

ŘÍZENÁ TERMOJADERNÁ SYNTÉZA

pro každého



ŘÍZENÁ TERMOJADERNÁ SYNTÉZA

pro každého

Milan Řípa
Vladimír Weinzettl
Jan Mlynář
František Žáček

PODĚKOVÁNÍ

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

Milan Řípa, editor

V Praze, 26. května 2004

OBSAH

Předmluvy k prvnímu a druhému vydání	8
Minulost a budoucnost termojaderné fúze v datech (Milan Řípa)	10
Proč právě termojaderná fúze? (Vladimír Weinzettl)	17
Plazma a princip termojaderné syntézy (Milan Řípa)	21
Magnetické a inerciální udržení (Milan Řípa, Jiří Limpouch)	25
Princip tokamaku (Vladimír Weinzettl)	33
Historie termojaderné fúze ve světě (Milan Řípa)	40
Historie termojaderné fúze v Česku (František Žáček)	46
Velká termojaderná zařízení (Vladimír Weinzettl, Milan Řípa, Jan Mlynář)	50
ITER (Milan Řípa)	70
Termojaderná technologie (Milan Řípa)	75
Mezinárodní spolupráce české republiky v oblasti termojaderné fúze (Milan Řípa)	80
Budoucnost termojaderné fúze (Jan Mlynář)	83
Doslov	86
Fúze na internetu (Vladimír Weinzettl)	87
Dodatek vysvětlivky zkratk některé veličiny popisující plazma předpony pro vedlejší jednotky	89 92 93
Literatura	94
Resume	96

PUBLIKACE BYLA VYDÁNA PŘI PŘÍLEŽITOSTI 45. VÝROČÍ ZALOŽENÍ
ÚSTAVU FYZIKY PLAZMATU AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY.

MOTTO:

Nyní je všem jasné, že první úvahy o tom, jak se dveře do vytoužené komnaty mimořádně vysokých teplot otevřou hladce a bez skřípotu při prvním nárazu tvůrčí energie fyziků, se 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 očištcí zdržíme. Z něho musíme vystoupit s ideální vakuovou technikou, přesně určenou geometrií magnetických siločar, s naprogramovanými režimy elektrických obvodů, nesouce v ruce klidné, stabilní vysokoteplotní plazma, čisté jako mysl teoretického fyzika, ještě nenarušeného setkáním s experimentálními fakty.

L. A. Arcimovič

PŘEDMLUVA K PRVNÍMU VYDÁNÍ

Spolu s kolegy z Ústavu fyziky plazmatu AV ČR jsme se pokusili v roce 20. výročí generace prvního plazmatu na dosud největším tokamaku na světě – evropském JET – sepsat, a v roce, který by měl rozhodnout o místě stavby termojaderného reaktoru ITER, poskytnout co nejširší veřejnosti základní informace o tom, co vlastně termojaderná energie pro společnost znamená, přičemž jsme kladli důraz na historii, na cestu, kterou vědci a technici museli zvládnout, než dospěli do její poloviny – 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 v Dodatku. Další informace o fúzi najdete v kapitole **Literatura** nebo **Fúze na internetu**.

Text publikace bude zveřejněn na internetových stránkách Ústavu fyziky plazmatu AV ČR.

Milan Řípa, Vladimír Weinzettl, Jan Mlynář, František Žáček

PŘEDMLUVA K DRUHÉMU VYDÁNÍ

Záhy po zveřejnění informace v denním tisku, byla knížka, kterou Ústav fyziky plazmatu AV ČR posílal zájemcům zdarma, rozebrána. Naštěstí se objevila nabídka energetické společnosti ČEZ, a. s., která se rozhodla vydat knížku po druhé a zařadit ji do svého velkorysého programu „energetického“ vzdělávání mládeže. Není náhodou, že i předseda představenstva a generální ředitel ČEZ, a. s., Dr. Martin Roman vidí budoucnost v termojaderné fúzi. Autoři jsou rádi, že mohou na tomto místě ČEZ, a. s., za její vstřícnost poděkovat. Zejména děkují paní Ing. Marii Dufkové, bez níž by druhé vydání světlo světa nespátrilo.

Radost nad úspěšnou publikací poněkud zmírňují neúspěšná jednání o místě stavby termojaderného experimentálního zařízení ITER, nezbytného dalšího kroku ke komerční termojaderné elektrárně. Šest partnerů projektu ITER si ani po třech letech nedokázalo vybrat jednoho ze dvou uchazečů o stavbu – z japonského Rokkasho-muro či francouzského Cadarache. Začne-li se ITER v dohledné době stavět vítězem nebude ani Asie či Evropa, ani padesátiletá usilovná práce vědců celého termojaderného světa, ale vítězem bude lidská společnost zbavená obav o svou energetickou budoucnost.

Milan Řípa, Vladimír Weinzettl, Jan Mlynář, František Žáček

Minulost a budoucnost termojaderné fúze v datech

- 1905 **A. Einstein** – teorie relativity: $E = \Delta m \times c^2$ – energie je ekvivalentní hmotě.
- 1920 **A. Edington**: „...hvězdy jsou tyglíky, kde se lehčí atomy, kterých je v mlhovinách spousta, spojují v mnohem složitější prvky.“
- 1928 **I. Langmuir** – „plazmatem“ nazval kladný sloupec výboje v plynu (podobnost s krevní plazmou, oba přepravují částice, nebo podle významu řeckého – tvarovat, formovat; výboj sleduje tvar výbojové trubice).
- 1929 **R. Atkinson** a **F. G. Houtermans** – hypotéza o slučování jader vodíku za vzniku helia jako zdroje energie hvězd.
- 1932 **N. I. Bucharin** navrhl **V. D. Šafranovovi** postavit experimentální zařízení pro výzkum termonukleární fúze – měděný vodič naplněný bublinkami deuteria a tritia.
- 1933 **E. Rutherford**: „Kdokoli se snaží uvolnit výkon přeměnou atomu, je snílek.“
- 1934 **E. Rutherford** a **M. L. E. Oliphant**, **P. Harteck**, **D. Crockroft** (Cambridge University, Anglie) – fúze jader deuteria na urychlovači – první fúzní reakce v pozemské laboratoři.
- 1938 **A. Kantrowitz**, **E. Jacobs**, US National Advisory Commission for Aeronautics – přerušili výzkum magnetické izolace horkého plazmatu kvůli nedostatku financí.
- 1942 Manhattan – tajný americký projekt na sestrojení atomové bomby.
- 1942 **E. Fermi** demonstruje v USA první samoudržitelnou řetězovou štěpnou reakci.
- 1945 USA svrhly atomové bomby na 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-efekt¹ v deuteriu: výkon $P_{DD} = 9$ MW.
- P. Thonemann** (Clarendon Laboratory, Oxford University, Anglie) – toroidální výboj ve skleněné komoře buzený vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem (5 MHz a později 100 kHz).
- 1949 **O. A. Lavrentěv**, seržant Rudé armády – dopis **J. V. Stalinovi** do Moskvy z ostrova Sachalin: popis termonukleárního reaktoru s elektrostatickou izolací a popis konstrukce suché vodíkové bomby.

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

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

- 1950 **H. Truman**, prezident USA: „Urychlete vývoj vodíkové bomby!“
- 1950 **O. A. Lavrentěv** – dopis pro ÚV KSSS s popisem řízené termonukleární reakce s izolací elektrostatickým polem a popisem konstrukce suché vodíkové bomby.
- 1950 **A. D. Sacharov** a **I. E. Tamm** (Laboratorija Izmeriteľnych Priborov Akadēmii Nauk – LIPAN², Moskva, SSSR) dokončili první výpočty magnetického termonukleárního reaktoru.
- 1951 Juan Perón, prezident Argentiny, ohlašuje zvládnutí termojaderné reakce (rakouský fyzik Ronald Richter na ostrově Hewmal). Zpráva nebyla pravdivá.
- 1951 **J. V. Stalin** (květen) – usnesení Rady ministrů SSSR o organizaci výzkumu Magnetického termonukleárního reaktoru (MTR).
- 1951 **A. D. Sacharov** a **I. E. 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 Matterhorn rozšířen na Sherwood (pinče v Los Alamos, zrcadlové pasti v Livermore apod.).
- 1952 „Termojaderné“ neutrony z-pinče ohlášené **N. V. Filipovem** přisoudil **L. A. Arcimovič** nestabilitě plazmatu (nepocházely z termojaderné reakce).
- 1952 **E. Teller**, USA, 1. listopadu, Marshallovy ostrovy – 1. vodíková nálož.
- 1952 **Meunier** – výzkum termojaderné fúze ve Francii.
- 1953 **A. D. Sacharov**, SSSR, 12. srpna, Semipalatinsk – 1. vodíková puma.
- 1955 **J. D. Lawson** – kritérium pro nulový zisk, tzv. breakeven, termojaderného reaktoru – fúzní výkon = výkon pro dosažení a udržení teploty plazmatu (z důvodů utajení nepublikováno).
- 1955 **H. Babha** (Spojené národy, 1st International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy): „Metoda řízeného uvolňování energie jaderné fúze by měla být zvládnuta během příštích 25 let.“
- 1955 První „tokamak“ – označovaný jako TMP – torus s magnetickým polem a s keramickou vakuovou nádobou.
- 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.

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

- 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.
- 1958 **ZETA** – chybná publikace senzačních „termojaderných“ neutronů (časopis Nature, 25. ledna). Neúspěšná byla i sovětská ALFA s dvojnásobným objemem komory.
- 1958 2nd 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 plazmatu pod vlivem elektromagnetických sil.
- 1958 SSSR & USA – začátek formální spolupráce ve výzkumu fúze.
- 1959 Ústav vakuové elektroniky Československé akademie věd (ÚVE ČSAV) – založen a pověřen koordinací termojaderného výzkumu v Československu.**
- 1960 **I. A. Kurčatov**, šéf termojaderného výzkumu v SSSR, zemřel; nástupcem se stal **L. A. Arcimovič**.
- 1961 **M. S. Ioffe, B. B. Kadomcev** (Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Salcburk, Rakousko) – stabilizace plazmatu v otevřených nádobách pomocí „Ioffeho tyčí“ – „absolutní magnetická jáma“ odstranila zhoubnou anomální Bohmovu³ difúzi.
- 1961 **G. J. Linhart** – zavádí pojem inerciální udržení.
- 1962 **C. Townes** (USA), **A. M. Prochov** a **N. G. Basov** (SSSR) – Nobelova cena za objev principu laseru a maseru.
- 1963 **N. G. Basov** a **O. N. Krochin** (SSSR) – navrhli použití laseru k zapálení řízené termonukleární reakce.
- 1964 Ústav fyziky plazmatu Československé akademie věd (ÚFP ČSAV) – přejmenování ÚVE ČSAV.
- 1968 3rd Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Novosibirsk: tokamak T-3⁴ – 10 000 000 °C. Angličtí fyzikové posléze potvrdili tuto teplotu pětitudovou laserovou diagnostikou dovezenou z Anglie.

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

- 1969 **D. Robinson** (2nd Workshop, Dubna, SSSR) oznamuje: „**Teplota na T-3 byla změřena správně!**“ Obrovský úspěch tokamaků!
- 1970 Stávající experimentální zařízení se přestavují na tokamaky (USA, Evropa...).
- 1971 Vytvořen právní rámec rozsáhlého programu výzkumu fúze Evropské společnosti
- 1971 Laser **KALMAR** (Lebeděvův Fyzikální ústav AV SSSR, Moskva) – první fúzní neutrony z reakce D-T⁵ ve sféricky ozářeném terčíku z CD₂.
- 1972 Stlačení kulového terče laserovým impulsem o speciálním časovém profilu (LLNL, USA) – schéma v časopisu Nature.
- 1972 Ve světě je v provozu již 17 tokamaků.
- 1973 **R. M. Nixon & L. I. Brežněv** – dohoda o posílení spolupráce ve výzkumu fúze (oboustranná výměna 6 & 6 vědců mezi oběma státy).
- 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 10× za 2 roky.
- 1974 **TFTR** (Tokamak Fusion Test Reactor, Princeton University, USA) – zahájena práce na projektu tokamaku nové generace s cílem: fúzní energie z reakce 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 implodujícího⁶ kulového slupkového terče (SSSR).
- 1976 **TFTR** – zahájena stavba.
- 1977 **INTOR** (INternational TOkamak Reactor) – **J. Velichov** (budoucí ředitel Ústavu pro atomovou energii I. V. Kurčatova v Moskvě a poradce generálního tajemníka **M. Gorbačova**) navrhl vytvořit pod hlavičkou IAEA mezinárodní projekt plazmových technologií v podmínkách blízkých termojadernému reaktoru.
- 1977 **Tokamak TM-1 MH** (původní název TM 1 VČ) – spuštění prvního tokamaku ve východní Evropě mimo tehdejší SSSR (Ústav fyziky plazmatu ČSAV).
- 1978 **JET** – zahájena stavba evropského tokamaku v Culhamu, Oxfordshire, Spojené království.

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

6 Na rozdíl od exploze směřuje imploze do centra.

- 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**⁷ reaktoru na Three Mile Island, Pennsylvania, USA.
- 1980 Druhá ropná krize – revoluce v Íránu.
- 1982 **Tokamak T-7**, Moskva – vlnovodná struktura z ÚFP ČSAV generovala pomocí elektromagnetických vln rekordní proud 200 kA.
- 1983 **JET** – zahájen provoz největšího tokamaku na světě. 350 vědců a inženýrů z celé Evropy a světa. V témže 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 Ústavu fyziky plazmatu ČSAV.
- 1984 Nepřímo hnaná (Indirect Drive) inerciální fúze – návrh přeměnit „hnačí“ energii vnějšího zdroje na „hnačí“ energii rentgenového záření.
- 1985 **M. Gorbačov**, generální tajemník UV KSSS, a **R. Reagan**, prezident USA, se rozhodli v Ženevě jménem SSSR a USA společně prověřit fúzní energii k „prospěchu celého lidstva“.
- 1986 Havárie **štěpného** reaktoru v Černobylu – aktivizace protijaderných hnutí, ale i oživení zájmu o alternativy k štěpnému reaktoru.
- 1986 **NOVA** (LLNL, USA) – spuštění největšího laseru na světě.
- 1987 **ITER** (původně International Thermonuclear Experimental Reactor) – v Ženevě se představitelé EU, SSSR, Japonska a USA dohodli na spolupráci při návrhu fúzního reaktoru – 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 (Kanady).
- 1988 **ITER** – Conceptual Design Activities (CDA) – zahájení projekčních prací.
- 1988 **ITER** – Ústav fyziky plazmatu AV ČR se zapojuje do projektu prostřednictvím SSSR.
- 1988 **Experiment Centurion/Halite** (Livermore/Los Alamos, USA)
– inerciální fúze pomocí rentgenového záření podzemního jaderného výbuchu.

⁷ Štěpný reaktor a fúzní reaktor jsou dvě dokonale rozdílné věci – podrobnosti v kapitole „Plazma a princip termojaderné syntézy“.

- 1989 **INTOR** – závěrečný workshop (pracovní setkání) ve Vídni (zůstalo pouze u zpráv a bohatých databázích).
- 1989 Krátce, avšak intenzivně, ožila fantastická myšlenka studené fúze.
- 1990 **ITER** – Ústav fyziky plazmatu ČSAV se zapojuje do projektu v rámci EURATOM.
- 1991 **JET** (Evropská unie) – první na světě používá směs D-T (89 % – 11 %) a produkuje termojaderný výkon 2 MW po dobu 0,2 s.
- 1992 **TFTR** (USA) – rekordních 6,1 MW termojaderného výkonu směsi D-T (50 % – 50 %) 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 USA odtajnilo část výzkumů inerciální fúze.
- 1994 **TFTR** (USA) – 10 MW termojaderného výkonu po dobu cca 1 s (rekord).
- 1994 „Rychlé zapálení (Fast Ignition)“ inerciální fúze – návrh ohřevu subpikosekundovým⁸ laserovým impulsem po stlačení paliva impulsem nanosekundovým.
- 1997 **JET** (Evropská unie) – 16,1 MW po dobu 1 sekundy (4 MW po dobu 4 s), $Q = 0,62$ (Q = termojaderný výkon/příkon plazmatu) – poprvé na světě vnitřní ohřev α -částicemi – produkty termojaderné reakce.
- 1998 **ITER** – Final Design Report – závěrečná zpráva: 6 mld. US \$, 1500 MW fúzního výkonu, $Q = \infty$. USA odstupují od účasti na projektu ITER (republikánská většina v Kongresu USA – dotace magnetického udržení prakticky zastaveny).
- 1998 **LHD** (Toki, Japonsko) – největší a supravodivý stelarátor uveden do provozu.
- 1999 **ITER** – Kanada – první zájemce o místo pro stavbu.
- 1999 Association **EURATOM IPP.CR** – Česká republika přistoupila k EURATOM a stala se signatářem EFDA (European Fusion Development Agreement). Garantem programu asociace je Ústav fyziky plazmatu Akademie věd ČR.
- 1999 **JET** se stává společným pracovištěm evropských fúzních laboratoří, signatářů dohody **EFDA** (Evropská dohoda o rozvoji fúze).
- 1999 **Laser NIF** (LLNL Livermore, USA) – zahájena stavba.
- 2000 100 tokamaků v provozu.
- 2000 **Stelarátor Wendelstein W7-X** (Ústav fyziky plazmatu Maxe Plancka, Greifswald, Německo) – zahájení stavby.

8 Menší než pikosekunda

- 2001 ITER – Final Design Report No 2: redukovaný projekt ITER s polovičními náklady (3 mld. US \$, 500 až 700 MW fúzního výkonu, $Q > 10$).
- 2002 ITER – Cadarache (Francie), Vandellós (Španělsko), Clarington (Kanada), Rokkasho-mura (Japonsko) – místa, která splnila 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.
- 2003 ITER – Čína 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 byla vybrána francouzská Cadarache.
- 2003 **Tore Supra** (supravodivý tokamak v Cadarache, Francie) – v jediném výboji trvajícím 6:21 minut se odvedlo z tokamaku rekordních 1000 MJ tepla.
- 2003 **Laser NIF** – první výstřel do terčové komory o \varnothing 10 m; v provozu 4 ze 192 svazků.
- 2005 ITER – má být rozhodnuto o místě stavby.
- 2005 ITER – má se založit právnická osoba ILE (ITER Legal Entity) pro nakládání s ITER.
- 2006 ITER – předpokládané zahájení stavby.
- 2008 **Laser NIF** – předpokládaná projektovaná energie 1,8 kJ a zahájení fúzních experimentů.
- 2010 **Stelarátor Wendelstein W7-X** (Ústav fyziky plazmatu Maxe Plancka, Greifswald, Německo) – plánované uvedení do provozu.
- 2014 ITER – předpokládané první fyzikální experimenty.
- 2014 **DEMO** (demonstrační reaktor) – předpokládané zahájení práce na projektu.
- 2024 ITER – předpokládané zahájení technologických experimentů.
- 2024 **DEMO** – předpokládané zahájení stavby.
- 2032 **DEMO** – předpokládané zahájení provozu.
- 2034 ITER – předpokládaná demontáž.
- 2046 **DEMO** – předpokládaná demontáž.
- 2050 Termojaderná elektrárna?

