - proporcionální 125, 135, 136;
  - scintilační 125, 135, 136, 172
- Deuterio-lithiový cyklus 138
- Deuterium 8, 18, 24, 48, 75, 76, 77, 81, 138, 145, 177, 189, 192, 196, 199, 209, 217
- Diagnostika;
  - aktivní 110, 126, 129, 187;
  - částicová 136;
  - magnetická 126;
  - mikrovlňná 126, 127, 239;
  - pasivní 126, 204;
  - sondová 126, 133;
  - spektroskopická 126, 128, 129;
  - svazková 136
- Difrakční mřížka 129, 131
- Difuze;
  - Bohmova 13, 36, 37, 58, 185
- DIII-D (Doublet III Divertor) 63, 64, 73, 77, 182, 184, 189, 205
- Dioda;
  - AXUV 131, 132;
  - LED 35
- Disrupce 145, 148, 189, 213, 217
- Divertor;
  - čerpaný 188;
  - Mark 75;
  - Super X 63
- Doba;
  - udržení 30, 52, 59, 62, 71, 87, 189;
  - výboje 69, 76, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 86, 90
- DOE (Department of Energy) 189, 191
- Doplnňování paliva 189
- Dopplerův;
  - jev 129;
  - posuv 129, 133, 187, 189
- Dpa (Displacement per Atom) 190, 208
- Drift;
  - toroidální 37, 56, 162;
  - ve skříženém poli 162, 163
- Driftová orbita 190
- Driver 197
- DTE1 190
- Dusík 23, 82, 85, 122, 123, 187, 199
- Dynoda 131
- E**
- EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak; HT-7U) 18, 60, 61, 73, 80, 81, 190, 200
- ECCD (Electron Cyclotron Current Drive) 190
- ECRH (Electron Cyclotron Resonance Heating) 84, 190, 196
- EDA (Engineering Design Activity) 16, 198
- EFDA (European Fusion Development Agreement) 17, 52, 156, 175, 181, 184, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 195, 197, 198, 199, 201, 203, 205, 206, 210, 213, 216, 217, 236, 239, 241
- Elektrická;
  - dvojrstva 158;
  - síť 177
- Elektrickým polem 136, 165, 166
- Elektroda 131, 134, 135, 136, 179
- Elektrodynamika kvantová 170, 200



- Elektromagnetická;  
interakce 160, 162, 170, 200;  
past 20, 21, 63, 191, 208
- Elektronvolt 49, 128, 192
- ELI Beamlines 96, 106, 107
- ELI - Extreme Light Infrastructure 34, 66, 96, 106, 107, 191, 237
- ELiTE (Eveda Lithium Test Loop) 139
- ELM (Edge Localized Mode) 88, 122, 135, 144, 168, 191;  
ELMAN - Elektromagnetická nádoba 68, 191
- Endoskop 130
- ENEA - Ente per le Nuove tecnologie 107, 155, 181, 191, 192, 210
- Energie;  
atomová 8, 12, 14, 15, 16, 19, 20, 65, 110, 115, 117, 186, 191, 196, 198, 201, 239;  
elektrická 40, 50, 98, 121, 140, 179;  
fúzní 14, 33, 41, 66, 75, 121, 193, 209, 213;  
geotermální 24;  
infračervená 18;  
jaderná 12;  
kinetická (pohybová) 27, 31, 123, 163;  
magnetická 208, 209;  
plazmatu 57, 59, 69, 71, 87, 88, 141, 169, 195, 201;  
podélná 219;  
potenciální 26, 163;  
produkovaná 102, 111, 179;  
světová 23;  
tepelná 20, 43, 48, 52, 79, 201;  
termojaderná 1, 7, 8, 9, 22, 23, 30, 37, 46, 52, 70, 71, 72, 73, 85, 111, 115, 116, 117, 123, 178, 196, 236, 237, 241;  
tvůrčí 5;  
uvolněná 27, 30, 50;  
vyzářená 47, 53;  
záření 30, 130;  
zářivá 46, 54, 101;  
ztrátová 30
- Engineering Test Facility (ETF) 113
- Engineering Validation and Engineering Desing Activities (EVEDA) 120
- ERDA (Energy Research and Development Agency) 189, 191
- ERM/KMS 155
- Eroze 146, 148, 152, 205
- ESA (European Space Agency) 161, 191, 195
- EURATOM (European Atomic Energy Community) 13, 17, 69, 120, 155, 181, 193, 198, 209
- eV 49, 86, 129, 132, 192, 211
- Excitace 203
- F**
- F4E (Fusion for Energy) 120, 181, 193
- Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská - FJFI 13, 70, 155, 239
- FAST 51, 74, 87
- FDR (Final Design Report) 198
- Fermilab 192, 193
- Ferritická martensitická ocel 192
- Filament 160, 192
- Finanční auditorský výbor 118
- FIREX-II 65, 111
- FIR (Far Infra-Red) 192, 197
- Flexibilita 41, 69, 87, 102
- Fluorid kryptonu 35
- Fokusace 91
- FOM (Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie) 181, 192
- Fotodioda 129, 135
- Frekvence;  
cyklotronní 188, 190, 195, 210;  
dolně hybridní 16;  
opakovací 35, 65, 66, 101, 102;  
plazmová 164, 206;  
rezonanční 165
- FTI - Fyzičsko-techničeskij institut 63
- FTU (Frascati Tokamak Upgrade) 51, 182, 192
- Fusion Development Facility - FDF 64
- Fusion for Energy (F4E) 120, 181, 193
- Fúze;  
inerciální 15, 16, 30, 32, 34, 36, 49, 50, 51, 64, 66, 70, 91, 195, 210;  
magnetická 65, 113;  
nepřímo zapalovaná 31, 32;  
přímo zapalovaná 31, 32
- Fúzní produkt 52, 86, 136, 193
- Fúzor 21, 63
- Fyzika částicová 193
- Fyzikálně technický ústav v Charkově 11, 191
- Fyzikálně technický ústav v Petrohradě 155
- FZJ (Forschungszentrum Jülich) 70, 181, 193, 214
- FZK (Forschungszentrum Karlsruhe) 155, 193, 215, 241
- G**
- Galaxie;  
kupa 211
- GammeV 172, 193
- Garching 37, 70, 77, 78, 89, 105, 117, 140, 162, 169, 184, 197, 201, 205, 206, 218, 241
- GEKKO XII 96, 111
- General Atomics 63, 64, 77, 79, 81, 189
- Geodetika 194
- Geomagnetická bouře 194