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 (2×10^{30} kg). Asi půl procenta hmotnosti vodíkového paliva se v souladu s Einsteinovou teorií relativity ($E = \Delta m \times c^2$) mění na energii a uniká z povrchu jako elektromagnetické záření. Zanedbatelnou část (10^{-10}) z něj vnímáme na Zemi jako světlo a teplo. A tento zlomek je zdrojem energie nejen pro život na Zemi, ale například i pro veškerý koloběh vody. Fotovoltaickými články dokážeme z tohoto dopadajícího výkonu (průměrně 200 W/m²) 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 nejrozumnější úsporná opatření energetická spotřeba lidstva neustále zvyšuje. Ceny energie a paliv rostou, a to nejen v důsledku zvyšující se poptávky. Zásoby fosilních paliv se pomalu ztenčují a odhadují se na 200 až 250 let u uhlí, ale pouze okolo 40 až 45 let u ropy či 60 až 70 let u zemního plynu. Již 10 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 ²³⁵U pro štěpné jaderné reaktory se vzhledem k jeho neohospodárnému využívání značně zmenšily. Světové zásoby ekonomicky dostupných jaderných paliv mohou bez recyklace paliva vystačit na 90 let, při recyklaci dnešními způsoby na 140 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 roku 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 rozložením zdrojů. V poslední době zejména zdrojů energie. Nerovnoměrnost spotřeby energie je přitom do očí bijící. Spotřebuje-li Evropa s 15 % všech obyvatel Země 30 % „světové energie“, pak stejné množství energie spotřebují Spojené státy s pouhými 5,5 % obyvatel Země. Na druhé straně Asie tvoří 60 % veškeré populace musí vystačit s 30 % celkové energie, což není nic proti Africe, kde je poměr 11 % : 3 %! Nerovnováha odjakživa znamenala pohyb, který v tomto případě řinčí zbraněmi.



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

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 kyselé deště i velké množství oxidu uhličitého přispívajícího značnou měrou ke skleníkovému efektu. To způsobuje globální oteplování a v budoucnosti by 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 většina elektráren založených na obnovitelných zdrojích je ekologicky značně nešetrná (použití velmi těžko dosažitelných materiálů pro solární panely a vysoká energetická náročnost jejich výroby, hluchnost 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 prazákadem 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 miliónu tun uhlí, nebo použít plochu 20 km² 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

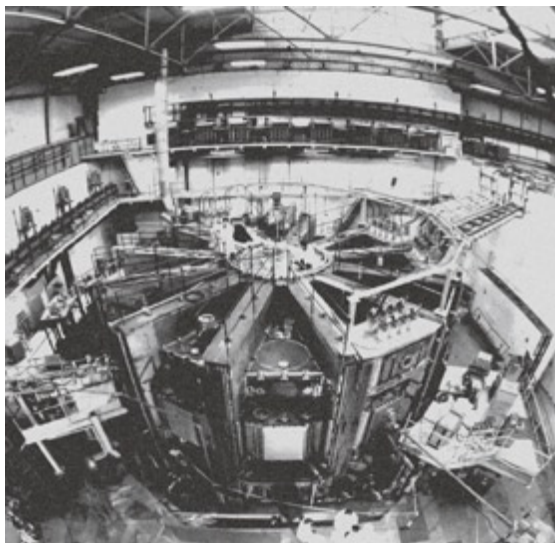


Ač na pohled působivá, není přehradní nádrž plná energie vody řešením

reaktor sloužit deuterium, což je izotop vodíku ^2H (oproti „normálnímu“ vodíku ^1H 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 miliónů 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 ^3H (jádro obsahuje dva neutrony) jako druhé části paliva. Radioaktivní tritium (poločas rozpadu⁹ 12,3 roku) 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

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



Dějiny jsou plné paradoxů. Rusko, které dalo světu nejúspěšnější termojaderné zařízení „tokamak“, nemůže svůj největší tokamak T-15 kvůli chybějícím financím provozovat.

materiály reaktorové komory budou aktivovány energetickými částicemi. Aktivaci materiálů však lze jejich vhodnou volbou snížit na minimum tak, aby 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 vyhořelého paliva štěpných jaderných elektráren).

Produktem fúzních reakcí je jádro helia, které není radioaktivní. Helium je poměrně vzácný technický plyn, nepodílí se na skleníkovém efektu a do vyšších vrstev atmosféry Země je spolu s vodíkem přinášeno tzv. slunečním větrem, který je mimo jiné odpovědný za polární záři. Helium rovněž vyvěrá z hlubin Země jako produkt alfa-rozpadu přírodních izotopů.

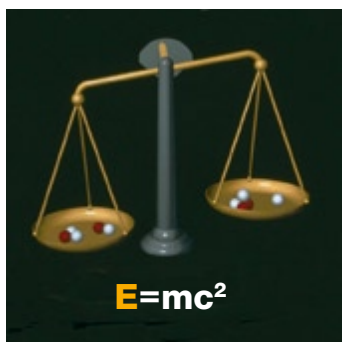
Z ekonomického hlediska se jeví budoucnost termojaderných elektráren o předpokládaných výkonech 2 až 3 GW jako velmi slibná. Do celkové ceny energie se nejvíce promítnou investiční náklady. Ty však budou kompenzovány velmi nízkou cenou paliva a předpokládanou, desítky let dlouhou dobou životnosti elektráren. S přesným vyčíslením nákladů se však musí počkat až na zkušenosti s plánovaným experimentálním reaktorem (tokamak ITER o fúzním výkonu 500 až 700 MW).

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.

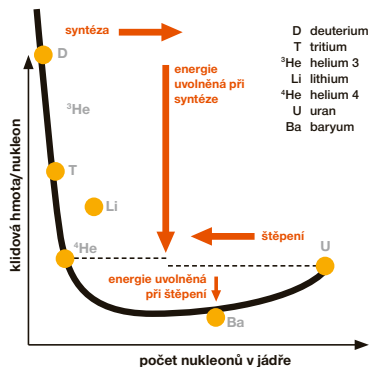
Plazma a princip termojaderné syntézy

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. 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 nukleonu¹⁰ 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 Δm ekvivalentní energii E , v tomto případě energii záření a pohybu produktů reakce (c je rychlost světla ve vakuu). Záření a kinetická energie je právě onou uvolněnou jadernou energií. Z obrázku na str. 15 je zřejmé, že slučování lehkých jader je mnohem účinnější než štěpení jader těžkých.

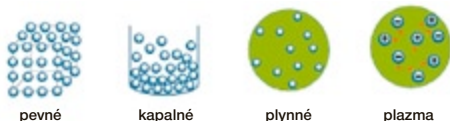


Celková hmotnost produktů reagujících (jádra deuteria a tritia) je větší než celková hmotnost výsledných produktů (jádro helia, neutron). Rozdíl hmotnosti je skryt v pohybové energii výstupu – viz rovnici na str. 17.



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

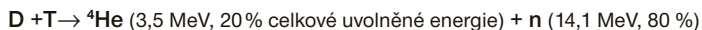
¹⁰ Nukleon, proton či neutron, je částice tvořící jádro atomu.



Plazma je čtvrtým skupenstvím hmoty.

Zatímco existují štěpné reakce, při nichž se jádra těžkých prvků rozpadají samovolně, opačný příklad, kdy se spontánně slučují jádra lehkých prvků na Zemi, asi nenajdeme. Na Slunci ovšem probíhá jaderná syntéza již hezkou řádku let a věrme, že hned tak nepřestane. Jinak by musel život na Zemi vyhlásit velmi rychle bankrot. Aby došlo k syntéze jader a aby začala působit přitažlivá jaderná síla, je třeba se 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 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 Coulombových (tj. elektrických) srážek, které jsou mnohem pravděpodobnější než srážky jaderné.

Jaderných reakcí, při nichž se jádra slučují, existuje celá řada. Ovšem pouze jedna má zápalnou teplotu nejnižší. Tou je reakce těžších izotopů vodíku – deuteria a tritia, krátce D-T reakce:



Hmota zahřátá dokonce i na tuto nejnižší zápalnou teplotu, tedy na zápalnou teplotu D-T reakce, se nachází ve stavu, kdy jsou všechny atomy ioni-



Plazma – ionizovaný plyn – tvoří 99 % hmoty vesmíru (včetně naší Země)

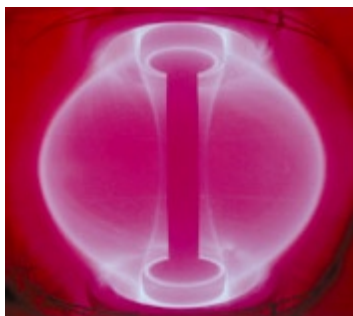


Na Zemi je plazma vzácné – jedním z příkladů je blesk

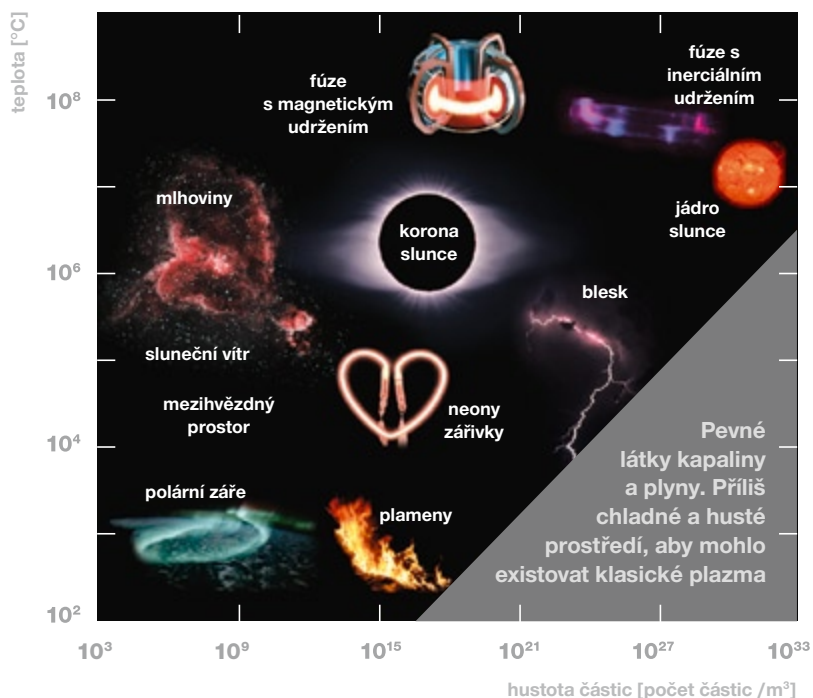
zované. Jinými slovy, záporně nabitě elektrony a kladně nabitě ionty se pohybují „nezávisle“. Tento stav hmoty se nazývá plazma, v tomto zvláštním případě plazma plně ionizované. Název zavedl v roce 1928 Irving Langmuir, když mu chování a vzhled kladného sloupce ve výboji připomnělo krevní plazmu (jak kladný sloupec, tak krevní plazma přepravují částice). Možný je i druhý výklad. Řecky „plasma“ znamená „tvarovat, formovat“, tak jak to dokáže výboj v plynu, když se přizpůsobuje různě zohýbané výbojové trubici. Čeština na rozdíl od jiných jazyků odlišuje plazmu krevní a plazma – ionizovaný plyn – mluvnickým rodem. První plazma je rodu ženského, plazma, o které se v naší publikaci zajímáme, rodu středního. TO plazma je tedy, hrubě řečeno, soubor atomů v nejrůznějších stupních ionizace, vykazující kolektivní chování a zvenčí elektrickou neutralitu. Za kolektivní chování jsou zodpovědné síly dalekého dosahu (elektrické a magnetické) a za neutralitu stejný počet kladných a záporných nábojů. TO plazma je médium 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 rovněž trefou do černého – plazma je v tomto případě příliš řídké. Fyzikové proto často používají statistický popis pomocí rozdělovací funkce rychlostí – tzv. kinetickou teorii. Nicméně 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 změní směr a velikost své rychlosti teprve při srážce s jinou částicí. Elektricky nabitá částice v elektrickém poli je urychlována ve směru nebo proti směru elektrických siločar. Kladný iont je urychlován od anody ke katodě a elektron od katody k anodě. V magnetickém poli bez působení vnějších sil se nabitá částice pohybuje podél magnetických siločar volně – magnetické pole „nevnímá“. Ve směru kol-



Plazma v laboratoři: výboj v kulovém tokamaku START (Spojené království)



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

mém na směr magnetických siločar se pohybuje po kružnici, jejíž poloměr je nepřímo úměrný intenzitě magnetického pole. Elektrony se pohybují opačným směrem než kladně nabitě ionty a poloměr „jejich“ kružnice je menší než u hmotnějších iontů. Kolmo k magnetickému poli se nabitá částice může pohybovat pouze díky srážce s jinou částicí, která střed kružnice jejího pohybu posune na jinou magnetickou siločáru. Tento pohyb napříč magnetickým polem se nazývá difúze. Za normálních okolností je rychlost difúze nepřímo úměrná druhé mocnině intenzity magnetického pole. Zajímavé je, že při pohybu podél magnetického pole srážky pohyb brzdí a při pohybu napříč magnetickým polem jsou naopak jeho nezbytnou podmínkou.

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 jí 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 τ_E . Za předpokladu, že zdrojová termojaderná energie a ztrátová energie záření a unikajících částic jsou vráceny do tepelného cyklu s účinností nepřevyšující 33 %, odvodil v roce 1955 J. D. Lawson kritérium, které se podle autora nazývá Lawsonovo. Pro syntézu deuteria s tritiem (D-T reakci) při teplotě iontů $T_i \approx 2 \times 10^8$ °C platí:

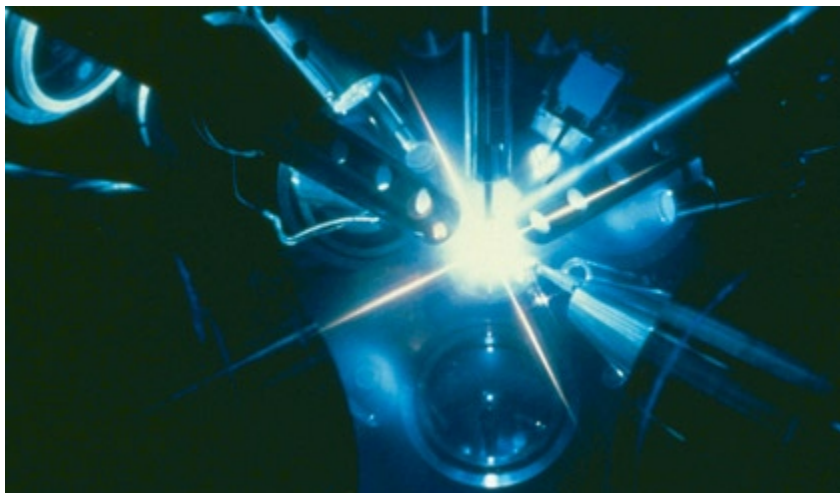
$$n \tau_E \geq 0,5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}.$$

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 ($\approx 10^{31} \text{ m}^{-3}$)



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



Inerciální udržení – světelné svazky laseru míří na terčík termojaderného paliva

a krátkou dobou udržení ($\approx 10^{-10}$ s), nebo malou hustotou ($\approx 10^{20}$ m $^{-3}$) a dlouhou dobou udržení (několik s). 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 TNT¹¹. Tato energie se uvolní, pokud slučování deuteria a tritia proběhne v 1 mg paliva. Přitom 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 $Q = 580$.

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 gcm $^{-3}$, tj. asi na hustotu tisíckrát větší, než je hustota paliva v pevné fázi.

K dosažení vysoké hustoty paliva se při inerciální fúzi používají slupkové

11 Trinitrotoluen – běžná (vojenská) trhavina



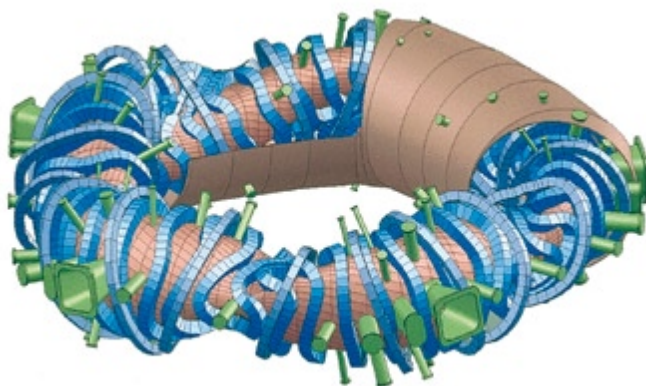
Magnetické udržení – komora největšího tokamaku na světě JET v anglickém Culhamu. Magnetické pole tvoří cívky vně komory a proud uvnitř komory.

kulové terče o průměru až 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 g cm^{-3} , ale vzrůst teploty uprostřed terče je podstatně menší než očekávaný v důsledku turbulentního¹² promíchání paliva.

Energie může být dodána do terče buď přímo z vnějšího impulsního zdroje energie (přímo hnaná fúze), nebo jako energie měkkého rentgenového

¹² Virového (chaotického)



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

záření, na kterou je energie vnějšího zdroje přeměněna v materiálu o vysokém atomovém čísle (nepřímo hnaná fúze). Výhodou přímo hnané je lepší účinnost přeměny energie vnějšího zdroje na kinetickou energii implodující slupky. Výhodou nepřímo hnané fúze jsou podstatně menší požadavky na kvalitu (homogenitu, symetrii) vnějšího zdroje energie.

Nepřímo hnaná fúze je do určité míry oním miniaturním modelem vodíkové bomby, proto má i významné vojenské aplikace. Nepřímo hnaná fúze byla 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 hnané inerciální fúze a zřejmě existuje i určitá představa o potřebné velikosti zdroje energie. Nejintenzivnějším zdrojem energie dostupným v laboratoři je dnes laser. Může totiž velmi rychle dodat velké množství energie do velmi malého objemu. Proto se idea inerciální fúze objevila brzy po sestrojení prvního laseru a laser se stal nejpoužívanějším nástrojem při jejím studiu. Záhy se zjistilo, že pro dlouhé vlnové délky a vysoké intenzity laserového záření je většina energie laseru transformována na energii malého množství rychlých elektronů, které předehtějí palivo a zabrání tak jeho stlačení. Proto se přestal užívat jinak výhodný plynový 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 frekvenci¹³ $0,351 \mu\text{m}$ (blízká ultrafialová oblast), což lze i u velkých laserů provést s účinností lepší než 60 %. I tak je užívaná intenzita

13 Frekvence třikrát větší (vlnová délka třikrát menší) než základní

laserových svazků fokusovaných na terč obvykle menší než 10^{15} Wcm^{-2} . Používané laserové impulsy mají délku několika nanosekund. Z hlediska výzkumu inerciální fúze jsou Nd-lasery nejspěšnější nástroje. 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, USA. Cílem je přímo hnaná 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 pulsu délky od 10 fs do 1 ps. Pokud se podaří dopravit energii femtosekundového laseru do paliva stlačeného na potřebnou hustotu nanosekundovým laserovým pulsem, 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 pulsů, je tato myšlenka usilovně zkoumána na laseru Gekko XII v japonské Ósace a na laseru VULCAN ve Velké Británii. Z dalších metod přichází v úvahu i zapálení nepřímo hnané fúze v z-pinči – impulsním výboji, ve kterém se oblast s velmi vysokou proudovou hustotou komprimuje vlastním magnetickým polem. 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 1 výstřel za hodinu. Chceme-li využít energii inerciální fúze, bylo by třeba několika výstřelů za sekundu a účinnost větší než 10 %. V principu lze těchto parametrů dosáhnout i Nd-lasery. K čerpání laseru je však třeba použít místo výbojek drahé laserové diody. Cena laseru by pak o mnoho řádů převyšovala nejvyšší ekonomicky možné náklady, a proto se dnes zkoumají jiné impulsní zdroje energie. Z laserů přichází v úvahu vyvíjený excimerový laser na fluoridu kryptonu. Dostatečného výkonu při relativně nízké ceně urychlovače mohou dosahovat svazky nabitých částic. Obtížně fokusovatelné elektronové svazky vypadly hned v první etapě. Možnost použít svazky lehkých iontů se dosud zkoumá, ale potíže s jejich transportem a fokusací na terč zatím mnoho optimismu nevzbuzují. Z dnešního hlediska se jeví jako nejpravděpodobnější pro budoucí energetické využití svazky těžkých iontů. Zdá se, že mohou splnit všechny požadavky. Jejich použití se však studuje zatím výhradně teoreticky. Nemá totiž smysl provádět experimenty na malém urychlovači těžkých iontů, a proto je třeba již do prvního zařízení investovat více než miliardu dolarů. Výstavba takového zařízení se odkládá do okamžiku, kdy bude inerciální fúze demonstrována pomocí laserů. Na druhé straně má inerciální fúze výhodu, že nejdražší a nejsložitější část zařízení (laser nebo urychlovač) stojí daleko od interakční komory, a je tudíž chráněna před radioaktivním zářením. Samotná interakční komora bude relativně jednoduchá, a proto problémy s materiály vystavenými silným neutronovým tokům budou pravděpodobně podstatně menší než u magnetického udržení. Další výhodou výzkumu inerciální fúze je mnohostranné použití budovaných velkých zařízení. Velmi významné jsou vojen-



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

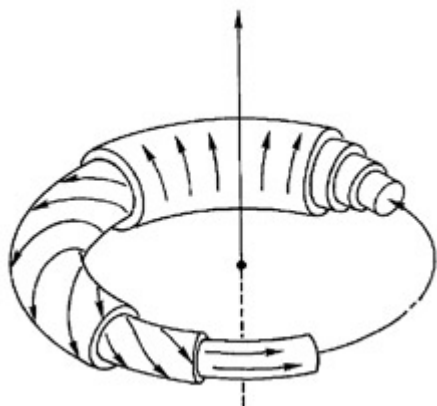
ské aplikace, a proto je i výstavba laseru NIF placena z programu údržby strategického arsenálu amerických jaderných zbraní. Zařízení se ale používají i pro základní výzkum systémů s vysokou hustotou energie, např. jejich stavové^{13,14} rovnice, a dalších vlastností materiálů při extrémních tlacích, přítomných v jádrech planet a hvězd. Řada experimentů slouží přímo jako model různých astrofyzikálních jevů, mluví se velmi často o laboratorní astrofyzice. Významná je i generace intenzivních rentgenových a částicových 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 tento způsob pracuje s vnějším magnetickým polem. Jak známo, pohyb nabitých částic napříč siločarami magnetického pole je tímto polem ovlivňován, a to tak, že dráha nabitých částic se zakřivuje, až kolem směru siločar magnetického pole opíše částice kružnici. Čím silnější je magnetické pole, tím menší kružnice nabitých částic opisují, tím lépe jsou polem „drženy“. Napříč magnetickým polem se pak pohybují pouze díky srážkám, které je posunují na „sousední“ magnetické siločáry. Částice ve směru kolmém na směr

¹⁴ Rovnice udávající závislost vnitřních parametrů systému na teplotě a vnějších parametrech ve stavu termodynamické rovnováhy

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 nabitě částice 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 zrcadla, která demonstrovala eliminaci zhoubné Bohmovy difúze (viz [str. 8](#)). Byl to geniální nápad sovětského fyzika A. Ioffeho, který vybavil zrcadlo podélnými tyčemi protékajícími elektrickým proudem, a vytvořil tak konfiguraci magnetického pole, kdy intenzita roste všemi směry, nejen axiálně, ale i radiálně. Tento objev se později uplatnil i v uzavřených magnetických nádobách. Ioffe za svůj objev obdržel od Američanů Fordovu cenu, ale politbyro – vedení KSSS – mu nakázalo cenu odmítnout. Nic netušící kolegy fyziky za „železnou oponou“ si tak Ioffe velmi rozzlobil.

Na rozdíl od otevřených 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. střížné magnetické pole. 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 ve střížném magnetickém poli pohybuje tak, že zmíněný drift eliminuje. Základními typy uzavřených nádob jsou tokamaky a stelarátory. Zatímco tokamaky k vytvoření potřebného magnetického pole využívají složení pole vnějších magnetických cívek a 100× slabšího magnetického pole proudu tekoucího v plazmatu, střížné pole stelarátorů je tvořeno pouze vnějšími cívkami. Požadovaná konfigurace cívek stelarátoru může vést k zvláštnímu tvaru komory, např. ve tvaru osmičky nebo samotných cívek



Střížné pole při magnetickém udržení v toroidální komoře. Šipky označují směr siločar magnetického pole.

(obr. na [str. 23](#)). Vzhledem k tomu, že proud v plazmatu tokamaku se budí induktivně, tokamak není nic jiného než transformátor s jediným závitem, plazmatickým provazcem v sekundárním vinutí, jedná se principiálně o impulsní zařízení. Uvidíme později, že i tokamaky mohou pracovat stacionárně, ovšem pouze „s dodatečnou výbavou“. Naproti tomu uspořádání stelarátoru umožňuje práci ve stacionárním režimu. Bohužel se ve stelarátorech dlouho nedařilo odstranit Bohmovu difúzi (viz [str. 8](#)) 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 a v Greifswaldu na severu Německa staví Institut für Plasma Physik z 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: TOroidalnaja KAmera i MAgnitnyje Kатуški – toroidální komora a magnetické cívký) je jedním z nejslibnějších typů zařízení pro uskutečnění řízené termojaderné fúze, v budoucnu i stavby fúzní elektrárny. Jeho koncepce se zrodila v letech 1950–2 v bývalém Sovětském svazu díky týmu slavného ruského fyzika Andreje 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 Tesla) 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

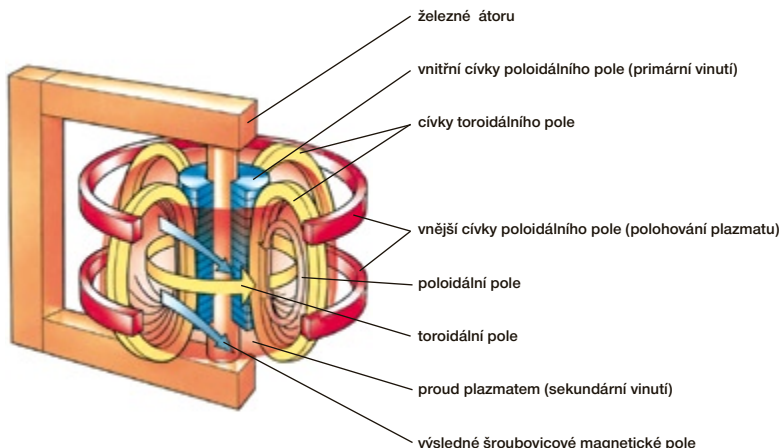
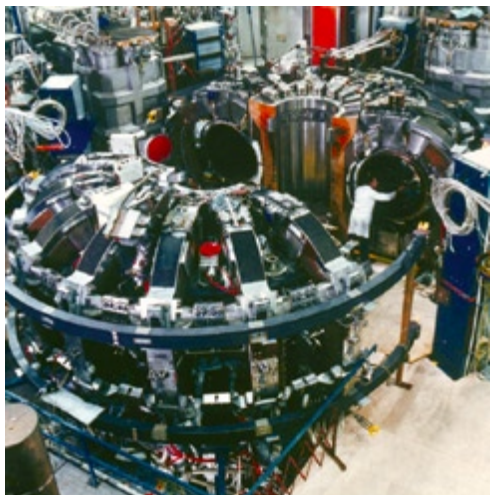


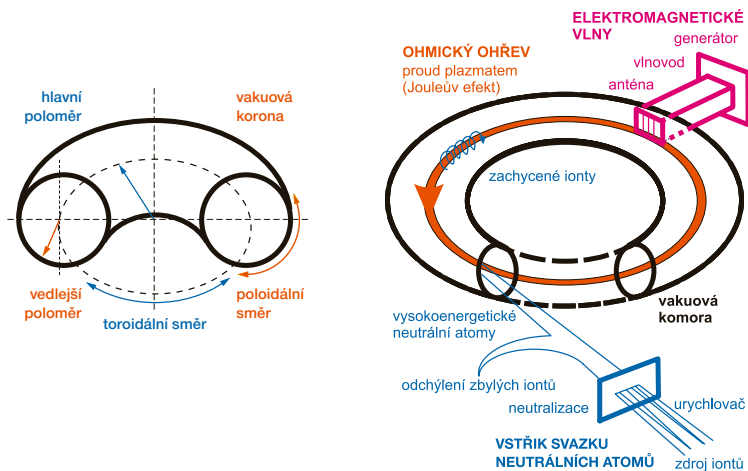
Schéma tokamaku



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

než 99 % plazmatu, musí sledovat silokřivky tohoto pole – pohybují se po magnetických površích 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 (tudiž i příkon do nich) jsou při generaci silných magnetických polí obrovské (např. JET potřebuje kvůli jejich chlazení malé chladicí věže, podobné elektrárenským). Reaktor proto použije supravodivé cívkami (slitiny Nb-Ti nebo Nb-Sn při teplotě 4,5 K = -268,6 °C), jejichž spotřeba elektrické energie je zanedbatelná.

Termojaderných teplot řádu stovek miliónů 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 setrvačnick 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 plazmatického provazce a I je protékající proud). Během jediné milisekundy se dosáhne teploty miliónů stupňů a zprvu jen slabě ionizovaný vodíkový plyn se změní v plně ionizované plaz-



Dva významné směry v komoře tokamaku: toroidální a poloidální

Tři metody vnějšího ohřevu plazmatu v tokamaku: základní ohmický a dodatečný s vysoko-frekvenčním elektromagnetickým polem, respektive s vstříkem svazku vysokoenergetických neutrálních atomů

ma 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 ohřivaném médiu (ohřev „na“ cyklotronní¹⁵ rezonanční frekvenci iontů v rozmezí 20–120 MHz a elektronů 70–200 GHz, nebo ohřev „na“ dolní hybridní¹⁶ frekvenci 1–10 GHz), jejichž obdoba se uplatňuje i v domácnostech v mikrovlnných troubách. Naprosto odlišným přístupem je vstřík malého množství 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 zapálením fúzních reakcí vystačí pouze se samoohřevem¹⁷. Stejně jako když zapalujeme táborový oheň. Nejprve škrtneme sirkou a později již dřevo hoří „samo“. Zapálení termojaderné reakce 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, definova-

15 Frekvence rotace nabitě částice kolem siločáry magnetického pole – viz Dodatek

16 Kombinace dvou charakteristických frekvencí plazmatu – viz Dodatek

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



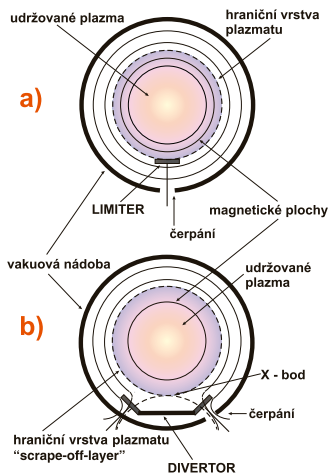
Vlnovod zavádějící vysokofrekvenční elektromagnetické pole pro dodatečný ohřev plazmatu do komory tokamaku v italském Frascati



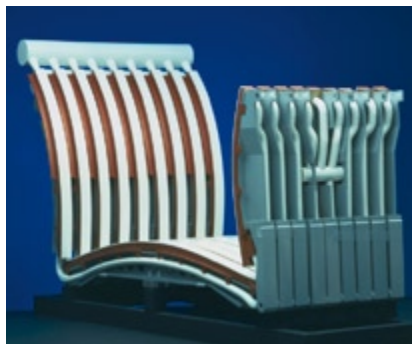
Zařízení pro vstřik svazku neutrálních atomů na tokamaku JET – na obrázku vpravo dole

ný 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 trvalého termojaderného „hoření“, by však měl dosáhnout až plánovaný tokamak ITER ($Q > 10$).

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



Průřez komorou tokamaku a) s limitem, b) s divtorem. Dva způsoby jak z plazmatu odvést nečistoty, zplodiny termojaderné reakce a nespálené palivo.



Model divertoru

ská 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. Uvažuje se o zajímavém efektu zvaném „bootstrap current – přezkový proud“, který probíhá automaticky díky proměnné hustotě plazmatu v určitém směru. Tento „automaticky generovaný“ proud v požadovaném – toroidálním – směru by mohl při vhodném režimu v budoucích reaktorech nést v tokamacích většinu toku 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 materiálovou překážkou (snášejí vysoké tepelné zatížení, např. molybden) – limitem, se touto otázkou příliš nezabývala. S prodloužováním délky výbojů, přibližováním se k termojaderným teplotám a při zvyšování síly magnetického pole bylo nutné modifikovat komoru (mírné vertikální protažení průřezu komory do tvaru písmene D) a vytvořit divertor (modifikaci základního toroidálního udržovacího magnetického pole odchyloující 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 mikronetěstnostmi, a stejně tak i heliový „popel“ či atomy nespáleného vodíkového paliva, které může být znovu

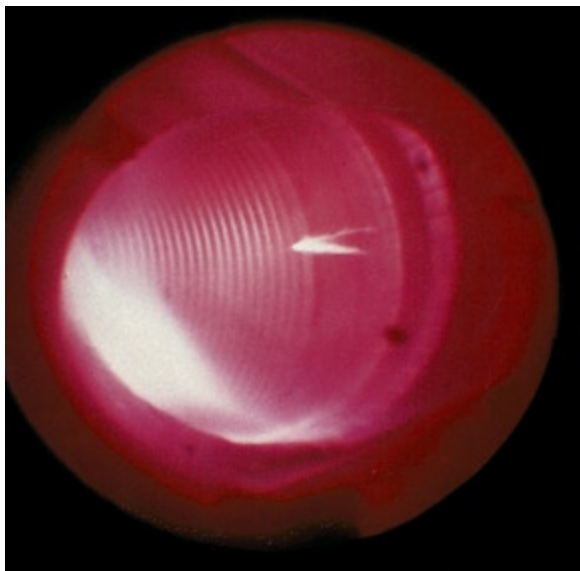


Toroidální limiter umožnil francouzskému supravodivému tokamaku Tore Supra odvod rekordních 1 GJ tepla v jednom výboji.

použito. 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 rozložil v toroidálním směru. Díky speciální technologii výroby umožnil prstencový limiter výbojový impuls plazmatu dlouhý 6:30 minut¹⁸ při tepelném zatížení limiteru výkonem 10 MWm^{-2} a odvodu celkové tepelné energie v rekordní výši 1000 MJ v jednom výstřelu.

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, brání silné magnetické pole. Pouze tabletky zmrazeného vodíku vstřelené do komory velmi vysokou rychlostí ($v \sim 10 \text{ kms}^{-1}$) 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 řádově zvyšují únik částic a energie na stěny komory, čímž nejen znesnadňují udr-

¹⁸ Prosinec 2003



Takto se doplňuje palivo do tokamaku. Zářící „kometa“ je zmražený vodík vstřelený do centra komory.

žení termojaderných podmínek v jejím centru, ale také tepelně zatěžují tzv. první (z pohledu od plazmatu) stěnu komory ($1-10 \text{ MWm}^{-2}$).

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 1981 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).

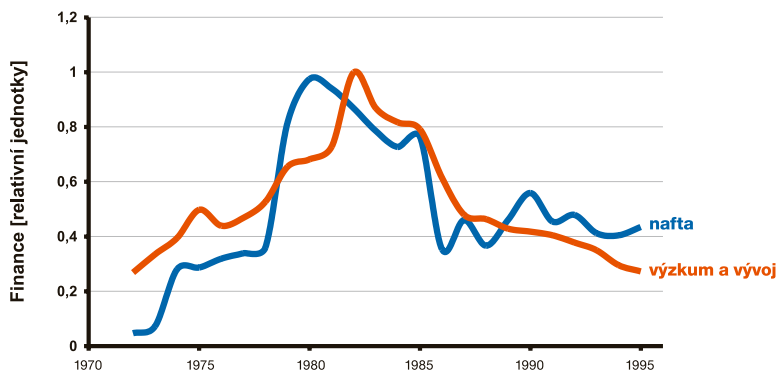
V roce 2001 byl dokončen revidovaný projekt tokamaku ITER s fúzním výkonem 500 až 700 MW, kde již byla většina výše zmíněných problémů úspěšně vyřešena. Pokud i experiment ITER potvrdí tyto optimistické vyhlídky, tokamaky se stanou prvními fúzními elektrárnami a energetický problém lidstva bude na tisíce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

Historie termojaderné fúze ve světě

Dějiny fúze charakterizuje pět obrazů:

1. Na počátku výzkumu byla armáda.
2. Vyčerpávající byl zápas s nestabilitami plazmatu.
3. Iniciátorem mezinárodní spolupráce byl třikrát po sobě bývalý SSSR.
4. Vývoj ekonomiky a výzkum fúze jsou v protifázi.
5. Evropa si udržuje náskok před USA, preferujícími v armádě využitelné laserové systémy před civilními magnetickými nádobami.