- Gironde-Bordeaux 104  
 Globální oteplování 24  
 GLOBUS-M 194  
 Gluony 157, 170, 186, 194, 200, 212  
 Golem 9, 18, 69, 85, 86, 182, 186, 238  
 Grafit 84, 146, 148  
 Gravitační;  
     čočkování 171;  
     struny 162, 194  
 Greenwaldova;  
     hustota 194;  
     limita 194  
 Greifswald 17, 37, 56, 89, 197, 218, 236  
 Gyrate 162, 194  
 Gyrotron 82, 83, 90, 142, 193, 194
- H**
- Halo proud 217  
 Harmonická 91, 92, 94, 98, 100, 101, 105, 106, 107, 109, 110, 111  
 Harwell 13, 56, 184, 195  
 HAS - Hungarian Academy of Sciences 155, 181, 195  
 Hefei 80, 140, 190  
 Heliac 90, 214  
 Heliový popel 189, 195  
 Helium 8, 11, 23, 25, 26, 40, 138, 177, 192, 195, 196, 209  
 Helium 3 26, 209  
 Herschelova vesmírná observatoř 160, 161, 195  
 HIBP (Heavy Ion Beam Probe) 135  
 HiPER - High Power laser Energy facility 34, 65, 66, 95, 97, 102, 103, 105, 108, 195  
 HIP (Hot Isostatic Pressing) 140, 195  
 Hirošima 11  
 H-mod 15, 44, 56, 60, 78, 80, 81, 126  
 Hohlraum 32, 91, 94, 112  
 Horké komory 195  
 Hoření 24, 31, 33, 41, 46, 48, 53, 86, 115, 117, 196, 207, 218  
 HT-6B 80  
 HT-6M 80  
 HT-7 80  
 HT-7U (EAST) 80  
 Huemul 12  
 Hustota;  
     elektronová 125, 135;  
     lokální 125, 127;  
     plazmatu 77, 86, 87, 125, 127, 133  
 Hvězda 196, 202  
 Hvězdy 166, 196  
 Hybridní reaktor 62, 63, 64, 84, 97, 179, 237  
 H $\alpha$  131
- I**
- IAEA (International Atomic Energy Agency) 15, 115, 196, 197, 235  
 ICCD (Ion Cyclotron Current Drive) 196  
 ICF (Inertial Confinement Fusion) 65, 66, 112, 191, 196, 206, 210  
 ICRH (Ion Cyclotron Resonant Heating) 196  
 IEA (International Energy Agency) 73, 183, 196  
 IFMIF (International Fusion Materials Irradiation) 120, 139, 141, 152, 178, 197  
 Ignitor 51, 62, 74, 85, 86, 87, 197, 215  
 Imperial College, London 11, 55  
 Index lomu 165  
 Integrated Beam Experiment (IBE) 113  
 Integrated Research Experiment (IRE) 113, 197  
 Interakční komora 35, 91, 113  
 Interferenční filtr 131  
 Interferometrie;  
     mikrovlnná 108, 125, 127, 128  
 Intermetalika 150, 197  
 Intermezzo 14, 69  
 International Agency Atomic Energy (IAEA) 65  
 International Fusion Research Centre 120  
 INTOR (International Tokamak Reactor) 14, 16, 115, 197  
 Ionosféra 197  
 Iont;  
     cesiový 113;  
     kladně nabitý (kladný) 27, 28;  
     lehký 35, 112, 135;  
     lithiový 113;  
     rezonanční 190, 210;  
     těžký 35, 113, 135, 159, 182;  
     záporně nabitý 27, 192, 193  
 IPP 17, 69, 155, 181, 184, 186, 197, 216, 218, 238, 241  
 IPPLM (Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion) 181, 197  
 IRE (Internal Reconnection Event) 113, 197  
 IR (Infra Red) 197, 211  
 ISKRA-5 108, 183  
 IST - Instituto Superior Técnico 155, 181, 198  
 ISTTOK 182, 198  
 ITER Domácí agentura (ITER Domestic Agencies) 7, 8, 9, 15, 16, 17, 18, 25, 33, 37, 40, 41, 43, 44, 61, 62, 63, 64, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 81, 82, 84, 86, 87, 113, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 138, 139, 140, 141, 142, 146, 148, 149, 156, 166, 175, 177, 178, 182, 184, 185, 187, 188, 190, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 205, 208, 209, 212, 214, 215, 217, 219, 235, 236, 237, 238, 241

- ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) 7, 8, 9, 15, 16, 17, 18, 25, 33, 37, 40, 41, 43, 44, 61, 62, 63, 64, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 81, 82, 84, 86, 87, 113, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 138, 139, 140, 141, 142, 146, 148, 149, 156, 166, 175, 177, 178, 182, 184, 185, 187, 188, 190, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 205, 208, 209, 212, 213, 214, 215, 217, 219, 235, 236, 237, 238, 241
- ITER Organization 18, 62, 118, 120, 123, 235, 241
- ITER Unit of Accounts (IUAs) 119
- ITPA (International Tokamak Physics Activity) 198
- J**
- JAEA (Japan Atomic Energy Agency) 139, 198
- JAEC (Japan Atomic Energy Research Institute) 198
- JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute) 75, 198
- JET (Joint European Torus) 8, 14, 15, 16, 17, 40, 41, 42, 52, 61, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 86, 89, 115, 117, 120, 122, 123, 138, 139, 141, 142, 148, 155, 156, 174, 182, 184, 186, 187, 189, 190, 199, 204, 205, 206, 209, 211, 214, 236, 239, 241
- Jouleovo teplo 37, 40, 59, 138, 205
- JT-60SA (Japan Torus Super Advanced) 61, 73, 75, 76, 120, 182, 199
- JT-60U (Japan Torus Upgrade) 61, 73, 75, 76, 115, 199, 205
- Jupitěr 20, 63
- K**
- Kalmar 14, 64, 96, 109
- Kamera;
  - řádková 129, 131;
  - vysokorychlostní 125, 129
- Karbid křemíku 138
- Katastrofická rekonekce 167, 168, 169, 199
- Keramika;
  - lithiová 151;
  - neoxidická 150;
  - nitrid 150;
  - oxidická 150
- Klasick 199
- Klídková hmotnost 26
- Klystron 199
- Kometární ohon 160, 199
- Komora;
  - prstencová 39, 40, 55;
  - vakuová 37, 42, 57, 61, 63, 69, 80, 81, 84, 88, 90, 119, 121, 122, 123, 138, 139, 140, 142, 156, 184, 188, 200, 206, 214, 215, 216, 217;
  - výbojová 56, 60, 65, 166, 184, 208, 215, 216, 217
- Kompozit;
  - SiC-SiC 147;
  - uhlíkový CFC (Carbon-Fibre Composites) 79, 142, 145
- Konverze 92, 105, 106, 107, 110, 173, 193
- Kosmické počasí 175, 200
- Kryodestilace 177
- Kryogenní vývěvy 200
- Kryostat 83, 122, 123, 139, 185, 200, 217
- Křehkost 147, 149
- KSTAR (Korean Superconducting Tokamak Reactor) 18, 61, 73, 79, 80, 182, 200
- KTM (Kazachstan Tokamak for Material Testing) 117, 237
- Kulový blesk 162, 200
- Kvarky 157, 158, 170, 192, 200, 201, 212
- Kyslík 42, 131, 148, 178, 199, 207
- L**
- Laser;
  - excimerový 35;
  - femtosekundový 32, 33, 101, 106;
  - jodový fotodisociační 105, 108;
  - Nd:YAG 129;
  - neodymový 32, 33, 34, 70, 94, 104;
  - pevnolátkový 32, 35, 107;
  - plynový CO<sub>2</sub> 32, 98;
  - rentgenový 70, 186
- LaserLab-Europe 106
- Laser Megajoule (LMJ) 93, 105
- Laserová ablace 201
- Lausanne 82, 213, 239
- Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) 113, 202
- Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) 21, 33, 91, 92, 96, 97, 113, 202, 219, 241
- Lawsonovo kritérium 13, 41, 52, 57, 71, 201
- Leningrad 184
- Lepton 170, 192, 200, 201, 212
- LHCD (Low Hybrid Current Drive) 60, 79, 80, 199, 202, 207
- LHD (Large Helical Device) 37, 56, 89, 182
- Liebniz-Rechen Zentrum (LRZ) 201
- LIFE (Laser Inertial Fusion-Fission Energy; Laser Inertial Fusion Energy) 64, 97
- Limiter;
  - poloidální 42;
  - toroidální 42, 44, 84
- Liner 65, 112
- LIPAc (Linear IFMIF Prototype Accelerator) 139
- LIPAN (Laboratorija izmeritel'nykh priborov Akademii Nauk) 12, 20, 201
- Lithiová smyčka 139, 141
- Lithium 8, 26, 63, 123, 138, 201
- LLE (Laboratory for Laser Energy) 32, 95, 100, 202
- L-mod 44, 60, 195

Los Alamos National Laboratory (LANL) 95  
 LTF - skupina Large Tokamak Facilities 73

## M

Magnetar 168, 199, 202  
 Magnetická nádoba 36, 87, 115, 184, 185, 186, 189, 207, 214  
 Magnetické;  
   ostrovy 169, 202;  
   siločáry 36, 42, 160, 162, 164, 167, 196, 197, 202, 204, 218;  
   střih 205, 212  
 Magnetické pole;  
   absolutní hodnota 125, 126, 127;  
   přepojení (rekonekce) 167;  
   reorganizace 88;  
   střížné 37, 39, 89;  
   změny 127;  
   zrcadlo/past 12, 36  
 Magnetosféra 202  
 Manhattan 11  
 Manosque 121  
 Maser 13  
 MAST (Mega-Amp Spherical Tokamak) 61, 63, 73, 77, 78, 155, 182, 186, 194, 202, 204, 205, 212  
 Matematicko-fyzikální fakulta UK 155  
 Materiál 7, 9, 17, 20, 24, 25, 31, 35, 36, 42, 44, 51, 63, 66, 70, 75, 78, 86, 97, 98, 101, 103, 115, 120, 122, 132, 134, 136, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 155, 156, 177, 185, 190, 191, 192, 195, 197, 199, 201, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 212, 214, 215, 218, 219, 240; radioaktivní 25, 195  
 Matterhorn 12, 56, 89  
 MCF (Magnetic Confinement Fusion) 203, 206  
 Meklenbursko 90  
 Mezinárodní agentura pro atomovou energii 15, 65, 196  
 Mezoatom 179  
 Mezon 179, 192, 193, 201  
 MFTF-B - Mirror Fusion Test Facility 57  
 MGU 19, 20  
 MHD;  
   nestabilita 203;  
   přiblížení 196  
 Mike 19, 54  
 Ministerstvo vzdělání, vědy, výzkumu a techniky 90  
 MIT (Massachusetts Institute of Technology) 62, 85, 184, 203, 234  
 Mlhovina 211  
 Model;  
   dvoutekutinový 190;  
   mnohotekutinový 190  
 Modulární systém 89

Molekulární mračno VELA C 160, 203  
 Monte Carlo 203  
 Moskovskij Gosudarstvenyj Institut 19  
 Mřížka;  
   krystalová 145, 151, 192, 197, 216  
 MSE (Motional Stark Effect) 203  
 MTR - Magnitnyj termojaderným reaktor 12, 63, 204