Slunce! Koule žhavého plazmatu. Pronikalo svými paprsky oparem přesličkových pralesů prvohorního devonu a bylo svědkem rodičího se života na Zemi, skrápělo potem záda otroků vršících egyptské pyramidy, zvěstovalo smutnou novinu císaři nedaleko belgického Waterloo. Stále stejné slunce shlíží na zmatky zmítanou současnost. Dříve bylo vysvětlení existence neuvěřitelně vytrvalého zdroje energie jednoduché: Bůh. Teprve 19. století hledalo exaktní odpověď na otázku po původu takřka nevyčerpitelného energetického zdroje. První teorie zahřívala vnitřek Slunce jeho smršťováním. Hermann von Helmholtz (1853) přisoudil zmenšujícímu se Slunci věk 20 miliard let, což bylo v příkrém rozporu s paleontologickými a geologickými nálezy, které počítaly s mnohem starší hvězdou. Teprve Albert Einstein (1905) objevem ekvivalence hmoty a energie ukázal cestu, po které se vydali svými hypotézami astronom Arthur Eddington (1920), R. Atkinson a Fritz G. Houtermans (1929) a výpočty podpořili Hans Bethe a Carl



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

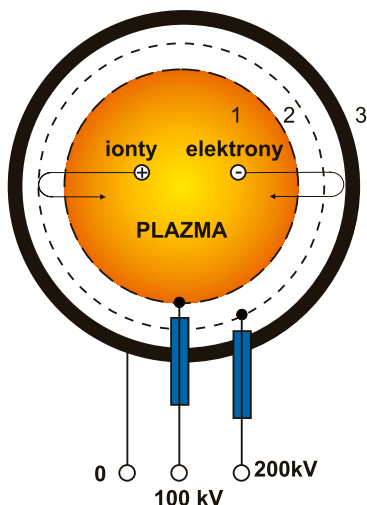
F. von Weizsäcker (1938): Slunce svoji energii získává termonukleárními reakcemi, při nichž se lehká jádra vodíku slučují na helium a uvolňuje se zářivá energie putující nekonečným vesmírem, až jen nepatrná část dorazí na Zemi, aby jí předala poselství života. Dlužno poznamenat, že „nepatrná“ část – za desetinnou tečkou následuje deset nul – představuje 180 miliard GW. Možnosti jak využít dopadající sluneční energii (ať už přímo, nebo akumulovanou ve fosilních palivech) jsou omezené. Bylo by možné vynechat strašlivou vesmírnou pustinu a přinutit Slunce zářit na Zemi? Myšlenka vyrobit pozemské Slunce pochází z prvních let po druhé světové válce. Nebyla to myšlenka ušlechtilá, neboť směřovala k zabíjení co



E. Rutherford a D. Crockcroft v roce 1934 v Cambridgeji uskutečnili poprvé jadernou syntézu v laboratoři. Pomocí urychlovače sloučili jádra deuteria. Na obrázku spolu s S. Waltonem (vpravo).



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



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.

největšího počtu lidí. Jaderná syntéza měla sloužit jako zdroj neutronů a ty posléze k výrobě náloží štěpných atomových pum.

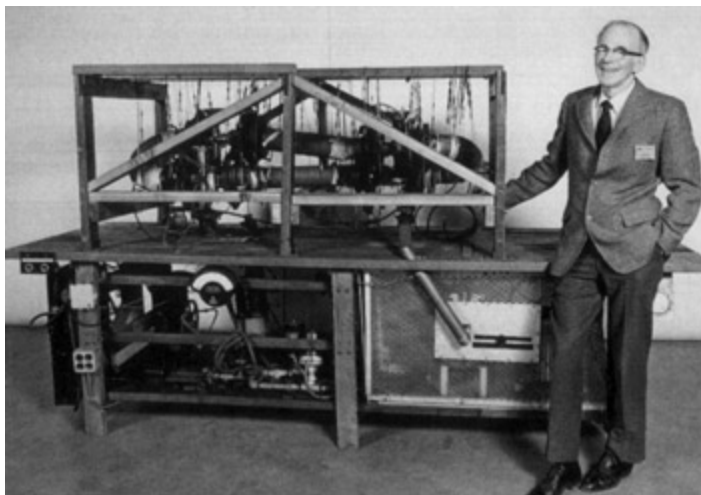
První spojení jader lehkých prvků se uskutečnilo již v roce 1934 a spoluautor Ernest Rutherford prohlásil, že ten, kdo bude chtít využít jadernou energii uvolněnou při syntéze průmyslovým způsobem, je nenapravitelný snílek. Skutečně, slučovat jádra pomocí urychlovače není z průmyslového hlediska perspektivní. Nikdy se neuvolní více energie, než je zapotřebí k uskutečnění reakce. Řešením je termojaderná syntéza. Nejrozšířenějším způsobem jak získat plazma – termojaderné médium – v pozemské laboratoři je výboj v plynu. První pokusy s vytvářením a ohřevem plazmatu využívaly silnoprůdobé výboje, jejichž vlastní magnetické pole stlačovalo plazmatický provazec a tím ho zahřívalo. Zprvu nadějný pinč-efekt se ukázal tak nestabilní, že teplota potřebná k zapálení termojaderné reakce nebyla dosažena. Zatím. Díky rozvoji impulsní techniky koncem minulého století slaví pinč návrat. Rozmanitou množinu způsobů na cestě za řízenou termojadernou syntézou lze rozdělit do dvou základních kategorií: Udržení magnetické a udržení inerciální (viz stejnojmennou kapitolu).

Od konce II. světové války do roku 1956 oddělovala vědce v bývalém SSSR a USA, resp. ve Spojeném království „železná opona“, která informační tok mezi oběma tábory prakticky zastavila. Po legendární přednášce otce sovětské atomové bomby I. V. Kurčatova ve Středisku atomového výzkumu v anglickém Harwelu roku 1956 se informační stěna začala bortit a definitivně padla na 2. mezinárodní konferenci o mírovém využití atomové energie v Ženevě v roce 1958. Ukázala se zajímavá skutečnost: navzdory téměř absolutní izolaci obou táborů dospěli vědci na západě

i východě prakticky ke stejným poznatkům. Není lepšího důkazu objektivitě vědeckého poznání. Byla-li západní hvězdou magnetická nádoba zvaná stelarátor, pak na východě vítězil tokamak. V březnu 1951 oznámil argentinský prezident Juan Perón úspěšné zapálení termojaderné reakce. Ovšem jedinou reakcí, která byla ve skutečnosti zapálena, byla reakce šéfů bývalého SSSR a USA. SSSR v květnu a USA v červnu podepsaly rozhodnutí, respektive smlouvu o výzkumu termojaderné reakce směřujícím k jejímu průmyslovému využití. Krušné období hledání a zápasu s nejrůznějšími nestabilitami termojaderného média – plazmatu – vyvrcholilo v roce 1968 na 3. mezinárodní konferenci o fyzice plazmatu a výzkumu řízené termojaderné reakce v Novosibirsku, kde se ukázaly výsledky tokamaků natolik přesvědčivé, že celá sedmdesátá léta byla ve znamení jejich razantního nástupu do celého světa.

Neméně zajímavý je příběh tokamaku samotného. V roce 1949 seržant Rudé armády O. A. Lavrentěv, sloužící na Sachalinu, navrhl v dopise nejprve Stalinovi a později ÚV KSSS konstrukci průmyslového termojaderného reaktoru. Otec sovětské vodíkové bomby A. D. Sacharov nad jeho dopisem nahradil Lavrentěvovu izolaci horkého plazmatu od stěn reaktoru elektrostatickým polem polem magnetickým. V tu chvíli byl „počat“ tokamak. Je opět paradoxem, že další rozvoj termojaderného bádání nestimulovaly jen jeho dobré výsledky, ale i něco zcela jiného – ropná krize v roce 1973. Dotace na výzkum jen v USA vzrostly během dvou let více než desetkrát. Důsledkem zvýšeného finančního toku byla stavba velkých tokamaků: TFTR (USA), JT-60 (Japonsko), T-15 v bývalém SSSR a především tokamaku JET v anglickém Culhamu a provozovaného EURATOM, později užívaného EFDA (European Fusion Development Agreement). První termojaderná reakce ve směsi 89 % D a 11 % T v roce 1991 na JET (1,7 MW), zopakovaná Američany na TFTR se směsí 50 % D – 50 % T (1993 – 6 MW, 1994 – 10,7 MW) a špičkový výkon 16 MW dosažený v roce 1997 na JET se směsí 50 % D – 50 % T potvrdily, že cesta je správná. Byl to opět bývalý SSSR, který ústy Jevgenije Velichova, budoucího ředitele Kurčatovova ústavu a později blízkého poradce generálního tajemníka M. Gorbačova, navrhl koncem sedmdesátých let zahájit studii mezinárodního tokamaku, který později dostal název INTOR (INternational TOKamak Reactor). Právě na INTOR se vědci a inženýři učili dlouhodobé a rozsáhlé spolupráci. V případě INTOR zůstalo jen u řady pracovních setkání a výzkumných zpráv, takže k výrobě žádné komponenty – natož ke stavbě zařízení – nedošlo.

SSSR potřeť. Ještě jako generální tajemník ÚV KSSS se Michail Gorbačov (1985) dohodl s francouzským prezidentem Françoisem Mitterandem a posléze i s prezidentem USA Ronaldem Reaganem na projektu ITER (původně International Thermonuclear Experimental Reactor). Přidalo se Japonsko, Evropská unie a později, v rámci evropského týmu, i Kanada. V roce 1998 zastihla Závěrečnou zprávu projektu ITER „nepříznivá“ politická situace. „Železná opona“ vzala dávno za své a demonstrace dobré vůle západu a východu ztratila smysl, stejně tak svět momentálně nepotřeboval



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

nový zdroj energie. Tok dotací vysychal a výsledkem byla redukce původních záměrů ITER a odstoupení USA od projektu. Současná neklidná doba opět „vlila krev do žil“ ambiciózního projektu. V roce 2003 se rozrostla „rodina“ ITER opět o USA, přibyla Čína a Korea.

ITER je druhý největší vědecko-technický projekt v dějinách lidstva po ISS (International Space Station – Mezinárodní kosmické stanici). Termojaderný výzkum je nejrozsáhlejší mezinárodní vědeckou spoluprací vůbec. Již v padesátých letech nebyla experimentální zařízení tokamak a stelarátor osamocena. Zkoušely se otevřené magnetické pasti, reverzní pinče (magnetické pole výbojového proudu spolu s vnějším magnetickým polem vytvoří uzavřené magnetické siločáry uvnitř výbojové komory – obrátí/reversuje směr vnějšího pole), elektromagnetická udržení. Žádný z těchto systémů nebyl z hlediska reaktoru absolutně neprůchodný, pouze ustoupil momentálně slibnějším směrům. Všechny tyto systémy měly své příznivce, kteří u svých miláčků zůstali i přes nepřítelů finančního počasí. Připravili tak intelektuální základnu pozdějšímu vzkříšení. Příkladem budiž stavba v současné době nejmohutnějšího stelarátoru na světě – Wendelstein W7-X v Greifswaldu. Díky mohutnému vývoji výpočetní techniky dokázali vědci odstranit zhoubné nestability bránící stelarátorům opustit život ve stínu tokamaků. 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 pouze v civilní oblasti upotřebitelné magnetické udržení zmíralo na úbytě. Ekonomické problémy výroby energie pomocí mikrovýbuchů jsou obrovské a neexistují žádné náznaky, že



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.

tato metoda nabízí snadnější cestu k reaktoru vyrábějícímu energii. Brzy po sestrojení prvního laseru navrhli N. G. Basov, laureát Nobelovy ceny, a O. M. Krochin laserovou termojadernou fúzi. Od prvního mnohsvazkového laserového systému, moskevského devíťsvazkového zařízení KALMAR, ke stavbě poslední generace laserových systémů, 256svazkového LMJ ve francouzském Le Barp a 192svazkového NIF v Livermoru, uplynulo více než čtvrt století naplněného hledáním vhodné konstrukce terčíku, tvaru laserového impulsu a zvyšování počtu svazků ozařujících symetricky kulový terčík. 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. V provozu jsou ale zatím jen 4 ze 192 svazků. Všechny svazky budou k dispozici až v roce 2008. Přestože jsou nové lasery NIF a LMJ financovány převážně z prostředků programů údržby arsenálu strategických jaderných zbraní, mají v programu i využití fúze pro výrobu energie a základní výzkum systémů s vysokou hustotou energie.

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

Historie termojaderné fúze v Česku

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 r. 1958. 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.

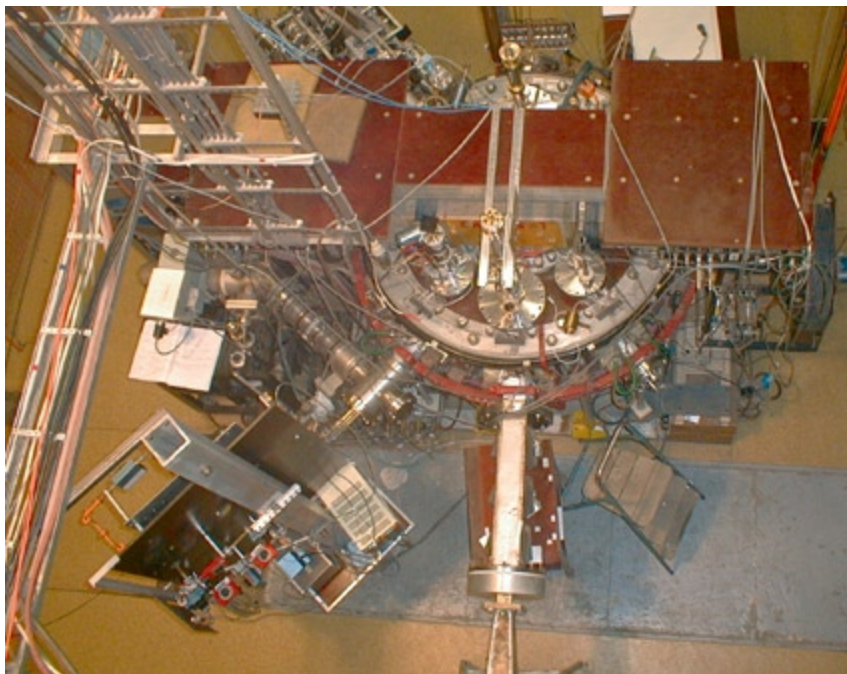
Několik počátečních let byla stále ještě hlavním vědeckým programem ústavu fyzika a technika kruhových urychlovačů částic, nicméně počínající studium vzájemného působení elektronů s vysokofrekvenčním polem, vyzařování relativistických elektronů a obecně vzájemného působení (interakce) vysokofrekvenčních 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 experimentem, 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 vysokofrekvenčními 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. Během tohoto výzkumu byla dosažena řada prioritních výsledků jako prokázání dominantní role vysokofrekvenčních polí nestabilit v okolí horní hybridní 18^{19} rezonance a vzniku virtuální²⁰ 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 impulsní techniky v ÚFP později i k několika významným technickým aplikacím, jako je např. realizace zařízení pro bezoperační odstraňování ledvinových kamenů – lithotryptor.

Druhý směr se zaměřil již od svého počátku na hledání způsobu buzení v plazmatu se šířících vhodných větví vysokofrekvenčních vln a především

¹⁹ Kombinace dvou charakteristických frekvencí plazmatu – viz Dodatek

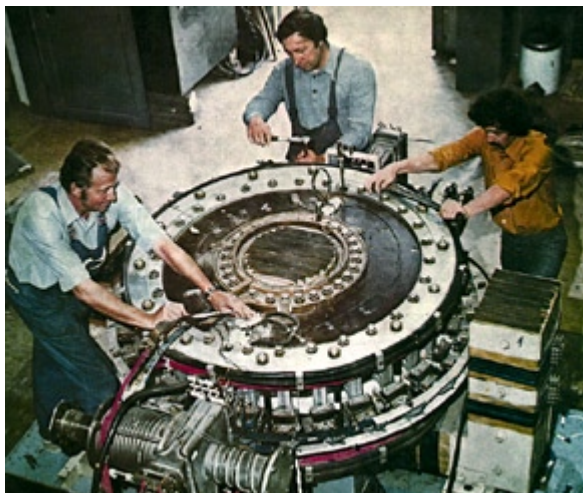
²⁰ Zdánlivé



Tokamak CASTOR v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. Česká republika je jedinou z deseti přístupujících zemí k Evropské unii v roce 2004, která zařízení tokamak vlastní.

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 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 teorie předpovězená transformace a následná úplná absorpce vysokofrekvenčních vln v plazmatu nacházejícím se v magnetickém poli. Na toroidálním zařízení INTERMEZZO byl pak navíc v polovině sedmdesátých let proveden vůbec první experimentální důkaz v ÚFP vypracované teorie generace elektrického proudu vysokofrekvenční vlnou. A protože existence toroidálního elektrického proudu je podstatou magnetického udržení plazmatu v tokamacích, bylo na základě tehdejší spolupráce mezi ÚFP a Kurčatovovým ústavem v Moskvě předáno v roce 1977 do Prahy zařízení TM-1 MH²¹. Na jednom z prvních tokamaků na světě se měla v Praze studovat neinduktivní generace proudu v toroidální geometrii. Kromě teoretického

21 Původní název TM-1 VČ (vysokočastotnýj), nový název TM-1 MH (magnetic heating)



Ruský tokamak TM-1 MH věnovaný moskevským Ústavem atomové energie I. V. Kurčatova pražskému Ústavu fyziky plazmatu ČSAV byl přestavěn a v roce 1984 spuštěn pod názvem CASTOR (Czechoslovak Academy of Sciences Torus).

studia s mezinárodně uznávanými výsledky bylo možné v ÚFP začít – po více než 15 letech výzkumu – i s experimentálním studiem interakce vln s tentokrát 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 nese název CASTOR (Czechoslovak Academy of Sciences Torus). 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. Ceněna je přitom především flexibilita zařízení CASTOR, jak při testování některých diagnostik, tak i při vlastním fyzikálním studiu turbulentních procesů vedoucích k anomálním ztrátám energie plazmatu tokamaků (hlavního důvodu tak často vytýkané časové i finanční náročnosti termojaderného výzkumu) a v neposlední řadě i potenciál jednoho z mála takovýchto zařízení v Evropě pro výchovu studentů a doktorandů.

Asociační dohoda Association EURATOM IPP.CR otevřela České republice zajímavou oblast materiálového výzkumu – materiály plodícího obalu, respektive první stěny budoucího termojaderného reaktoru. Tematikou se začaly zabývat Ústav fyziky plazmatu AV ČR, Ústav jaderné fyziky AV ČR a Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s. 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 kompozitu wolfram-měď. V Ústavu jaderného výzkumu Řež, a. s., se studovalo vysokoteplotní chování tekutého Pb-17% Li coby možné náplně plodícího obalu a jeho interakce s konstrukčními materiály či tvorba tritia. 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 neodýmový laser s energií 60 J a délkou impulsu 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 impulsu 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 impulsu 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 Velká termojaderná zařízení.

Velká termojaderná zařízení

■ TOKAMAKY

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

PŘEHLED NEJVĚTŠÍCH SVĚTOVÝCH A EVROPSKÝCH TOKAMAKŮ

název	stát	R_0 [m]	a [m]	B_t [T]	I [MA]	Q
ITER	Mezinárodní	6,2	2	5,3	17	10
JET	EU	2,96	1,25	4	7	0,65
JT-60U	Japonsko	3,4	1	4,5	6	
TFTR	USA	2,62	0,97	5,9	3	0,25
DIII-D	USA	1,67	0,67	2,1	3	
MAST	Spoj. království	0,85	0,65	0,5	2	
ASDEX U	Německo	1,65	0,8	3,9	2	
ToreSupra	Francie	2,25	0,7	4,5	2	
T-15	Rusko	2,43	0,7	3,5	2	
KSTAR	Korea	1,8	0,5	3,5	2	
Alcator C-mod	USA	0,67	0,22	8,07	1,5	
HT-7U	Čína	1,75	0,4	4	1,5	
TCV	Švýcarsko	0,88	0,24/1,39	1,43	1,2	
FT-U	Itálie	0,92	0,31	7,5	1,2	
NSTX	USA	0,85	0,67	0,6	1	
TEXTOR	Německo	1,75	0,5	2,8	0,8	
Alcator C	USA	0,64	0,16	13	0,8	
TRIAM-1M	Japonsko	0,8	0,12/0,18	8	0,42	
SST-1	Indie	1,1	0,2	3	0,22	
HL-1	Čína	1,02	0,2	5	0,135	
T-10	Rusko	1,5	0,39	5	0,45	
CASTOR	Česko	0,4	0,1	1,5	0,025	

R_0 = hlavní poloměr, a = vedlejší poloměr, B_t = magnetické pole, I = elektrický proud, Q = poměr fúzního výkonu k výkonu dodatečného ohřevu (u ITER uvedena projektová hodnota, u JET a TFTR dosažená rekordní hodnota)



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

JET (JOINT EUROPEAN TORUS)

Největším a nejvýznamnějším tokamakem na světě je bezesporu anglický JET nacházející se 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 5 MA proudu plazmatem, 1988 – 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 ($\approx 1,7$ MW při teplotě paliva 200 000 000 °C!). Následovala odstávka a změny spodní části komory zahrnující instalaci divertoru Mark (řídí množství energie v plazmatu a odstraňuje nečistoty). Takto upravený JET pokoušel 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 plazmatu $Q = 0,65$. Podařilo se také stabilně produkovat 4 MW fúzního výkonu po dobu 4 sekund. O rok později JET demonstroval použitelnost technologie dálkově ovládané výměny divertoru (s použitím robotické paže).

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.

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 ³
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	25 MW
Dodatečný ohřev – iontová cyklotronní rezonance	32 MW
Dodatečný ohřev – dolní hybrid	12 MW

JT-60U (JAPAN TOKAMAK UPGRADE)

JT-60U, který se nachází ve středisku JAERI (Japanese Atomic Energy Research Institute) ve městě Naka, je největším japonským tokamakem. Jedná se o velmi moderní, plně vybavený divertorový tokamak, jehož posláním je optimalizovat podmínky výboje pro nepřetržitý provoz fúzního reaktoru. Drží rekord v „ekvivalentním Q^{22} (Q odpovídající směsi 50 % deuteria – 50 % tritia ve stejném experimentu) $\approx 1,25$, tj. spolu s JET dosahuje ekvivalentní breakeven. V roce 2003 jsme získali informaci, že tokamaku JT-60U byla přiznána priorita v japonském národním fúzním programu a bude rekonstruován na supravodivý tokamak JT-60SC, a to i v případě, že Japonsko by hostilo mezinárodní tokamak ITER.

Hlavní poloměr	3,4 m
Vedlejší poloměr	0,9 m
Magnetické pole	4 T
Proud plazmatem	3 MA
Doba výboje	15 s
Objem plazmatu	60 m ³
Dodatečný ohřev – svazek rychlých neutrálních částic	40 MW
Dodatečný ohřev – elektronová cyklotronní rezonance	3 MW
Dodatečný ohřev – dolní hybrid	8 MW

TFTR (TOKAMAK FUSION TEST REACTOR)

Největší tokamak USA se nacházel v Princetonu a byl v provozu v letech 1982–1997. 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

22 Pokud by tokamak JT-60U zaměnil reakci D-D za reakci D-T, dosáhl by (možná) 200× většího fúzního výkonu, tj. $Q = 1,25$.

předpokládá v budoucích fúzních elektrárnách. TFTR dosáhl centrální teploty 510 000 000 °C a koncem roku 1997 okolo 10,7 MW fúzního výkonu.

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

DIII-D (DOUBLET III-DIVERTOR)

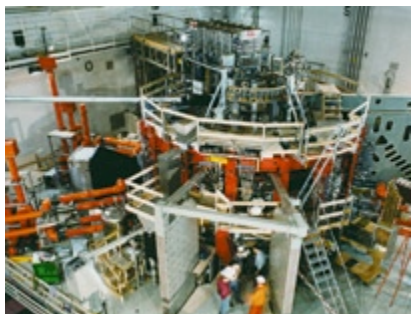
DIII-D je vlajkovou lodí současného fúzního programu Spojených států amerických. Laboratoř General Atomics v San Diegu v USA ve spolupráci s Japonskem spustila v roce 1986 tokamak s originálním řešením divertoru (odchylovače). Divertorové sběrné desky (terče) jsou v tzv. otevřeném divertoru umístěny ve stejném prostoru jako plazma, což podstatně zmenšilo nároky na objem zabraný divertorem.

Hlavní poloměr	1,67 m
Vedlejší poloměr	0,67 m
Magnetické pole	2,1 T
Proud plazmatem	3 MA
Doba výboje	5 až 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

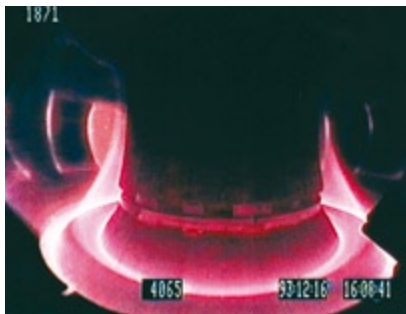
ASDEX UPGRADE

(AXIALLY SYMMETRIC DIVERTOR EXPERIMENT)

ASDEX Upgrade je největším německým tokamakem 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 je zaměřen na optimalizaci výbojových režimů (bez nestabilit a s omezením turbulencí), dále pak studuje působení horkého plazmatu na stěny výbojové komory a vlastnosti divertorového plazmatu, kde chladnější plyn opouští tokamakovou komoru. Na původním tokamaku ASDEX byl objeven v roce 1981 režim výboje se zlepšeným udržení částic, tzv. H-mod. V době vydání publikace se pokrývaly stěny tokamaku wolframem jako jedním z možných prvků pro první (ze strany plazmatu) stěnu reaktoru ITER.



Celkový pohled na tokamak ASDEX Upgrade
– Garching u Mnichova



Výboj v německém tokamaku 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 ³
Hustota plazmatu	2 × 10 ²⁰ m ⁻³
Teplota	150 000 000 °C

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 nejtěsnější konstrukci osy tokamaku, obklopenou téměř kulovým plazmatem.

Hlavní poloměr	0,85 m
Vedlejší poloměr	0,65 m
Magnetické pole	0,5 T
Proud plazmatem	2 MA
Doba výboje (projektovaná)	5 s
Dodatečný ohřev	6,5 MW

TORE SUPRA

Tore Supra je francouzský tokamak se supravodivými cívkami (slitina Nb-Ti v mědi chlazená supratekutým heliem o teplotě $-271,45\text{ }^{\circ}\text{C}$, procházející proud 1400 A , průměr cívek $2,4\text{ m}$), který se nachází v komplexu Cadarache nedaleko od Marseille. 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 $6\text{ minut }30\text{ sekund}$ – bezkonkurenčního výsledku při stamiliónové teplotě. Tomu odpovídala rekordní tepelná energie 1000 MJ odvedená ze stěny reaktoru během jednoho výboje.

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.

KSTAR (KOREAN SUPERCONDUCTING TOKAMAK REACTOR)

V době vydání publikace se supravodivý tokamak KSTAR stavěl. Tento projekt se těší velkému uznání mezi odborníky, kteří netrpělivě čekají na jeho spuštění, naplánované na rok 2005.

Supravodivý tokamak KSTAR byl navržen ke studiu moderních tokamakových režimů při dlouhých pulsech. Výzkum bude zaměřen na rozšíření databáze použitelné při návrhu průmyslového fúzního reaktoru. Korejský národní fúzní program, v rámci kterého se tokamak staví, podporuje řada laboratoří zejména ve Spojených státech.

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

HT-7U

V roce 1978 byl založen Ústav fyziky plazmatu Čínské akademie věd (ASIPP – Academia Sinica, Institute of Plasma Physics). Nejprve byl postaven malý tokamak CT-6 a pak rychle následovaly tokamaky HT-6B a HT-6M. Supravodivý program zahájil ASIPP v roce 1990. Prvním úspěchem bylo zařízení HT-7, což byla vylepšená verze ruského supravodivého tokamaku T-7 (první supravodivý tokamak světa spuštěný v roce 1979). Mimochodem, tokamak T-7 byl na konci osmdesátých let nabídnut pražskému Ústavu fyziky plazmatu, ale pro naši malou zemi byl příliš velkým soustem. HT-7 zahájil provoz v roce 1994 v městě Hefei. Dalším z řady čínských

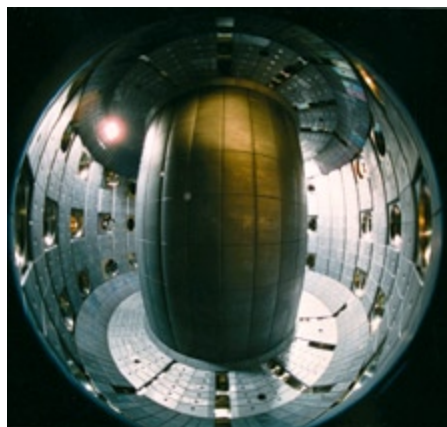
tokamaků pro studium plazmatu nekruhového průřezu bude tokamak HT-7U vybavený divertorem. Tokamak HT-7U je středně velké, avšak dynamické experimentální zařízení stojící v čele expandujícího Čínského národního fúzního programu. Hlavním kapitálem Číny jsou lidé – jejich hlavní fúzní středisko mimo jiné vychovává i neuvěřitelných 300 studentů.

Hlavní poloměr	1,75 m
Vedlejší poloměr	0,4 m
Magnetické pole	3,5/2. fáze: 4 T
Proud plazmatem	1/2. fáze: 1,2 MA
Dodatečný ohřev – svazek rychlých neutrálních částic	2. fáze: 4,8 MW
Dodatečný ohřev – iontová cyklotronní rezonance	3 MW
Dodatečný ohřev – elektronová cyklotronní rezonance	0,5 MW
Dodatečný ohřev – rezonance na dolním hybridu	3,5 MW

TCV (TOKAMAK À CONFIGURATION VARIABLE)

TCV tokamak, zprovozněný v roce 1992, nacházející se ve švýcarském Lausanne 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. V posledních letech se rovněž studuje neinduktivní generace proudu plazmatem pomocí směřovaného elektromagnetického vlnění a vysokofrekvenčního ohřevu (obojí na elektronové cyklotronní rezonanci)²³.

²³ Neznámé pojmy jsou vysvětleny v kapitole Princip tokamaku, 23/Poměr svislého a vodorovného vedlejšího poloměru v torech s nekruhovým poloidálním průřezem



Vakuová komora švýcarského tokamaku TCV

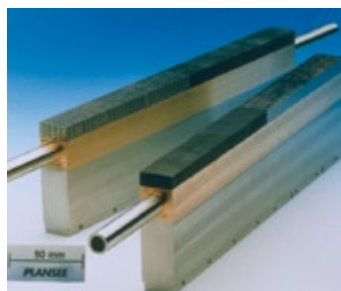
Hlavní poloměr		0,88 m
Vedlejší poloměr – horizontální		0,24 m
Vedlejší poloměr – vertikální		1,39 m
Magnetické pole		1,43 T
Proud plazmatem		1,2 MA
Maximální protažení plazmatu ²⁴ (světový rekord)		2,9
Dodatečný ohřev na elektronové cyklotronní frekvenci	na 83 GHz	3 MW
	na 118 GHz	1,5 MW
Doba výboje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

24 Poměr svislého a vodorovného vedlejšího poloměru v torech s nekruhovým poloidálním průřezem

TEXTOR (TOKAMAK EXPERIMENT FOR TECHNOLOGY ORIENTED RESEARCH)

TEXTOR je další německý tokamak, nacházející se tentokrát 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.

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



Části toroidálního limiteru „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 MWm⁻²



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

TRIAM-1M

V menším japonském supravodivém tokamaku se použil na vinutí toroidálních cívek vodič Nb3Sn. Supravodivé cívky jsou chráněny před zářením štítem chlazeným tekutým dusíkem. Tokamak je zaměřený na studium dlouho trvajícího plazmatu a vyznamenal se neuvěřitelně velkými dobami výbojů – přes 3 hodiny (poloidální pole je formováno proudem vlečeným dolní hybridní²⁵ frekvencí – spoluautoři teorie tohoto jevu pocházejí z pražského Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, kde byla také experimentálně jejich teorie v roce 1976 potvrzena).

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

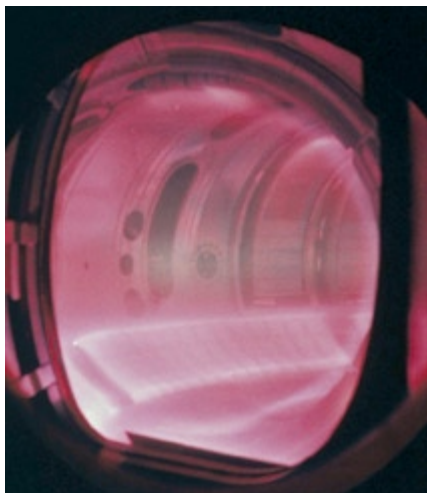
SST-1

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

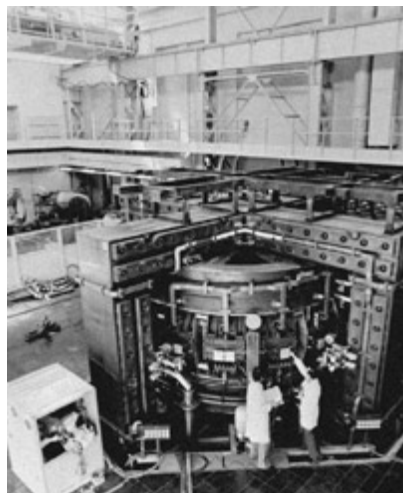
Jde o další supravodivý tokamak ve stavbě, který se má stát prioritou, stejně jako v Číně, rychle se rozvíjejícího indického národního fúzního programu. Navazuje na menší tokamak Aditya. Indové si zakládají na tom, že mají vše své vlastní, původní konstrukce. Supravodivé cívky budou vytvářet jak toroidální,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

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

²⁵ Viz Dodatek



Vývoj v tokamaku TEXTOR žhívá toroidální limiter



Tokamak T-10 je největší tokamak provozovaný v Ruské federativní republice

T-10

V tokamakovém boomu kolem roku 1975 bylo v moskevském Ústavu atomové fyziky I. V. Kurčatova 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. Byl zprovozněn v roce 1975 a jako jedno z mála zařízení počátků zlaté éry tokamaků T-10 stále funguje.

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 darovala myšlenku tokamaků. Větší a supravodivý tokamak T-15 se totiž nikdy nedomohl stálého provozu vzhledem k jeho finanční náročnosti a technickým problémům. Existuje projekt přestavby T-15 na moderní divertorový supravodivý tokamak. Na přestavbu nejsou ale peníze.

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

CASTOR (CZECH ACADEMY OF SCIENCES TORUS)

Jediným tokamakem, o který se rozšíří jejich seznam Evropské unie v roce 2004, bude pražský tokamak CASTOR. A to se k unii připojuje devět dalších zemí! CASTOR zcela určitě nepatří 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. Je ideovým nositelem programu asociace České republiky k EURATOM, která se nazývá Association EURATOM IPP.CR a zajišťuje 75 % všech úkolů programu. Je odrazovým můstkem pro řadu mladých odborníků z České republiky, kteří ze „základního tábora“ v Praze odjíždějí zdolávat světové vrcholy – ať již to je švýcarský TCV, francouzský Tore Supra a především světová jednička – tokamak JET v anglickém Culhamu. Potěšitelné je, že základní tábor je mezinárodní. V roce 2003 v táboře vztyčili vlajku studenti z Maďarska.

A tak jeden z nejstarších tokamaků na světě, původně zapůjčený Praze moskevským Ústavem atomové fyziky I. V. Kurčatovova v roce 1977, ještě dnes slouží ke studiu okrajového plazmatu a neinduktivního vytváření (vlečení) proudu plazmatem.

Hlavní poloměr	0,4 m
Vedlejší poloměr	0,1 m
Magnetické pole	1,5 T
Proud plazmatem	25 kA
Vysokofrekvenční vlečení proudu	20 kW
Doba výboje	50 ms
Hustota plazmatu	$3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
Teplota elektronů	200 eV ²⁶
Teplota iontů	100 eV

26 Energie 1 eV odpovídá teplotě 11 600 °C.

■ PINČE SE ZPĚTNÝM POLEM

RFX (REVERSED FIELD EXPERIMENT)

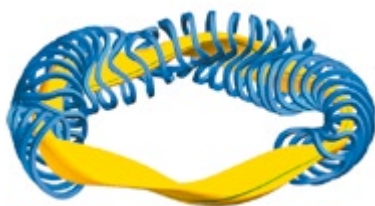
Na italském pinči RFX v Padově, který byl v provozu od roku 1992, se zkoumala fyzika spontánní reorganizace magnetického pole, velmi zajímavé vlastnosti právě tohoto druhu zařízení.

Kvůli závadě na kondenzátorové baterii bylo zařízení v roce 1999 prakticky zničeno požárem. Naštěstí byl RFX dobře pojištěn, takže by se měl uvést znovu do provozu kolem roku 2004, a to v dokonalejší verzi.

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



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



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

■ STELARÁTORY

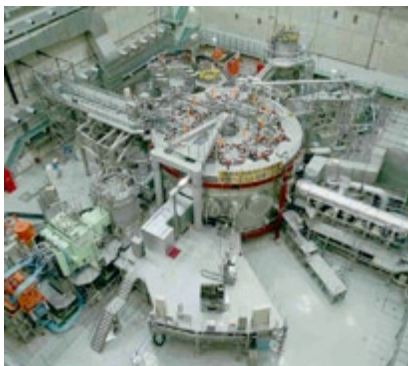
LHD (LARGE HELICAL DEVICE)

Největší stelarátor světa – japonský supravodivý LHD – se nachází ve středisku NIFS v Toki. Byl zprovozněn v roce 1998.