## N

Nábojová výměna 204  
 Nagasaki 11  
 Naka 75, 117, 120, 140, 199  
 Napáječ (Feeder) 122  
 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 90, 179, 202  
 Násobič;  
   foto 125, 129, 131;  
   neutronů 185, 204  
 National Institute for Fusion Research 120  
 NBI (Neutral Beam Injection) 59, 60, 61, 79, 80, 84, 189, 190, 196, 204, 207  
 Nečistoty;  
   koncentrace 125, 132  
 Nestabilita;  
   eruptivní 167;  
   magnetohydrodynamická ,  
   MHD 58, 185, 191;  
   mikro 203;  
   Rayleigh-Taylorova 31, 92  
 Neutralized Drift Compression Experiment (NDCX) 113  
 Neutron;  
   energetický 25, 146  
 Neutronový;  
   hvězda 202;  
   násobič 185, 204  
 NIF (National Ignition Facility) 17, 18, 33, 34, 35, 50, 64, 65, 66, 92, 93, 94, 95, 97, 98, 101, 102, 103, 104, 183, 202  
 NIFS (National Institute for Nuclear Science) 89, 120, 205  
 NOVA 15, 65, 91, 92, 93, 94, 100  
 Novosibirsk 14, 35, 59, 63, 155, 166  
 NRIM (National Research Institute for Metals) 205  
 NSTX (National Spherical Tokamak Experiment) 61, 63, 73, 182, 184, 205  
 Nukleon 26, 211  
 Nulový bod;  
   dvojnásobný 198, 216;  
   jednoduchý 198, 216  
 Numerická simulace 156, 162, 171

## O

Oak Ridge National Laboratory (ORNL) 59, 205

- OAW - Österreichische Akademie der Wissenschaften 155
- Obal (Blanket) 66, 103, 115, 117, 119, 122, 123, 138, 144, 151, 156, 177, 184, 185, 204, 206, 207, 209, 213, 216
- Objem plazmatu 75, 76, 77, 89, 122, 199
- Obninsk 12
- Obnovitelné zdroje energie 23, 24, 178, 237
- Ocel;
- austenitická nerezová 184, 185;
  - nízkoaktivovatelná 142, 147
- Odlupování 144
- Odprašování 144, 149, 205
- Ohřev;
- dodatečný 43, 66, 83, 84, 111, 117, 142, 218;
  - induktivní 40;
  - Jouleův 37, 40, 59, 83, 138, 205;
  - neinduktivní 79;
  - ohmický 41, 86, 205
- Okno 15, 71, 94, 100, 132, 142
- OMEGA 32, 95, 100, 101, 102
- Optický;
- hranol 131;
  - vlákno 129
- Ormak 59
- P**
- Padova 88, 89, 210
- PALS - Prague Asterix Laser System 17, 66, 70, 96, 102, 105, 106, 107, 183, 205
- Parogenerátor 123, 140
- Particle Beam Fusion Accelerator 112
- PBFA-II (Particle Beam Accelerator) 112
- PbLi 16, 206
- Pegasus 206
- Peleta 31, 33, 34, 43, 61, 66, 206
- Penthouse 18, 62, 210
- Permeační bariéra 144, 150, 151, 206, 215
- PERUN 70
- PETAL - Petawatt Aquitaine Laser 95, 102, 103, 105
- Petrohrad 155, 184, 194, 212
- PFC (Plasma Facing Component) 61, 204, 206
- PFW (Primary First Wall) 140, 206
- Photonuclear Facility 106
- Pinč;
- lineární 219;
  - s obráceným polem 210;
  - theta 11, 55, 56, 112, 184, 192, 210, 219, 240;
  - toroidální 13, 37, 55, 184
- Plazma;
- časový vývoj 106, 131;
  - doba udržení energie 52, 59, 71, 87;
  - kvartové-gluonové 157, 158, 159, 193;
  - kvazineutrální 157, 193, 206;
  - laboratorní 69, 157, 158, 159, 162, 165;
  - okraj/periferie 44, 87, 88, 191, 201, 203, 211;
  - pedestal/podstavec 87;
  - poloha 40, 125, 132;
  - profil 208;
  - rychlost rotace 125, 133;
  - složení 77, 86;
  - ÚFP - Ústav fyziky plazmatu Akademie věd České republiky, v.v.i. 13, 14, 15, 17, 18, 68, 69, 70, 88, 96, 154, 155, 186, 191, 205, 209, 216, 239, 240;
  - vesmírné 157, 158, 165, 173, 174
- Plazmoid 166, 168, 194, 206
- Plodící;
- obal (Blanket) 66, 115, 117, 122, 138, 206, 207;
  - poměr 207
- Plození 102, 207
- PLT (Princeton Large Torus) 14, 60, 208
- Plyn;
- ionizovaný 27, 28, 157, 206;
  - neutrální 158, 159
- Podmínka zapálení 207
- Podobnostní vzorce/vztahy 60, 73, 207
- Podobnostní zákony 207
- Polarimetrie 192, 207
- Polární záře 28, 207
- Pole;
- elektrické 56, 163, 204, 209;
  - elektromagnetické 43, 66, 142, 170, 200;
  - magnetické 13, 28, 33, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 50, 51, 55, 56, 58, 59, 61, 65, 71, 72, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 116, 119, 121, 122, 126, 127, 135, 136, 140, 147, 156, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 173, 184, 185, 187, 188, 190, 191, 192, 194, 197, 199, 200, 202, 203, 204, 207, 208, 209, 210, 211, 214, 215, 216, 217, 235;
  - poloidální (magnetické) 39, 82, 147;
  - poruchové 208;
  - střížné 37, 39;
  - šroubovicové (magnetické/siločáry) 37, 39;
  - toroidální (magnetické) 39, 60, 147, 160, 198, 210, 215;
  - vstřícné magnetické (Cusp) 58, 217;
  - zamrzlé 196
- Poloidální;
- magnetické pole 18, 83, 185;
  - směr 41
- Polychromátor 129
- Polywell 21, 63, 207
- Poradní komise pro řízení 118
- Poradní komise pro vědu a technologii 118
- Port 133, 142, 234