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



Řídicí místnost japonského stellarátoru LHD v Toki připomíná kontrolní stanoviště NASA



V současné době největší stellarátor na světě – japonský LHD

W7-AS (WENDELSTEIN 7-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 Wendestein W7-X.

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

W7-X (WENDELSTEIN 7-X)

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 hansovním městečku Greifswald, jako by předznamenával to, co návštěvník uvidí uvnitř. Podivně zkroucené cívky jediného supra-vodivého vinutí budou mít na svědomí kompletní střižné magnetické pole, které tradiční stellarátory vytvářely dvěma sadami cívek. Modulární systém cívek byl navržen díky vyspělé výpočetní technice, která v době zrození 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 m³ u W7-X odpovídá zhruba třetině objemu největšího tokamaku na světě – JET s 80m³. Předpokládaná teplota 80 miliónů °C ještě termojadernou reakci nezapálí, ale poskytne data pro odhad parametrů stellarátoru s termojaderným ohněm. Pro W7-X se vyvíjí osm až deset gyrotronů (zdrojů



Maketa komory budoucího největšího stelarátoru na světě – Wendelstein W7-X



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

vysokofrekvenčního pole), které na frekvenci 140 GHz poskytnou každý výkon 1 MW. Dalším zdrojem energie budou svazky rychlých neutrálních částic. První plazma by se mělo objevit nejdříve v roce 2010 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, státy Bavorsko a Meklenbursko. 45 % celkových nákladů uhradí Evropská unie.

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

TJ-II

Španělský stelarátor TJ-II byl zprovozněn v roce 1998.

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

■ LASERY

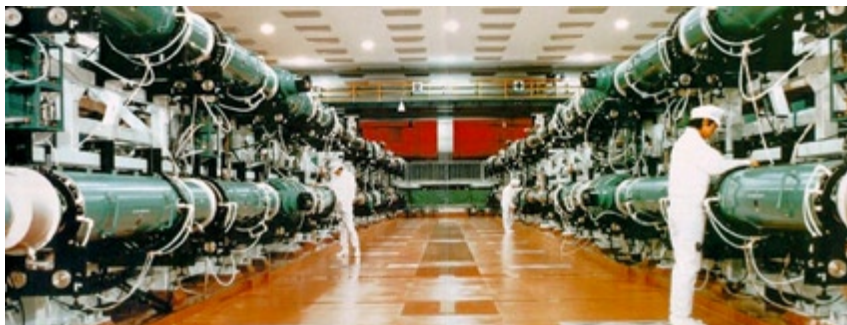
PŘEHLED NEJVĚTŠÍCH SVĚTOVÝCH LASEROVÝCH SYSTÉMŮ K ROKU 2003

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

NIF (NATIONAL IGNITION FACILITY)

Laser NIF je 192svazkový neodýmový laser. Svazky jsou sdruženy do čtveřic, každá čtveřice je společně konvertována do třetí harmonické frekvence²⁷ a fokusována na terč. Díky použití čtyřprůchodových výkonových zesilovačů má laser umístěný na ploše 200 × 130 m² (přibližně stejná jako u laseru NOVA) dosáhnout asi 30× větší energie, tj. 1,8 kJ na třetí harmonické frekvenci Nd-laseru. Laserový systém má proměnnou délku impulsu v rozsahu 1–20 ns s možností tvarování časového průběhu. V polovině roku 2003 vystřelila první čtveřice svazků na terč umístěný v hliníkové sférické komoře o průměru 10 m. Všechny laserové svazky by měly být k dispozici v roce 2008. Projektovaného zisku Q > 10 (poměr uvolněné energie termonukleárních reakcí k energii laserových svazků dopadajících do terčové komory) má dosáhnout NIF v nepřímo hnané fúzi kolem roku 2010. Celkové náklady přesáhnou 2 miliardy dolarů. Plánovaný výzkum bude zaměřen jak na aplikace v oblasti jaderných zbraní, tak i na inerciální fúzi a fyziku systémů s vysokou hustotou energie.

27 Základní frekvence je třikrát zvětšena



Laserový systém GEKKO XII v japonské Ósace

LMJ (LASER MÈGAJOULE)

36 km od letiště Gironde-Bordeaux leží městečko Le Barp, kde bude v roce 2006 dokončen neodymový LMJ (Laser Mègajoule) s úctyhodnými 256 svazky. 4000 m² plochy zrcadel bude umístěno v hale 300 × 100 m² a 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, což při délce pulsu 15 ns odpovídá výkonu 120 TW. Terčíková komora bude mít průměr 12 m. Francouzský vojenský rozpočet zaplatí za obdobu amerického NIF 1,5 miliardy US \$. Stavět začala CEA/CESTA (Atomic Energy Commission) v roce 1999, na rok 2006 je naplánován první experiment s energií 600 kJ, v roce 2010 výstřel s energií 2 MJ a konečně v roce 2012 zapálení D-T paliva.

GEKKO

Rekordním laserem v produkci neutronů (10¹³ za výstřel v roce 1980) je japonský systém GEKKO XII s 10 kJ v 2. harmonické frekvenci (dvojnásobná frekvence vzhledem k základní), délkou impulsu 2 ns a s 12 svazky fungující v Ústavu laserového inženýrství Ósacké univerzity. GeKKo dokáže stlačit terčík D-T směsi na tisícinásobek hustoty pevné fáze (200 gcm⁻³). Japoncům se vyplatila pečlivost při nastavování homogenity ozáření, kde dosahují mimořádných výsledků. Jeden ze svazků laseru byl v minulých letech uzpůsoben generaci velmi krátkého laserového pulsu o výkonu až 1 PW (500 J v impulsu dlouhém 0,5 ps). Díky synchronizaci s ostatními pulsy o nanosekundové délce lze zkoumat „rychlé zapálení“ inerciální fúze. Japonci jednoznačně míří k využití laserového plazmatu jako zdroje energie.



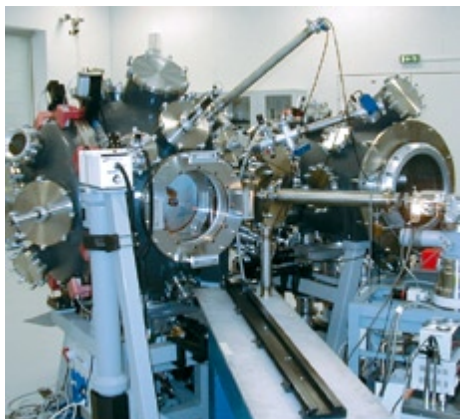
NOVA byl nejmohutnější laserový systém na světě – Lawrence Livermore National Laboratory, USA

NOVA

Jeden z nejvýkonnějších laserů světa – americká NOVA – se nacházel ve středisku LLNL v Livermoru v Kalifornii na ploše zvrácené rozměrů fotbalového hřiště. Jednalo se o neodymový laser s impulsním výkonem 120 TW na vlnové délce 350 nm (3. harmonická frekvence Nd-laseru) s 10 svazky. Doba impulsu byla 2,5 ns. V současné době je NOVA již rozebrána.

ISKRA-5

Jaderné středisko Ruské federace Všeruského vědeckého výzkumného ústavu experimentální fyziky (RFNC VNIIEF) se nachází 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 – do roku 1992 nebylo uvedeno na žádné ruské mapě – označené jako Arzamas 16. 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 číslo 16! Kolem torza kláštera vyrostlo město se 100 000 obyvateli. Jen v laserové části výzkumného ústavu pracovalo 25 000 lidí. VNIIEF je znám svým pionýrským výzkumem přímé přeměny energie štěpné jaderné reakce na světlo. Od roku 1989 VNIIEF provozuje největší evropský laserový systém Iskra-5, což je jodový fotodisociační laser s 12 svazky a celkovou energií 15 kJ. Iskra-5 dosahuje výkonu 100 TW. Zdrojové kondenzátory se nabíjejí na 67 MJ (což odpovídá účinnosti systému 0,022 %). Vlnová délka laserového paprsku je 1,315 μm . Laserový systém je zaměřen na výzkum fúze.



Interakční komory laserového systému PALS ve společné laboratoři ÚFP a FZÚ AV ČR

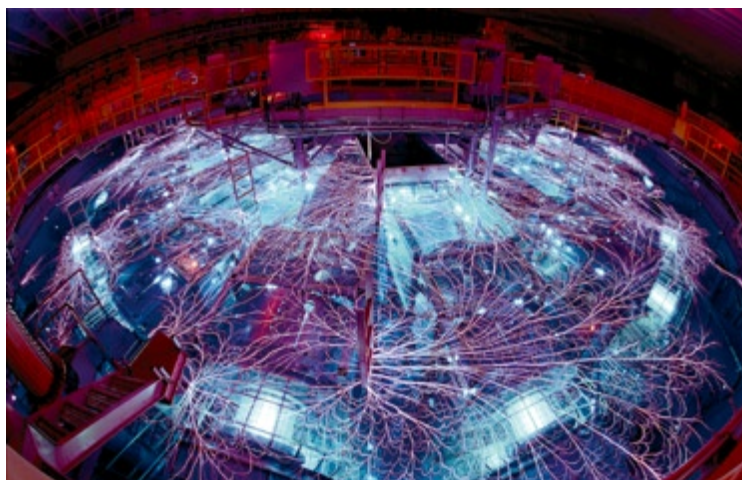
PALS (PRAGUE ASTERIX LASER SYSTEM)

V roce 1996 Ústav kvantové optiky Maxe Plancka v Garchingu u Mnichova nabídl za symbolickou 1 DM laserový systém Asterix IV skupině odborníků z Fyzikálního ústavu AV ČR v Praze. Ti se spojili s podobnými nadšenci v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR a v roce 1999 stála v pražském areálu Akademie věd ČR zcela nová, speciálně vybavená budova připravená přijmout jeden z největších laserových systémů v Evropě. První výstřel systému pojmenovaného PALS má datum 2000. Zajímavé je, že slovo PALS má hned několik významů: anglická zkratka Pražského laserového systému Asterix, vyslovena „pals“ znamená anglicky „impuls“, ale také „kumpáni, chlapíci“. K laserovému systému je připojen systém terčíkových komor navržený českými a francouzskými inženýry a vyrobený v Brně. Badatelské centrum PALS je uživatelská laboratoř pracující na základě objednaných projektů, schválených mezinárodní komisí. V roce 2003 se PALS stal členem konsorcia 17 evropských národních pracovišť Laserlab-Europe, které bylo založeno s cílem koordinovat a propojit činnost národních laserových laboratoří.

■ SVAZKY LEHKÝCH IONTŮ/Z-PINČE

PBFA II (PARTICLE BEAM FUSION ACCELERATOR) – Z-MACHINE

Největší ICF (Inertial Confinement Fusion – fúze s inerciálním udržením) dodavatel energie (driver), 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 TWcm⁻². V roce 1996 byla zahájena přestavba zařízení PBFA II na z-pinč nazvaný Z-machine. To proto, že proudový impuls byl k terčíku přiváděn svislým směrem, což fyzikové a matematici nazývají souřadnice 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 impulsu 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. Připravuje se výkonnější zařízení X-1, které by mělo začít fungovat v roce 2007. V roce 2010 by mělo zapálit termojadernou fúzi. Dosáhl-li Z-machine teploty 1,8 miliónu stupňů, pak k termojaderné fúzi za podmínek Z-machine je třeba teploty 3 miliónů stupňů, které má nové zařízení v plánu. Výzkum fúze se tak vrací ke svým prvopočátkům, kdy se koncem čtyřicátých let pinče zdály nejschůdnějším kandidátem řízené termojaderné fúze. Experimenty s extrémně rychlým nárůstem proudu vrátily pinče znovu do hry.



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

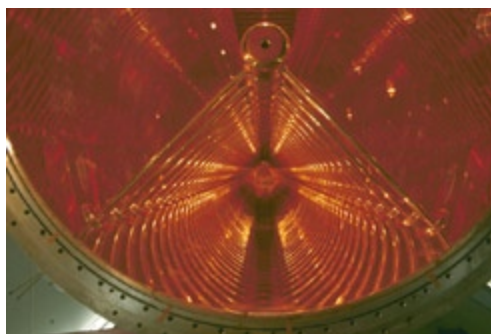
■ SVAZKY TĚŽKÝCH IONTŮ

IRE (INTEGRATED RESEARCH EXPERIMENT)

Virtual National Laboratory navrhla vícekanálové experimentální zařízení používající k ohřevu terčíku svazek cesiových iontů. Proud 100 A ponese energii nejméně 100 MeV, s plošnou hustotou výkonu 3 TWcm^{-2} při celkové energii převyšující 1 kJ.

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 IRE je završením menších experimentů studujících dílčí problémy fyziky intenzivních svazků. Před zahájením stavby IRE v roce 2009 by měly proběhnout experimenty na jednomodulovém zařízení Integrated Beam Experiment (IBX).



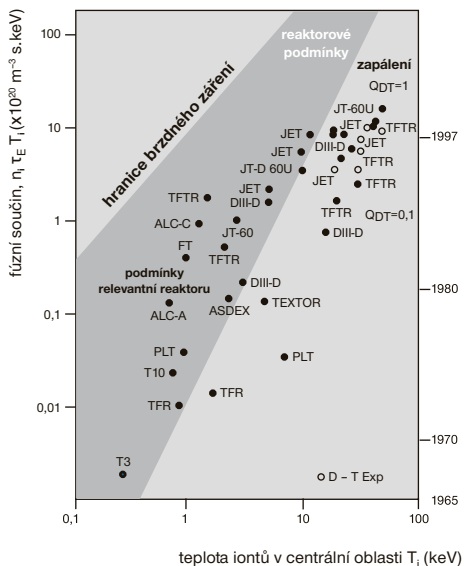
Detail urychlovače těžkých iontů zařízení GSI v Darmstadtu

ITER

Krok, či spíše by se hodilo říci skok, od největších tokamaků, jaké kdy byly postaveny – JET, TFTR, JT-60U a dalších –, k termojadernému reaktoru dodávajícímu elektrickou energii do komerční sítě, je stále tak velký, že neznáme rozumnou předpověď jeho parametrů – předpověď, podle které by se na základě výsledků získaných na stávajících experimentálních zařízeních daly spočítat parametry reaktoru, v němž by termojaderná reakce byla nejen zapálena, ale hořela by sama. To znamená nalézt vhodné materiály pro „první“ stěnu (stěna nejbližší k plazmatu), koncept plodičích obalu – blanketu (části reaktoru obklopující plazma, přeměňující pohybovou energii produktů termojaderné reakce – neutronů – na teplo a vyrábějící z lithia palivo tritium) a v neposlední řadě naučit se řídit hoření plazmatu. Lze dokázat, že doba udržení energie je úměrná druhé mocnině rozměru dosáhneme požadovaného Q (Q = termojaderný výkon/vnější příkon plazmatu). Samostatně hořící termojaderná reakce by měla mít $Q = \infty$, 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 – původně zkratka slov International Thermonuclear Experimental Reactor – Mezinárodní termonukleární experimentální reaktor – CESTA.

V polovině osmdesátých let navrhl generální tajemník KSSS Michail Gorbačov francouzskému prezidentovi Françoisi Mitterrandovi projekt mezinárodního termojaderného reaktoru. Gorbačovův poradce Jevgenij Velichov byl totiž ředitelem Kurčatovova ústavu v Moskvě. Mitterrand jako správný Francouz vítal každou aktivitu, která by posunula Francii před zámořskou velmoc – Spojené státy. Nicméně o málo později v Ženevě (1985) sdělil stejný návrh Gorbačov americkému prezidentovi Ronaldu Reaganovi. V té Ženevě, kde se před 27 lety konala památná konference, která zpřístupnila výsledky do té doby přísně utajeného termojaderného výzkumu na obou stranách „železné opony“. Smlouvu o projektu ITER (latinsky *cesta*), pod patronací Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA) se sídlem ve Vídni, spolu podepsaly v roce 1987 USA, SSSR, Japonsko a Evropská unie. Termojaderný ITER by měl prokázat vědeckou, inženýrskou a do jisté míry i ekonomickou schůdnost termojaderné elektrárny. Jako o potenciálním místě stavby se mluvílo 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 první mezinárodní projekt toho druhu. V roce 1977 již zmíněný Jevgenij Velichov inicioval mezinárodní projekt později



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 τ_E a teploty iontů T_i – měřítka pokroku výzkumu fúze – každého 1,8 roku. Na mapě „fúzní součinn vs teplota iontů“ jsou zakresleny výsledky dosažené na jednotlivých experimentálních zařízeních.

nazvaný INTOR (INTERNATIONAL TOKAMAK REACTOR). 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 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 jakési konference. 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 m³, fúzní výkon 1500 MW, $Q = \infty$ a současně i náklady ve výši 6 miliard dolarů.

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 a Japonsko. Byla sestavena Speciální skupina odborníků (Special Working Group), která měla za úkol posoudit,



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

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. Speciální 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 2 m nižšího zařízení, s objemem plazmatu 837 m³, proudem plazmatu 15 MA, třetinovým výkonem 500 MW a $Q > 10$. Nicméně i zmenšený ITER by měl být v lineárních rozměrech 2× 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 zapálení a udržování reakce, a bude tedy možné studovat prakticky již veškeré procesy, které budou probíhat v pozdějším skutečném reaktoru. Stežejní bude testování technologií, které jsou nezbytné pro reaktor termojaderné elektrárny, včetně generace tritia v lithiovém obalu (blanketu) reaktoru.

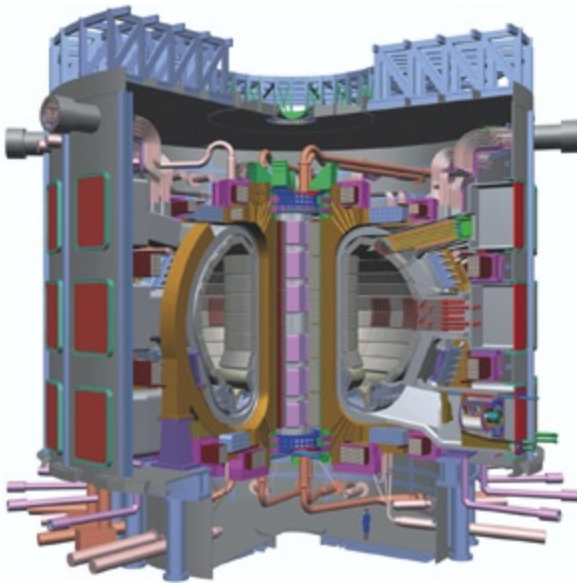


Schéma projektu Mezinárodního termonukleárního experimentálního reaktoru ITER

Řada etap inženýrských aktivit zahrnuje zkoušky důležitých komponent reaktoru: vakuové nádoby, supravodivých cívek, dálkově řízeného ovládání výměny divertoru či zdrojů rychlých neutrálních částic a elektromagnetických vln pro dodatečný ohřev plazmatu. V Garchingu u Mnichova se testovaly součásti uvnitř komory a v japonské Naka součásti vně komory. Zatímco v roce 1998, v době dokončené první varianty projektu ITER, nikdo neprojevil vážný zájem postavit na svém území neuvěřitelně složitě a nákladné monstrum, čím blíže dokončení se nyní jeví projektové práce, tím více roste zájem o získání „stavebního povolení“. První se přihlásila Kanada, brzy následovalo Japonsko a pak hned 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 vrátili Spojené státy americké. V červnu byla oficiálně přijata Jižní Korea. V roce 2004 projevila zájem o připojení k projektu Indie.

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

Je smutnou skutečností, že další vývoj ambiciózního vědecko-technického projektu ITER nezáleží na jeho autorech, ale je v rukou politiků. Spor o místo stavby mezi Evropskou unií a Japonskem, to je mezi jihofrancouzským Střediskem pro výzkum atomové energie (CEA) Cadarache poblíž Marseille a severojaponským rybářským městečkem Rokkasho se vleče více jak tři roky. Zatímco Cadarache podporuje Čína a Rusko, Rokkasho našlo zastánce v Koreji a USA. Neprošel návrh otce myšlenky projektu ITER J. Velichova rozdělit ITER mezi dva kohouty na reaktor a výpočetní centrum. Kompenzace „odstupujícímu“ kandidátu nabízené v podstatě oběma stranami – úhrada nákladů nad dohodnutou hranici, početnější vědecký tým či exklusivní zakázky pro firmy soupeře – se mívají účinkem. V listopadu 2004 se Evropská unie rozhodla pro samostatnou cestu, nicméně stále doufá, že se pro Cadarache podaří získat i protivníkovy hlasy: Japonska, Koreje a USA. Evropská unie chce začít stavět v Cadarache do konce roku 2005 ať už s Japonskem nebo bez Japonska. Bude-li známé místo stavby, založí se ITER legal entity – právnická osoba, která se bude starat o ITER od „narození“ do demontáže.

V roce 2006 mají být zahájeny stavební práce, v roce 2014 budou následovat první experimenty. Prvních deset let ve fázi základního provozu bude věnováno fyzikálním problémům: vyladění reaktoru na deuteriových experimentech, zapálení reakce, přechod do stacionárního (trvajících asi hodinu) provozu a ověření koncepce první stěny a plodícího obalu reaktoru. Druhá fáze, trvající rovněž deset let, bude věnována technologii: testování součástí a materiálu, zejména konceptu lithiového obalu (blanketu) plodícího tritium. Přibližně v roce 2034 se ITER rozebere. 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.

Zapálení prvního plazmatu v ITER je jakýmsi startem letadla, které poletí „samo“, zatímco dnešní tokamaky připomínají spíše jen bezmotorové větrone, co bez pomoci neodstartují. JET má malý dodatečný motor (tritium), ale jen na výzkum vlivu pohonu na pilotáž.

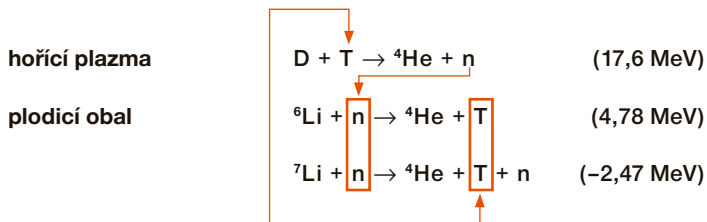
Je dobré si připomenout, že první letadlo bratří Wrightů sice nemělo eleganci letu dnešních strojů – ovšem bez něho by Concorde neodstartoval.

Termojaderná technologie

Zatímco fyzikové netrpělivě čekají na první výsledky z připravovaného mezinárodního experimentálního termojaderného reaktoru ITER, který bude dvakrát větší než současný nejmohutnější tokamak na světě JET, před inženýry a techniky stojí výzva, s 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 vnitřkem reaktoru, má k dispozici mnohem větší kontaktní plochu než fúzní reaktor, ve kterém bude moci chladicí médium využít pouze stěny reaktoru. Vnitřní objem fúzního reaktoru je totiž zaplněn plazmatem. Zkrátka a dobře, doposud při krátkých pulsech bylo třeba chránit plazma před materiálem stěn, nyní, 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:

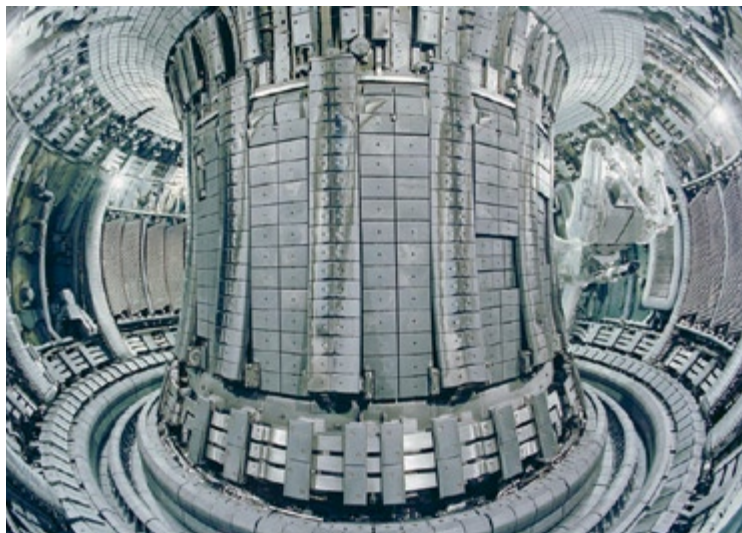


celkově (plazma a obal) deuterium + lithium → helium + energie

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



Celkový pohled do komory největšího tokamaku na světě s mechanickou paží v pozadí. JET provozuje UKAEA a užívá EFDA v anglickém Culhamu.

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 zuřít plazmová bouře o teplotě stovek miliónů stupňů Celsia, za stěnou reaktoru bude teplota blízká absolutní nule. Jen při teplotě tekutého helia 4,5 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. Připravuje se rozměrné zařízení IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility) v ceně 0,5 miliardy eur, které bude konstrukční materiály testovat neutronovým zářením intenzity očekávané v průmyslovém reaktoru. 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, a navíc s odlišným energetickým spektrem. 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,



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



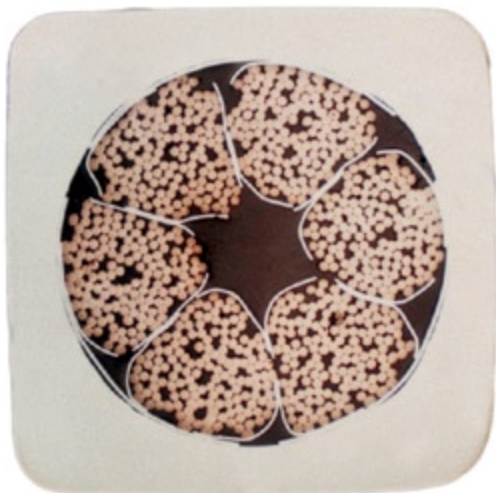
Test třídimenzionálního prototypu supravodivé cívky pro stelarátor W7-X ve Forschungszentrum Karlsruhe. Na obrázku je cívka před zapojením vsunována do kryostatu, který ji ochladí na $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$.

jako budoucí ITER. V měřítku 1 : 1 byl odzkoušen segment vakuové komory podle původního projektu z roku 1998 (tedy větší než jeho redukováná varianta 2001), dále modely supravodivých toroidálních cívek: cívky toroidálního pole v měřítku 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 snahy umístit 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 – podílí 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 plazmatického 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, což je mimochodem jeden z kandidátů na místo stavby ITER. Francouzský prstencový limiter se skládá z 576 chlazených prvků připomínajících „prsty“. Tepelnou odolnost „prstů“ 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 – sváření, pájení, hipování (HIP – Hot Isostatic Pressing – vysokotlaké lisování za tepla), difúzní spojování, plazmové stříkání apod. Odvádění teplo bude v budoucnu použito 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 tohoto prvku, který se jako nečistota může objevit v plazmatu. Při růstu energie plazmatu rostla i tepelná zátěž grafitových desek limiterů a grafit s relativně velkým koeficientem rozprašování se uvolňoval do plazmatu úměrně velikosti zaváděného dodatečného výkonu. Výboj brzy skončil radičním zhroutením – „uhlíkovou katastrofou“ – vyzářené energie bylo více než energie dodávané.

Až v letech 1989–90 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



Průřez supravodičem

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. ITER použije jak wolfram, tak uhlíkový kompozit i berylium.

Velmi namáhaná součást uvnitř vakuové komory je divertor. Divertor na kontaktní – terčové – stěny používá uhlíkové destičky a velmi nadějný se v tomto směru jeví málo erodující wolfram, který navíc neabsorbuje tritium v takovém množství jako uhlík.

Nádoba reaktoru musí zajistit vysoké vakuum, proto je zde důležitá pevnost a možnost svaření rozměrné konstrukce, aniž by došlo k nepřípustné 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 pro dodávku a ohřev paliva, instalaci diagnostiky a výměnu vnitřních součástí. Už dnes je ITER inspirací pro řadu jiných odvětví: tepelně namáhaný materiál pro kosmický průmysl, anemometry pro větrné turbíny, zobrazování pomocí magnetické rezonance v lékařství, iontová implantace v polovodičovém průmyslu, magnety pro CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire – Evropské sdružení pro jaderný výzkum), brzdy pro letadla a vlaky, sterilizace plazmatem, ale i software pro předpověď kolapsu energetické sítě.

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



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

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.

Světově prioritní teoretické a experimentální výsledky generování elektrického proudu vysokofrekvenční vlnou v ÚFP sedmdesátých let a vynikající výsledky sovětského experimentálního 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 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“. 75 % programu asociace zajišťuje ÚFP. Na zbylých 25 % se podílejí další vědecké ústavy a vysoké školy: Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s., Ústav fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského AV ČR, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, Ústav jaderné fyziky AV ČR, Matematicko-fyzikální fakulta UK a Ústav aplikované mechaniky Brno, a. s.

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 CASTOR, nebo přednášet v nejrůznějších vysokoškolských či postgraduálních kursech. Příkladem programové flexibility Prahy budiž Experimentální letní škola na tokamaku CASTOR, jejíž první ročník pro maďarské studenty proběhl v roce 2003. Naproti tomu zasedání Poradního výboru Association EURATOM IPP.CR lze nazvat tradičním. V roce 2004 se při neformální oponentuře činnosti asociace sešli přední evropští termojaderní odborníci již po sedmé. Rozsáhla je spolupráce oddělení tokamak s ostatními asociacemi: CEA (Francie), ENEA (Itálie), ERM/KMS, ULB, SCK/CEN (Belgie), CIEMAT (Španěl-



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.

sko), 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 navázala obnovená spolupráce s Kurčatovovým ústavem a Ústavem vysokých hustot energií v Moskvě, Ioffeho Fyzikálně technickým ústavem v Petrohradě, Budkerovým Ústavem jaderné fyziky v ruském Novosibirsku, Fyzikálním ústavem v gruzínském Tbilisi a konečně s univerzitou ve Lvově na Ukrajině. Jedním z projektů 6. rámcového programu, na kterém se rovněž podílí Ústav fyziky plazmatu AV ČR, je INTAS nastartovaný v roce 2003, kterým Evropská unie podporuje vědu ve státech bývalého Sovětského svazu.

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



Mapa asociací EUROATOM

Technologická témata týkající se neutronové zátěže konstrukčních materiálů zpracovávají vedle Ústavu fyziky plazmatu AV ČR ústav v Řeži: Ústav jaderné fyziky AV ČR a Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s.

Členové oddělení tokamak Ústavu fyziky plazmatu AV ČR pravidelně pracují na JET. Spoluautor této publikace byl od března 2003 delegován do kanceláře ředitele EFDA JET, kde se stará o styk s veřejností a obsah internetových stránek.

Česká republika jako jediná země z desítky nových členů Evropské unie rozšíří její tokamakový seznam. Do evropského termojaderného programu je zapojena studiem fyziky vysokoteplotního plazmatu i výzkumem termojaderné technologie.



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

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 perspektivu 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 a v prototypu průmyslového reaktoru PROTO. DEMO má jako první vyrábět elektrickou energii v kontinuálním provozu, PROTO se má zaměřit na standardizaci a konkurenceschopnost termojaderné elektrárny. Podle některých koncepcí by se měly oba projekty realizovat zároveň, případně sloučit do jediné stavby. Těžiště dalšího vývoje přejde ze základního výzkumu do průmyslové energetiky.

Průmyslové využití termojaderné energie by mohlo obohatit už životy našich nejmenších. 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 diferenciace zdrojů doufáme, že se lidé zároveň dopracují k širokému 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 elektrolyzou. 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 řeše-



Cadarache – místo pro ITER?

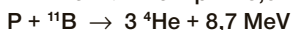
ním. Vědci a konstruktéři proto nezapomínají na alternativní technická uspořádání, jako jsou stellarátory, lineární magnetické pasti nebo inerciální udržení, a nepřestávají hledat nové koncepce.

Pokroky termojaderné fúze ostře sledují i konstruktéři kosmických plavidel. Například NASA za tímto účelem buduje vlastní experimenty studující jak udržení, tak tok horkého plazmatu tryskami. Opravdu těžko si lze totiž představit, že by lidé dolétli dále než k Marsu bez použití termojaderného pohonu, klasické palivo zabírá příliš mnoho místa.

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



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



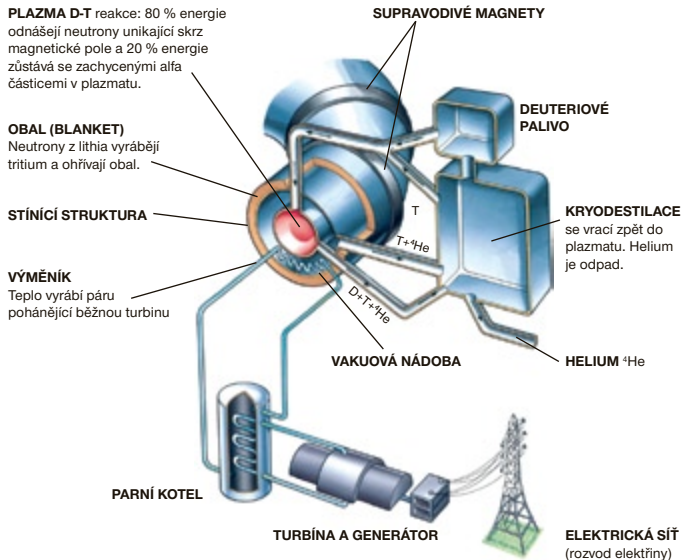


Schéma termojaderné elektrárny

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

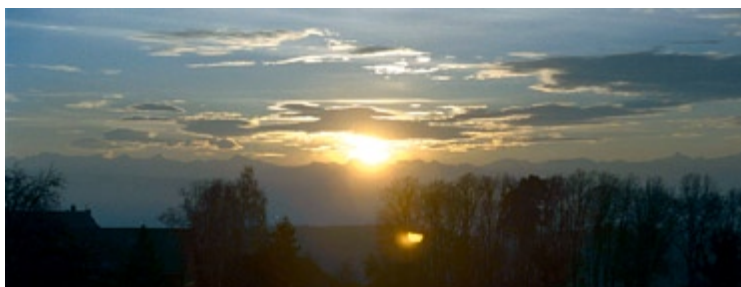
Zvláštní zmínka patří metodám jaderné fúze za studena. Snad každý by chtěl, aby byl fúzní reaktor malý a jednoduchý, aby se obešel bez stamilionových teplot. Jedinou jistou cestou je podle našich znalostí použití mezoatomů. Pokud se totiž nahradí elektron ve vodíkovém atomu mnohem těžší částicí zvanou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

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

Šťěstí přeje připraveným.

Doslov

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



Slunce zapadá – termojaderná energie vychází...

Fúze na internetu

DŮLEŽITÉ ADRESY

European Commission DG XII, Výzkum fúze (asociace k EURATOM)

	http://europa.eu.int/comm/research/energy/fu/fu_en.html
EFDA	http://www.efda.org
JET	http://www.jet.efda.org
ITER	http://www.iter.org

TOKAMAKY (EU = Evropská unie)

ASDEX-U ^(EU)	http://www.ipp.mpg.de/eng/pr/forschung/asdex/pr_for_asdex.html
TEXTOR ^(EU)	http://www.fz-juelich.de/ipp/textor_en
TCV ^(EU)	http://crppwww.epfl.ch/tcv
Tore Supra ^(EU)	http://www.fusion-magnetique.cea.fr
CASTOR ^(EU)	http://www.ipp.cas.cz/www/index.htm?page=tokamak/index.htm
MAST ^(EU)	http://www.fusion.org.uk/framepage.php?content http://www.fusion.org.uk/mast/main.html
Compass-D ^(EU)	http://www.fusion.org.uk/framepage.php?content http://www.fusion.org.uk/culham/compass.htm
START ^(EU)	http://www.fusion.org.uk/culham/start.htm
FTU ^(EU)	http://www.frascati.enea.it/FTU
ISTTOK ^(EU)	http://www.cnf.ist.utl.pt
TFTR	http://www.pppl.gov/projects/pages/tftr.html
JT-60	http://www-jt60.naka.jaeri.go.jp
NSTX	http://www.pppl.gov/projects/pages/nstx.html
KSTAR	http://www.knfp.net/Project_comm/introduction/P_introduction.html#intro3
Alcator-C	http://www.psfc.mit.edu/cmod
DIII-D	http://fusion.gat.com/diii-d http://fusioned.gat.com/webstuff/DIIID.html
SST-1	http://www.plasma.ernet.in/aboutsst1.html
T-10	http://www.kiae.ru/eng/str/inf/usnsi.htm#t10

PINĚ SE ZPĚTNÝM POLEM (EU = Evropská unie)

RFX ^(EU)	http://www.igi.pd.cnr.it/index.php
MST	http://sprott.physics.wisc.edu/mst.htm

STELARÁTORY (EU = Evropská unie)

Wendel 7-AS ^(EU)	http://www.ipp.mpg.de/eng/pr/forschung/w7as/pr_for_w7as.html
Wendel 7-X ^(EU)	http://www.ipp.mpg.de/eng/pr/forschung/w7as/pr_for_w7as.html
TJ-II ^(EU)	http://www.fusion.ciemat.es/fusion/TJII/TJII.html
LHD	http://www.lhd.nifs.ac.jp