- Posuv;  
     modrý 133;  
     rudý 133  
 Poškození 145, 146, 152, 190, 197, 217;  
     radiační 145, 146;  
     zářením 197, 208  
 Pražská svazková škola 68  
 Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL) 80, 113,  
     186, 205, 208  
 Procurement Arrangement (PA) 119, 120  
 Profil 14, 91, 99, 125, 132, 135, 192, 203, 204, 207,  
     208  
 Protážení (Elongation) 42, 76, 81, 208  
 Proton 24, 26, 47, 48, 98, 101, 102, 107, 108, 157,  
     158, 159, 164, 170, 172, 179, 184, 188, 189, 192,  
     201, 206, 211, 216, 217  
 Proud;  
     induktivně buzený 37, 186;  
     neinduktivně buzený 16, 57, 60, 186, 205, 212;  
     plazmatem 15, 16, 36, 37, 39, 41, 42, 75, 84, 116,  
     138, 186, 192, 205, 207, 214, 219;  
     typický 75;  
     vlečený 42, 69, 79, 83  
 Provence 121  
 Průřez komory;  
     D-tvaru 42, 82, 187;  
     kruhový 42, 75, 82, 84, 123, 187, 188, 214, 215,  
     216;  
     protáhlý 60, 216  
 Prvek;  
     disperzní 125, 129, 131;  
     pyroelektrický 132  
 První stěna (Primary First Wall) 75, 123, 139, 206, 208  
 Přechod;  
     fázový 158, 217  
 Přepojování 197  
 Přepólování 41  
     přepólování transformátoru 41  
 PSI (Paul Scherrer Institute) 206, 209  
 Public Information Network (PIN) 9, 156, 206, 239  
 Pulzní zařízení/režim 60
- Q**
- Quench 208, 209
- R**
- Radiační zhroucení 141  
 Radioaktivní odpad 24  
 Reaktor;  
     fúzní 8, 15, 24, 36, 48, 78, 79, 85, 86, 138, 139,  
     177, 179, 190, 201, 207, 213, 214, 216, 217, 219;  
     hybridní 62, 63, 64, 84, 97, 179, 237;  
     štěpný 18, 23, 24, 25, 55, 64, 138, 139, 146, 152,  
     207, 208  
 REBEX - Relativistic Beam Experiment 68, 209
- Redepozice 144, 145, 209  
 Reflektometrie;  
     mikrovlnná 125  
 Rekombinace 135  
 Relativita obecná 170, 210  
 Relaxace 210  
 Rezonance;  
     cyklotronová 75, 76, 77, 82;  
     dolní hybridní 42, 83, 165;  
     horní hybridní 165, 195;  
     magnetická 142  
 RFP 210  
 RFX (Reversed Field Experiment) 88, 89, 182, 210  
 Riggatron 62  
 Rochester 95, 202  
 Rokkasho 17, 117, 120, 197  
 Rotační transformace 56, 57, 58, 185, 210  
 Rovina polarizace 166  
 Rozdělovací (distribuční) funkce 27, 210  
 Ruské federální vědecké centrum -Všeruský vědecký  
     výzkumný ústav experimentální fyziky  
 (RFNC VNIIEF) 96, 108, 109, 110
- S**
- Samoorganizovaná rovnováha 88  
 Sandia National Laboratory - SNL 17, 65, 70, 93, 112,  
     156  
 San Diego 64, 162, 175, 189, 210  
 San Diego Supercomputer Center (SDSC) 162, 175,  
     210  
 Sarov 50, 96, 109  
 SCK/CEN 155  
 Scylla 219  
 SDX - Super X Divertor 63  
 Sekundární/vybuzená radioaktivita 140, 142, 188, 205  
 Semiempirický 211  
 Senzor;  
     CCD 130, 135, 136;  
     CMOS 130, 131  
 Separatrix 189, 198, 208, 211  
 SERF (Socio Economic Research in Fusion) 211  
 Setrvačnický 40  
 Sféroamak 212  
 Sherwood 12, 56, 235  
 Síla;  
     Coulombova 206;  
     coulombovského tření 216;  
     dalekého dosahu 27, 206;  
     gravitační 26, 201;  
     odstředivá 37, 190, 201;  
     přitažlivá jaderná 26, 27;  
     urychlující 216  
 Skleníkový efekt 24, 25

- Slunce 23, 26, 46, 48, 53, 54, 131, 134, 158, 161, 162, 166, 167, 168, 172, 175, 186, 195, 199, 200, 211, 234
- Sluneční vítr 200, 211
- Soliton;  
Langmuirův 158, 211
- SOL (Scrape-Off -Layer) 211
- Sonda; atomová (Atomic Beam Probe; ABP) 135, 136;  
ball-pen 125, 133, 134, 135;  
Hallova 17, 156;  
Langmuirova 125, 133, 134, 135, 158, 201
- Souhvězdí;  
Labutě 162, 187;  
Plachet 160, 203
- Spallation Neutron Source (SNS) 139
- Spektrometr;  
hmotnostní 136, 152;  
mřížkový 125, 133
- Spektroskopie 135, 187, 211, 239
- Spektrum;  
čárové 204, 209
- Spin 170, 186, 192, 212
- SST-1 74, 82, 83, 182
- START 16, 36, 61, 78, 186, 194, 204, 212
- Stelarátor 12, 16, 37, 56, 58, 81, 89, 120, 178, 182, 186, 197, 202, 208, 212, 214, 218, 236
- Studená fúze 16, 54
- Sublimace 144, 212
- SULTAN (Supra Leiter Test Anlage) 212
- SUMTRAIC (Summer Training Course on COMPASS) 155
- Supravodič;  
MgB<sub>2</sub> 86, 204;  
NbTi 40, 147, 200, 204, 212;  
vysokoteplotní 18
- Supravodivost (supravodivá cívka) 61, 208
- SuSEN 156
- Svazek;  
elektronový 35, 79, 98, 99, 150, 191, 209, 240;  
neutrálních částic 61, 186, 189, 204
- Světelný rok 213
- Širší přístup (Broader Approach) 118, 120, 213
- Šroubovice 89, 160, 213, 218
- Šroubovicové/helikální vinutí 192
- Štěpení atomových jader 213
- T**
- T-1 13
- T-3 14, 59, 61, 166
- T-7 15, 60, 80, 156
- T-8 60
- T-9 60
- T-10 14, 74, 83, 84, 207, 216
- T-12 60
- T-15 16, 21, 61, 62, 64, 73, 83, 84
- T-15 MD 62, 84
- Tavení 144, 146, 152
- TBM (Test Blanket Module) 151, 213
- TCV (Tokamak a Configuration Variable, Lausanne, Švýcarsko) 73, 81, 82, 155, 182, 213, 239
- Tekes 155, 181, 213
- Teorie;  
kinetická 27, 199;  
neoklasická 60, 199, 204
- Tepelné cyklování 152, 214
- Tepelný štít 122
- Teplota;  
elektronová 125, 127, 129, 133;  
iontová 111, 125, 133;  
plazmatu 60, 65, 86, 159, 205
- Terč (divertoru) 32, 35, 43, 91, 92, 94, 97, 98, 99, 102, 103, 104, 109, 110, 123
- Terčiková komora 33, 93, 96, 97, 98, 104, 111
- Terčik/pelet 14, 18, 27, 33, 49, 50, 64, 65, 66, 91, 94, 112, 113, 197
- Termojaderná elektrárna 18, 37
- Test Blanket Modules (TBM) 119
- TEXTOR (Tokamak Experiment for Technology Oriented Research, Německo) 40, 73, 82, 83, 84, 182, 214
- TFTR 59, 116
- TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) 14, 16, 61, 73, 74, 76, 77, 86, 115, 116, 182, 205, 209, 214
- Three Mile Island 15
- TIN-1 62, 64, 85
- TJ-II 90, 182, 186, 214
- Tlak 42, 51, 87, 122, 152, 169, 185, 192, 195, 196, 211, 214, 215
- Tlakem 30, 51, 145, 169, 185, 199, 218
- TLK (Tritium Laboratory Karlsruhe) 214
- TM-1 13, 69, 154
- TMP (Toroid v magnetnom pole) 13, 214
- Tokamak;  
kompaktní 18, 62, 210;  
kulový/sférický 63, 78, 155, 186, 194, 202, 206, 212;  
satelitní 76
- Toki 16, 37, 89, 90
- Tomografie 129, 132
- TORE SUPRA 16, 17, 42, 78, 83, 140, 155, 182, 186, 215
- Toroidální;  
geometrie 199;  
magnetické pole 210, 219;  
směr 39, 41, 207;  
tvar 204
- Torsatron 215