Z-PINČE

Z <http://zpinch.sandia.gov>

SWAZKY TĚŽKÝCH IONTŮ

IRE <http://hilf.lbl.gov/>

LASERY

NIF <http://www.llnl.gov/nif/nif.html>

Mégajoule <http://www.cea.fr>

GEKKO XII <http://www.ile.osaka-u.ac.jp/index.html>

ISKRA-5 <http://www.vniief.ru>

NOVA <http://www.llnl.gov>

PALS <http://www.pals.cas.cz>

DALŠÍ ADRESY

Weizmann Inst. of Sci. <http://plasma-gate.weizmann.ac.il>

IEA <http://www.iea.org>

Dodatek

VYSVĚTLIVKY ZKRATEK

2XIIB	zrcadlové zařízení v Livermoru, produkující poprvé vysokoenergetické, husté a stabilní plazma
AEC	Atomic Energy Commission: komise odpovědná za výzkum fúze v USA (od 1974 ERDA, od 1977 DOE)
Alfa	replika toroidálního pinče ZETA (Harwell, Spojené království) postavená v Leningradě (bývalé SSSR)
ASDEX	Axially Symmetric Divertor Experiment: německý tokamak
ASIPP	Academia Sinica, Institute of Plasma Physics: čínský ústav
AV ČR	Akademie věd České republiky
CAPEX	Capillary Experiment: rentgenový laser v ÚFP AV ČR
CASTOR	Czech Academy of Sciences Torus: tokamak v ÚFP AV ČR
CEA	Le Commissariat a l'Energie Atomique: francouzská asociace EURATOM
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire: Evropské sdružení pro jaderný výzkum
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energeticas, Medioambientales y Tecnologicas: španělská asociace EURATOM
CLEO	Stelarátor v Culhamu. Přestaven na tokamak poprvé použil k ohřevu plazmatu svazek neutrálních částic.
Compass D	malý tokamak v Culhamu, Anglie
CRPP	Centre de Recherches en Physique des Plasmas: Centrum výzkumu fyziky plazmatu
ČSAV	Československá akademie věd: po roce 1992 Akademie věd ČR
DEMO	demonstrační termojaderný reaktor
DOE	Department of Energy – Ministerstvo pro energii USA – následník ERDA a ještě dříve AEC
D-T reakce	syntéza deuteria a tritia
D-D reakce	syntéza deuteria a deuteria
ECRH	Electron Cyclotron Resonance Heating – metoda ohřevu plazmatu používající mikrovln o frekvenci rotace elektronů v udržujícím magnetickém poli
EDA	Engineering Design Activities: etapa projektu ITER
EFDA	European Fusion Development Agreement: Evropská dohoda o rozvoji fúze
ELMAN	elektromagnetická nádoba v ÚFP ČSAV
ENEA	Ente per le Nuove tecnologie, l'Energie e l'Ambiente: italská asociace EURATOM
EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
ERDA	Energy Research and Development Agency – americká agentura odpovědná za výzkum fúze v letech 1974 až 1977, později nahrazena DOE.
EURATOM	jedna ze tří evropských komunit splynuvší s Evropskou unií – odpovědná, kromě jiného, za výzkum fúze v Evropě
EURATOM IPP.CR	asociace České republiky k EURATOM
FDR	Final Design Report: etapa projektu ITER
FESAC	Fusion Energy Science Advisory Committee
FIRE	Fusion Ignition Research Experiment – US návrh experimentu „next step“ (další krok). Projekt byl zastaven v roce 2004.
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe: asociace EURATOM v Karlsruhe

HAS	The Hungarian Academy of Sciences: maďarská asociace EURATOM
HIF VNL	Heavy Ion Fusion—Virtual National Laboratory: „dálkové“ spojení laboratoří: LBNL, LLNL a PPPL
HIP	Hot Isostatic Pressing: lisování za tepla
IAEA	International Atomic Energy Agency: Mezinárodní agentura pro atomovou energii při Spojených národech, Vídeň
IBX	Integrated Beam Experiment: zařízení inerciální fúze se svazkem těžkých iontů
ICF	Inertial Confinement Fusion: inerciální udržení
ICRH	Ion Cyclotron Resonance Heating: metoda ohřevu plazmatu používající mikrovln o frekvenci rotace iontů v udržujícím magnetickém poli
IEA	International Energy Agency: Paříž
IFMIF	International Fusion Material Irradiation Facility: testovací zařízení pro ozařování materiálů neutrony
INTAS	Mezinárodní organizace Evropské unie podporující vědecký potenciál států bývalého Sovětského svazu
INTOR	International Tokamak Reactor: Mezinárodní tokamak – reaktor
ILE	Institute for Laser Engineering, Japonsko
IPP	Institute of Plasma Physics: Ústav fyziky plazmatu
IRE	Integrated Research Experiment: zařízení inerciální fúze se svazkem těžkých iontů
IST	Centro de Fúse Nuclear: portugalská asociace EURATOM
ITER	původně International Thermonuclear Experimental Reactor: Mezinárodní termonukleární experimentální reaktor a nyní CESTA
ITER – CDA	Conceptual Design Activity: první etapa projektu ITER započatá v roce 1988
ITER – EDA	Engineering Design Activity: etapa projektu ITER zahrnující výrobu modelů 7 uzlových komponent ITER započatá v roce 1992
JAERI	Japanese Atomic Energy Research Institute
JET	Joint European Torus: Spojený evropský torus (největší světový tokamak)
JT-60U	Japan Tokamak
LFT	Large Tokamak Facilities: Sdružení tokamaků JET, JT-60U, TFTR
LHCD	Lower Hybrid Current Drive – způsob neinduktivního vybuzení proudu v toroidálním plazmatu pomocí mikrovlnného záření na dolně-hybridní rezonanční frekvenci
LHD	Large Helical Device: Velké helikální zařízení (stelarátor, Japonsko)
LIPAN	Laboratorija Izmeritel'nykh Priborov Akademii Nauk: Laboratoř měřících přístrojů Akademie věd, Moskva
LLE	Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, USA
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory, USA
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory, USA
MAST	Mega-Amp Spherical Tokamak: sférický tokamak, Anglie
MCF	Magnetic Confinement Fusion: magnetické udržení
MIT	Massachusetts Institute of Technology, jedna z předních vysokých škol USA
MTR	Magnetnýj tĕrmojadĕrnyj reaktor: magnetický termojaderný reaktor
NASA	National Aeronautics and Space Administration: Národní letecká a kosmická organizace, USA
NBI	Neutral Beam Injection: vstřik svazku neutrálních atomů
NIF	National Ignition Facility: národní zařízení (laserový systém) se zapálením (fúze), LLNL, USA
NIFS	National Institute for Fusion Science, Japonsko

NRL	National Research Laboratory, USA
OAW	Österreichische Akademie der Wissenschaften: rakouská asociace EURATOM
OGRA	Odin GRAM neutronov v sutki: Denně jeden gram neutronů – jedna z prvních lineárních magnetických pastí v Kurčatově ústavu, Moskva, bývalé SSSR
PALS	Prague Asterix Laser System: laserový systém v ÚFP a FZÚ AV ČR
PBFA	Particle Beam Fusion Accelerator: Urychlovač svazku částic pro fúzi (svazek lehkých iontů), USA
PFW	Primary First Wall: první stěna (z pohledu plazmatu) reaktoru
PLT	Princeton Large Torus – experimentální zařízení, které první dosáhlo termojaderných teplot (obdobu sovětského tokamaku T-10)
PPPL	Princeton Plasma Physics Laboratory, USA
REBEX	Relativistic Electron Beam Experiment: experiment s relativistickým elektronovým svazkem, ÚFP AV ČR
RFNC VNIIEF	Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics (Vserusskij naučnyj issledovatel'skij institut eksperimentalnoj fyziky)
RFX	Reversed Field Experiment: Zařízení s „obráceným“ magnetickým polem, Itálie
SSSR	Svaz sovětských socialistických republik
Stellarator	Stellar generator: hvězdný zdroj – experimentální zařízení pro fúzi
TCV	Tokamak à Configuration Variable: Tokamak s proměnlivou konfigurací udržovacího magnetického pole, Švýcarsko
TEXTOR	Tokamak Experiment for Technology Oriented Research: tokamak pro technologický výzkum, Německo
TFTR	Tokamak Fusion Test Reactor, USA
TMP	Toroid v Magnitnom Pole – první zařízení typu tokamak (1955) se nejmenovalo tokamak ~ 4 th Conference on Ionization Phenomena in Gases, 1958, Uppsala, Švédsko
Tokamak	TOroidálnaja KAmera i MAGnitnyje Katuški, nebo též TOK, KAmera i MAGnitnyje Katuški a nebo TOroidálnaja KAmera MAGnitnaja
ÚFP	Ústav fyziky plazmatu AV ČR
ÚV KSSS	Ústřední výbor Komunistické strany Sovětského svazu
UKAEA	United Kingdom Atomic Energy Authority: asociace Spojeného království EURATOM
VR	Vetenskapsradet: švédská asociace EURATOM
WEC	World Energy Council (Světová rada pro energii)
ZETA	Zero Energy Thermonuclear Assembly: Termonukleární zařízení s nulovým ziskem v Harwellu od roku 1957 mnoho let největší fúzní experiment na světě, Spojené království

NĚKTERÉ VELIČINY A POJMY POPISUJÍCÍ PLAZMA

1 eV (keV) jednotka energie, ve které se uvádí i teplota plazmatu. Střední energie částic 1 eV (elektronvolt) totiž odpovídá teplotě 11600 K. Teplota 1 keV tedy představuje 11,6 miliónu K.

Bohmova difúze zatímco koeficient klasické difúze je úměrný B^{-2} , je koeficient Bohmovy difúze úměrný B^{-1} (slabší závislost na magnetickém poli)

Breakeven energetické vyrovnání ($Q = 1$), kdy fúzní výkon je rovný energii dodávané zvnějšku na ohřev plazmatu

Culham Science Centrum Vědecké středisko v Culham, Spojené království, s tokamakem JET

Cyklotronní frekvence (frekvence rotace nabitě částice kolem směru magnetické siločáry) $\omega_c = q \cdot B / m$, kde q – absolutní hodnota náboje, B – magnetická indukce, m – hmotnost částice

Divertor takové uspořádání magnetického pole, které samo ohraničuje průřez plazmatického sloupce vhodným odchýlením magnetických siločar na okraji plazmatu (srovnej s limiterem); stejný název se používá i pro oblast, ve které odchýlené magnetické pole vyvádí částice a energii plazmatu na stěnu komory

Doba udržení energie plazmatu τ_E – poměr energie plazmatu a výkonu, který je nutno dodávat zvenčí, aby energie neklesla; nebo jinak – doba, za kterou energie plazmatu po vypnutí příkonu (ohřevu) klesne na hodnotu τ_E / e ($\approx 1/3$ původní hodnoty).

Dolní hybridní frekvence pro hustoty plazmatu obvyklé v tokamakách $\omega_d = (\omega_{ce} \omega_{ci})^{1/2}$, kde index i , respektive e označuje ionty, respektive elektrony

Harwell do roku 1960 středisko ve Spojeném království zabývající se jaderným výzkumem, včetně jaderné fúze. Harwell se pak přestěhoval do nedalekého Culham Science Centre (Vědecké středisko Culham).

H-mode režim zlepšeného udržení charakterizovaný skokovou změnou hustoty a teploty na hranici plazmatu

Horní hybridní frekvence $\omega_h = (\omega_{ce}^2 + \omega_{ci}^2)^{1/2}$, kde index i , respektive e označuje ionty, respektive elektrony

Ignition zapálení: okamžik, kdy fúzní plazma je energeticky soběstačné díky vnitřnímu ohřevu produkty reakce

Lawsonovo kritérium kritérium ziskového termojaderného reaktoru (více na [str. 19](#))

Limiter zařízení ohraničující průřez plazmatu (dříve ohraničovala clona) a soustřeďující proud částic a tepla na přesně určené místo. Vyráběn původně z wolframu či molybdenu používá spíše uhlík. Limiter a divertor mají podobné funkce.

pinch effect stlačení plazmatu působením dostředivé radiální síly pocházející od azimutálního magnetického pole podélného proudu

Plazmová frekvence (na elektrony vychýlené v plazmatu oproti iontovému pozadí působí přitažlivá Coulombova síla, která v souboji se setrvačností způsobí oscilace elektronů; frekvence těchto kmitů, řádově GHz, se nazývá plazmová frekvence):

$\omega_p = (n_0 e^2 / \epsilon_0 m)^{1/2}$, kde n_0 – hustota plazmatu, e , resp. m – náboj, resp. hmotnost elektronu, ϵ_0 – dielektrická konstanta vakua

Q fúzní výkon/příkon do plazmatu

scaling laws (škálovací vztahy) empirické (tj. odvozené ze zkušeností získaných na mnoha experimentálních zařízeních) vztahy mezi důležitými parametry plazmatu (jako je doba udržení energie) a technickými parametry fúzního zařízení (velikost, intenzita magnetického pole, výkon ohřevu atd.)

Separatrix hraniční magnetická plocha oddělující uzavřená a otevřená magnetická pole v oblasti divertoru

SOC Scrape Off Layer oblast těsně za hranicí sloupce plazmatu (tj. vně separatrix), ve které částice a energie tekou podél magnetických siločar na limiter nebo divertor (viz obrázek na str. 29)

Troitsk místo na okraji Moskvy, ve kterém se nachází středisko fúzního výzkumu jako součást původně pobočky Kurčatovova ústavu a později nezávislé výzkumné organizace s názvem TRINITI

PŘEDPONY PRO VEDLEJŠÍ JEDNOTKY

kílo (k)	10^3	tisíc	milí (m)	10^{-3}	tisícina
mega (M)	10^6	milión	mikro (μ)	10^{-6}	milióntina
gíga (G)	10^9	bilarda	nano (n)	10^{-9}	bilardtina
tera (T)	10^{12}	bilión	píko (p)	10^{-12}	bilióntina
peta (P)	10^{15}	bilarda	femto (f)	10^{-15}	bilardtina

Literatura

Pořadí doporučené literatury je voleno podle náročnosti – od nejméně po nejvíce náročnou, tedy od převážně slovního výkladu k literatuře používající matematický aparát.

- 1 Vladimír Pictorius: **Jak se chytá slunce**, Albatros, Praha 1981
- 2 Karel Sedláček, Jan Tůma: **Atom skrývá naději**, Naše vojsko, Praha 1987
- 3 Luděk Pekárek: **Termonukleární energie**, Malá moderní encyklopedie, Orbis, Praha 1959
- 4 Zdeněk Horský, Zdeněk Mikulášek, Zdeněk Pokorný: **Sto astronomických omylů uvedených na pravou míru** (vybrané kapitoly), Prémie nakladatelství Svoboda 1968, Praha
- 5 Josip Kleczek: **Vesmír kolem nás** (vybrané kapitoly), Albatros, Praha 1986
- 6 Bedřich Heřmanský, Ivan Štoll: **Energie pro 21. století**, Vydavatelství ČVUT, Praha 1992
- 7 C. M. Braams, P. E. Scott: **Nuclear Fusion – Half Century of Magnetic Confinement Fusion Research**, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia 2002
- 8 Guido Van Oost: **Status of Magnetic Fusion Research**, přednáška kursu Fyzika a technika vysokoteplotního plazmatu, FJFI ČVUT & ÚFP AV ČR, 2003–2004
- 9 Pavel Augusta, Marie Dufková, Jiří Hruža, Jan Malínský, Jiří Marek, Marta Opplová, Ivan Štoll, Jan Tůma: **Velká kniha o energii** (vybrané kapitoly), L. A. Consulting Agency, spol. s. r. o., Praha 2001
- 10 Karel Koláček: **Termojaderná energie a její využití**, Interní zpráva Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, Praha 1996
- 11 **Texty panelů putovní výstavy Evropské komise** (DG XII Fusion Programme), překlad František Žáček, Jan Badalec, Martin Hron (uspořádal František Žáček), Ústav fyziky plazmatu AV ČR, Praha 1998
- 12 Pavel Šunka, Luděk Pekárek, František Žáček, Karel Rohlena, Aleš Krejčí, Pavel Kubeš, Ladislav Krlín (uspořádali Aleš Krejčí a Oto Štirand): **Termojaderná fúze – stav v roce 1991**, Československý časopis pro fyziku, 42 (1992), příloha čísla 3, P1 – P30
- 13 Francis F. Chen: **Úvod do fyziky plazmatu**, Academia, Praha 1984, přeložil Karel Rohlena z **Introduction to Plasma Physics**, Plenum Press New York 1974
- 14 Samuel Glasstone, Ralph H. Lovberg: **Controlled Thermonuclear Reaction**, D. Van Nostrand Company, Inc, Princeton, New Jersey 1960
- 15 L. A. Arcimovič: **Što každý fyzik dolžen znať o plazme**, Moskva, Atomizdat, 1976
- 16 S. J. Lukjanov: **Gorjačaja plazma i upravljajemyj termojadernyj sintéz**, Nauka, Moskva 1975

ČLÁNKY

- 17 J. Limpouch: **Inerciální termonukleární fúze a perspektivy jejího energetického využití**, Energetika 42 (1992), č. 4, str. 109–114
- 18 F. Žáček: **Současný stav a perspektivy řízené jaderné fúze**, Energetika 42 (1992), č. 7, str. 199–204
- 19 V. Weinzettl: **Čistá energie tokamaku**, Vesmír 77 (1998), str. 207–211
- 20 J. Mlynář: **Lesk a bída termojaderné syntézy**, Vesmír 77 (1998), str. 212–214
- 21 M. Řípa: **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
- 22 M. Řípa: **Wendelstein W7-X: Tokamak versus Stelarátor?**, VTM, 55 (2001), č. 4, str. 30–32
- 23 M. Řípa: **Moře energie obklopuje Greifswald**, VTM, 55 (2002), č. 12, str. 15
- 24 M. Řípa: **ITER – termojaderná syntéza na půli cesty**, VTM, 57 (2003), č. 8, str. 64–67
- 25 M. Řípa: **ITER – v polovině cesty k termojaderné energii**, Česká hlava – svět vědy, 1 (2003), č. 11, str. 12–15
- 26 M. Řípa: **Kdo postaví termojaderný reaktor? Francie či Japonsko**, Mladá Fronta Dnes, 4. ledna 2004, str. C/8
- 27 J. Mlynář: **ITER – cesta ke zvládnutí řízené termonukleární fúze**, Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, 49 (2004), č. 2, str. 129–150

Controlled thermonuclear fusion for everybody

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 small tokamak, CASTOR, at the Institute of Plasma Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague.

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.

**THIS BOOK IS PUBLISHED TO MARK THE 45TH ANNIVERSARY
OF INSTITUTE OF PLASMA PHYSICS, ACADEMY OF SCIENCES
OF THE CZECH REPUBLIC.**



Ústav fyziky plazmatu Akademie věd České republiky

Řízená termojaderná syntéza pro každého

autoři: Milan Řípa, Vladimír Weinzetti, Jan Mlynář, František Žáček

editor a odpovědný redaktor Milan Řípa

jazyková redaktorka Irena Webrová

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, SNL

u příležitosti 45. výročí založení vydal Ústav fyziky plazmatu AV ČR

Za Slovankou 3
182 21 Praha 8,
<http://www.ipp.cas.cz>

vytiskl ??????????????

2. vydání

náklad 1000 výtisků

Praha 2005

ISBN 80-902724-7-9