- Torus s magnetickým polem 13, 14, 15, 55, 62, 69, 74, 75, 85, 154, 186, 199, 205, 207, 214
- TOSKA 215
- Toxicita 148
- TPRF (Tritium permeation reduction factor) 150, 152, 215
- Transformace;  
 rotační 56, 57, 58, 185, 210;  
 škálovací 159, 213
- Transmutace;  
 jaderná 215
- Transport;  
 anomální 184, 203, 215, 216;  
 částic 76, 199;  
 klasický 199;  
 tepla 76, 199;  
 turbulentní 216
- Transportní bariéra 44, 215
- TRIAM - 1M 66, 74, 82, 83
- Triniti 86, 215
- Tritium 18, 24, 63, 70, 75, 76, 81, 103, 115, 122, 123, 138, 142, 145, 150, 177, 179, 196, 198, 201, 206, 209, 214, 216, 217
- Trochoida 163
- Troitsk 215
- Trojný (fúzní) součin 215
- Turbocirkulátor heliový 70, 156, 213
- Turbulence 44, 63, 77, 100, 134, 185, 203, 216, 240
- U**
- Ubíhající/zabíjácí elektrony (Runaway electrons) 136, 164, 166, 216
- Udržení;  
 elektromagnetické 20, 21;  
 elektrostatické 14, 19, 62, 237;  
 inerciální 9, 13, 14, 29, 30, 32, 34, 36, 64, 66, 107, 179;  
 magnetické 14, 16, 30, 35, 36, 37, 52, 58, 62, 64, 69, 107, 116, 185, 204, 219
- Uhlík 79, 133, 140, 141, 142, 145, 148, 149, 199, 208
- Uhlíková katastrofa 141
- UKAEA - United Kingdom Atomic Energy Authority 18, 155, 241
- ULB 155
- Urychlovač 11, 27, 35, 41, 50, 55, 68, 72, 110, 113, 116, 126, 139, 141, 159, 173, 188, 192, 193, 240
- USA 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 30, 32, 33, 36, 57, 62, 63, 64, 65, 68, 73, 74, 76, 77, 80, 93, 95, 96, 100, 102, 112, 115, 116, 117, 118, 120, 121, 184, 189, 198, 202, 203, 205, 208, 210, 214, 219, 240
- Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o. 17, 70, 155
- Ústav fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského AV ČR 17, 155
- Ústav fyziky materiálů AV ČR, v.v.i. 70, 155
- Ústav fyziky plazmatu Maxe Plancka 17, 89, 197
- Ústav jaderné fyziky AV ČR, v.v.i. 17, 70, 155, 156
- Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s. 17, 70, 155
- Ústav vakuové elektroniky 13, 68
- Ústav vakuové elektroniky ČSAV 68
- ÚVE 13
- V**
- Vakance 145, 146, 190, 216
- Vakuová;  
 nádoba 13, 42, 51, 75, 90, 117, 122, 130, 140, 145, 146, 150, 184, 189, 202, 216;  
 vývěva 217
- Vanad 138, 147
- Vandellós 17, 117
- VDE (Vertical Displacement Event) 144, 151, 217
- Velký třesk 217
- Vesmír 7, 9, 28, 53, 62, 93, 139, 157, 158, 159, 161, 162, 169, 170, 171, 173, 174, 175, 193, 194, 195, 213, 217, 234, 236, 237
- Vinutí;  
 primární 39, 119, 121, 122, 186;  
 sekundární 39
- Virtual National Laboratory of Heavy-Ion Fusion (HIF-VNL) 113
- Vláknó;  
 optické 129;  
 plazmové 160
- Vlasy Bereniky 211
- Vlečení proudu 42, 69, 79, 83
- Vlnová délka 32, 91, 97, 98, 100, 109, 131, 132, 133, 159, 161, 167, 192, 195, 197, 218
- Vlny;  
 akustické 152, 164;  
 elektromagnetické 40, 42, 82, 138, 195, 196, 207, 215;  
 levotočivá 165;  
 mimořádné 165;  
 nízkofrekvenční 166, 196;  
 pravotočivá 165, 166;  
 zvukové rázové 179
- Vodík;  
 supertěžký/tritium 18, 24, 26, 63, 70, 75, 76, 81, 103, 115, 122, 123, 142, 145, 150, 177, 179, 196, 198, 199, 201, 206, 207, 209, 216, 217;  
 těžký/deuterium 8, 18, 24, 26, 48, 75, 76, 77, 81, 138, 145, 177, 192, 196, 199, 209, 217
- Vodíkové hospodářství 178
- Vodivost;  
 tepelná 140, 146, 148, 149, 203
- Vrstva;  
 gradovaná 217
- VR - Vetenskapsradet 155, 181, 217
- VULCAN 33, 101, 120

VUV (Very Ultra Violet light) 211, 217, 218

Výboj;

doutnavý 157

Výměník 177

Vypařování 144

## W

W7-AS 56, 89, 218

W7-X 17, 34, 37, 56, 89, 90, 91, 139, 218, 236

WEC (World Energy Council) 23

Wendelstein 17, 34, 37, 56, 81, 89, 91, 218, 236

Wendelstein W7-X 17, 34, 37, 56, 89, 91, 236

Wimp (Weakly Interacting Massive Particle) 172, 186, 187, 188, 218

Wolfram 44, 70, 75, 78, 131, 134, 141, 142, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151

## X

X-1 112

XUV (Extreme Ultraviolet radiation) 107, 211, 218

## Z

Zapálení;

rychlé 98, 101, 102, 105, 210

Záření;

celkové 125;

gama 103, 128;

infračervené 90, 104, 144, 161, 195;

kosmické 164, 166;

měkké rentgenové (SXR) 132;

mikrovlnné 128, 159;

reliktní mikrovlnné 159;

rentgenové 15, 128;

ultrafialové 103, 132, 217, 218;

viditelné 128, 129

Zásoba stability 185

Zátěž stěny;

neutronová 120, 156, 204;

tepelná 141, 213

Zdroj;

energie 5, 8, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 40, 41, 43, 44, 46, 47, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 57, 59, 60, 62, 63, 64, 65, 66, 69, 71, 75, 76, 79, 81, 83, 87, 88, 90, 92, 93, 94, 95, 96, 98, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108, 110, 111, 112, 115, 116, 117, 121, 123, 126, 130, 131, 135, 138, 139, 140, 141, 144, 145, 150, 152, 163, 165, 166, 167, 169, 171, 177, 178, 179, 184, 186, 189, 191, 192, 193, 195, 196, 197, 198, 199, 201, 204, 205, 207, 209, 211, 213, 214, 215, 216, 218, 219, 234, 236, 237, 239; obnovitelné energie 23, 24, 178, 237

Zeff 218

Zesilovač 33, 91, 92, 94, 99, 101, 102, 107, 108, 109, 131, 132, 133, 173

ZETA (Zero Energy Thermonuclear Apparatus) 13, 56, 184, 218

Zkřehnutí;

vodíkové 145, 218

Zpětná vazba 218

Zpevnění;

disperzní 147, 150, 219

Z-pinch 219

Zrcadlo;

magnetické 36, 56, 164, 219

Zvlnění 219

Z-zařízení (Z-machine) 65, 112

Železo 26, 39, 131

# REJSTŘÍK JMENNÝ

## A

Anaxagoras 53  
Arcimovič L. A. 5, 30, 58, 59,  
60, 61, 62, 64, 66, 204  
Aston F. 46, 54  
Atherton J. 97  
Atkinson R. 11

## B

Barkhausen B. 166  
Basov N. G. 13, 14, 64  
Bennet W. H. 65  
Berija L. P. 20  
Berlusconi S. 20, 62, 87  
Bethe H. 47  
Bhabha H. 8  
Blackman M. 11, 55  
Bucharin N. I. 11, 55  
Bush G. W. 93  
Bussard R. 21, 62, 63, 207

## C

Coppi B. 62, 85, 86, 197, 210

## D

Dolan T. J. 21

## E

Eddington A. 11, 46, 54  
Einstein A. 11, 26, 54, 194, 210

## F

Farnsworth P. 14, 21  
Fermi E. 11, 55  
Filipov N. V. 12

## G

Gamow G. 11, 55  
Golovin I. N. 13, 19, 57  
Gorbačov M. S. 14, 115  
Guccione R. 18, 62, 210

## H

Hahn G. 11  
Harteck P. 11, 55  
Hawryluk R. 80  
Helmholtz H. 53  
Herschel J. 54, 201  
Herschel W. 195  
Hirsch R. 14, 62, 63  
Holtkamp N. R. 18  
Houtermans F. G. 11

## I

Ikeda K. 18  
Ioffe M. S. 13

## J

Jacobs E. 11, 55  
Javlinskij N. A. 204

## K

Kalmykov A. A. 20  
Kaname I. 18  
Kantrowitz A. 11, 55  
Klíma R. 14, 16  
Koizumim J. 118  
Krlín L. 16, 237  
Krochin O. N. 14, 64  
Kurčatov I. V. 13, 14, 19, 20,  
57, 69, 83, 85, 201

## L

Lagrange J. L. 201  
Langmuir I. 11, 27, 194, 211  
Lavrentěv O. A. 12, 19, 20, 21,  
57, 63, 191, 204, 208  
Lawson J. D. 12, 13, 30, 57,  
201

Leontovič M. A. 20  
Linhart G. J. 13

## M

Mayer R. J. 53  
Michell J. 162  
Mitterand F. 115, 118  
Moses E. 97  
Motojima O. 18, 119

## N

Nebel R. 21, 63  
Nuckolls J. 65

## O

Oliphant M. L. E. 55

## P

Pavlo P. 16  
Pavlov N. I. 20  
Peron J. 12, 56  
Peters K. 11  
Petržilka V. 14  
Pons S. 16, 54  
Prochorov A. M. 13  
Putin V. 62, 87

## R

Reagan R. 15, 115  
Richter R. 12, 56  
Rjutov D. 21  
Robinson D. 14, 59  
Rutherford E. 11, 53, 55

## S

Sacharov A. D. 12, 19, 20, 39,  
57, 63, 204  
Spitzer L. 12, 56, 89, 208  
Stalin I. V. 12, 19, 20, 21, 55,  
56  
Strassman F. 11  
Šafranov V. D. 58, 59, 60  
Šunka P. 57, 237

## T

Tamm I. E. 12, 19, 57, 204  
Teller E. 12, 55  
Thomson G. P. 11, 55  
Thomson W. (lord Kelvin) 53  
Thonemann P. 11  
Townes C. 13  
Truman H. 12, 19  
Tuck J. L. 56

## V

Vannikov B. L. 20  
Velichov J. P. 14, 115, 117,  
119  
von Weizsäcker C. F. 11

## Z

Zwickey F. 171



# 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 Kulhána „Blýskání“. Vřele doporučuji.

## 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., Hružka, J., Malinský, J., Marek, J., Opplová, 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

Dean Stephen O.: **Search for the Ultimate Energy Source** (A History of the U.S. Fusion Energy Program), Springer, New York 2013, ISBN 978-1-4614-6037-4

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 Johns Hopkins University Press, Baltimore & London 1997

- Kulhánek, P.: **Blýskání**, AGA, Praha 2011

- Kuzněcov, E. I.: **Na puti k magnetomou 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) G. McCracken, P. Scott : Fusion - The Energy of the Universe, Second Edition, 2013

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.)



Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.: 10 tokamaku nemá žádná země na světě.

Heřmanský, B., Štoll, I.: **Energie pro 21. století**, Vydavatelství ČVUT, Praha 1992

Kulhánek, P.: **Úvod do teorie plazmatu**, AGA 2011

Lukjanov, S. J.: **Gorjačaja plazma i upravljajemij termojadernyj sintěz**, 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

J. Mlynář: **Rovnováha plazmatu a magnetického pole v termojaderných reaktorech typu tokamak**, Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, ročník 57 (2012), 122

D. Břeň: **Základní rovnice rovnováhy plazmatu v tokamacích**, tamtéž, str. 140

F. Žáček, J. Stöckel: **Současný stav a perspektivy termojaderného slučování v tokamacích**, Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, ročník 38 (1993), 219

Aasen A., Olsson P., eds.: **Nuclear Reactors, Nuclear Fusion and Fusion Engineering**, Nova Science Publ., New York 2009

## 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.technickytydenik.cz>

**Třípól**, [www.tretpol.cz](http://www.tretpol.cz), ČEZ, internetový časopis

**Časopis MAT21**, všechna čísla z let 2012 až 2014

### VYSOKÁ ŠKOLA

**Nuclear Fusion**: měsíčník, IAEA

### BLOGY

**Cosmic Log**: <http://cosmiclog.msnbc.msn.com>

**Next Big Future**: <http://nextbigfuture.com>



O stavebnici tokamaku je mezi mládeží zájem.

## 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
- 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 Penthouse**, 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., Král, 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
- Řípa M., Mlynář J., Ficker O.: **Články o fúzi, MAT21** (Materiály pro nové tisíciletí), čísla 1 až 8 (2012 až 2014)

# 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.



# 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 Weinzetti, 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 penzionování, 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 spolunositelem Ceny kolegia fyziky ČSAV (1970), dvou Cen ČSAV (1973, 1992) a Prémie českého Literárního fondu za nejlepší knihu s fyzikální tematikou (1981).



**Ing. Jiří Matějček, Ph.D.** (1971) vystudoval Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze a State University of New York, Stony Brook, USA. Po krátké stáži v National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA, nastoupil v roce 1999 do ÚFP, kde pracuje v Oddělení materiálového inženýrství. Jeho hlavním zaměřením je výzkum a vývoj plazmových nástřiků a charakterizace materiálů. Od roku 2001 se věnuje též výzkumu a vývoji fúzních materiálů připravených různými technologiemi. V roce 2006 obdržel prémii Otto Wichterleho.



**Prof. RNDr. Petr Kulhánek, CSc.** (1959) vystudoval Matematicko fyzikální fakultu UK, obor matematická fyzika. Disertaci na téma Kolejnicové urychlovače plazmatu obhájil na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze. V současnosti se věnuje numerickým simulacím dějů v plazmatu a teorii plazmatu, zejména vlnami v plazmatu, turbulencemi a nestabilitami. Přednáší na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské a na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze. Založil server Aldebaran pro popularizaci fyziky a astronomie. V roce 2010 získal cenu Littera Astronomica za popularizaci astronomie.



**RNDr. Karel Koláček, CSc.** (1943) absolvoval MFF UK v Praze – specializaci Elektronika a vakuová fyzika v roce 1965, titul RNDr. získal v roce 1976 na MFF UK v Praze (experimentální fyzika), titul CSc. získal v r. 1976 na FEL ČVUT v Praze (aplikovaná fyzika). Od r. 1965 pracuje v ÚFP AV ČR zpočátku v oboru nízkoteplotního plazmatu (plazma ve zkřížených polích), později v oboru vysokoteplotního plazmatu (interakce relativistického elektronového svazku s plazmatem, Z-pinč, impulsní silnoproudý kapilární výboj pro generaci koherentního rtg záření). Byl členem vědecké rady ÚFP AV ČR (i jejím předsedou), reprezentantem ČR v Mezinárodním řídicím výboru UNESCO projektu Mezinárodního centra hustého magnetizovaného plazmatu (ICDMP), je členem (a místopředsedou) Mezinárodního vědeckého výboru ICDMP, předsedou Nadace ICDMP. Od r. 2001 je vedoucím vědeckého odd. Impulsních plazmových systémů ÚFP AV ČR.

# ŘÍZENÁ TERMOJADERNÁ FÚZE PRO KAŽDÉHO – 4U

Autoři: Milan Řípa, Jan Mlynář, Vladimír Weinzettl, František Žáček, Petr Kulhánek,  
Jiří Matějčík, Karel Kolářek

Editor: Milan Řípa

Jazyková redaktorka: Kateřina Táborská

Ilustrace: Ivan Havlíček

Návrhy ilustrací: Milan Řípa a Ivan Havlíček

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, Lawrence Livermore National Laboratory, Los Alamos National Laboratory, CLF STFC Rutherford Appleton Laboratory, CAE CESTA; British Crown/ Atomic Weapons Establishment; G. McCracken, P. Stott: Fusion – the Energy of the Universe

Grafická úprava: Michal Rouček, Reklamní agentura DANIEL s.r.o. Most

Výtisk: Reklamní agentura Daniel s.r.o. Most

U příležitosti dosažení H-modu na tokamaku COMPASS v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky, v.v.i vydal projekt Materiály pro nové tisíciletí (registrační číslo CZ.1.07/2.3.00/35.0009) spolu-financovaný z Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu ČR.

Čtvrté, rozšířené a číslované vydání

Praha 2013

Neprodejný výtisk



NEPRODEJNÝ VÝTISK

LIMITOVANÁ SÉRIE – ČÍSLOVANÉ VYDÁNÍ: 001