

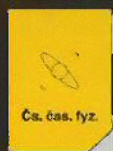
Československý časopis pro fyziku

5/ 2005
svazek 55

Fyzikální ústav
Akademie věd České republiky, Praha
<http://www.cscasfyz.fzu.cz>

**50 let FJFI ČVÚT
v Praze**

ISSN 0009 - 0700



O HISTORII A PERSPEKTIVÁCH

TERMOJADERNÉHO VÝZKUMU V TOKAMACÍCH

Vladimír Weinzettl, Ústav fyziky plazmatu AV ČR, Za Slovankou 3, 182 00 Praha 8

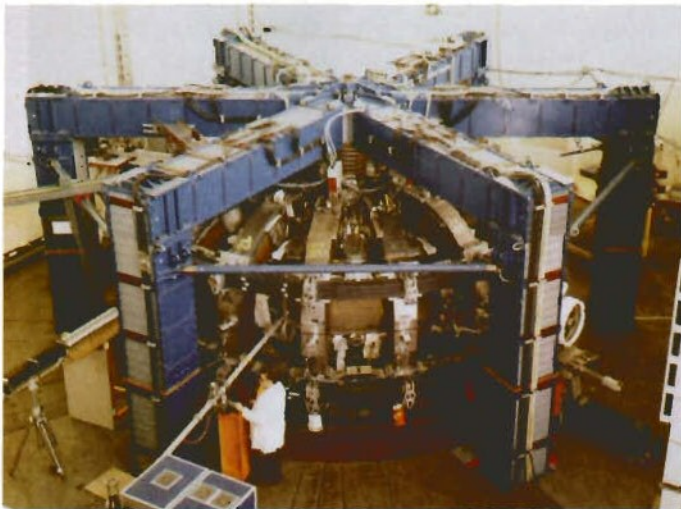
Termojaderná syntéza (fúze). Slovní spojení mnoha lidem neznámé, pro znalé však synonymum nejúčinnějšího energetického zdroje, o jakém se kdy na Zemi reálně uvažovalo. Když byla před sto lety vyslovena hypotéza o ekvivalenci hmotnosti a energie, $E = mc^2$, ani sám její autor Albert Einstein netušil, že by mohla vyjadřovat množství uvolňované energie při slučování atomových jader a vysvětlovat tak původ vysokých výkonů vyzařovaných hvězdami. Jen na našem Slunci se fúzí každou sekundu mění přes 657 milionů tun vodíku na 652,5 milionu tun helia. Ač jde jen o nepatrný zlomek hmotnosti Slunce, která činí přibližně 2×10^{30} kg, v pozemských podmínkách toto množství představuje například stonásobek hmotnosti největších egyptských pyramid. Hmotnostní rozdíl mezi jaderně „spalovaným“ vodíkem a produkovaným heliem pak odpovídá 386 milionům gigawattů (jeden blok štěpné elektrárny Temelín má elektrický výkon necelý 1 GW) vyzařovaným do prostoru. Z nich zanedbatelná část doputuje i na Zemi a zajišťuje tak příhodné podmínky pro vznik a udržení života; asi desetimiliardtina výkonu slunce představuje na zemském povrchu 1,4 kW dopadajících na čtvereční metr. Člověk dokáže s dnešní technologií fotovoltaických článků přímo přeměnit na elektrickou energii jen malou část tohoto výkonu, typicky 120 W/m². Povětšinou se však spoléhá na sluneční energii akumulovanou po miliony let ve fosilních palivech (uhlí, ropa, zemní plyn). Jde ale o velké plýtvání těmito cennými organickými látkami, které mohou být efektivněji využity v jiných oborech, než je energetika (petrochemie, kosmetika). Navíc, přihlédneme-li k množství odpadů podílejících se na skleníkovém efektu a omezeným zásobám fosilních paliv, nezbyvá než se podívat nad skutečností, že je současný svět prakticky závislý právě na tomto zdroji energie. Naštěstí již dnes existují koncepce alternativní, mnohem šetrnější k životnímu prostředí a zohledňující trvale udržitelný rozvoj. Jednou z nich je koncepce tokamaků jako elektráren založených na principu termojaderného slučování vodíkových jader.

OD ENERGIE HVĚZD K VODÍKOVÉ BOMBĚ

Termojaderná syntéza (fúze) je slučovací reakcí lehkých atomových jader na jádra těžší. Při energie-

tickém výtěžku až 98 000 kWh/g jde o 10 000 000x účinnější využití paliva než při spalování uhlí či ropy v tepelných elektrárnách. Fúze je hlavním energetickým zdrojem Slunce i ostatních hvězd složených především z vodíkových jader. „Jaderné spalování“ tam probíhá především v tak zvaném proton-protonovém cyklu, to jest slučování jader vodíku (protonů) na jádro helia, či u hvězd těžších a teplejších než naše Slunce v uhlíkovém cyklu, kde je přeměna jader vodíku na helium „katalyzována“ přítomností jader uhlíku a dusíku. Tyto mechanismy odhalil a v roce 1938 podrobně popsal americký fyzik Hans Albrecht Bethe, ale první hypotézy o termojaderném původu energie hvězd sahají dalších dvacet let zpátky k astronomům Arthuru Eddingtonovi, Robertu Atkinsonovi a německému teoretickému fyzikovi Friedrichu Houtermansovi. Stáří a tedy doba termojaderného spalování našeho Slunce se odhaduje na 5 miliard let a přibližně dalších 5 miliard let potrvá, než se začne měnit v typ hvězdy zvaný rudý obr, kdy zřejmě při svém rozpínání pohltí Zemi, a započne se spalováním vzniklého izotopu helia ⁴He. Do té doby budou fúzní reakce na Slunci probíhat za teplot okolo 14 milionů stupňů velmi pomalu. Teplota, neboli střední energie částic (ve fyzice plazmatu používaná jednotka energie 1 eV \equiv 1,6.10⁻¹⁹ J odpovídá v přepočtu teplotě 11 600 °C), je rozhodující veličinou pro rychlost termojaderných reakcí. Kladně nabitá atomová jádra se vzájemně elektricky odpuzují a tuto coulombovskou bariéru (pro atomová jádra vodíku 500 keV, což odpovídá teplotám řádu miliard stupňů) mohou překonat a přiblížit se k sobě na dosah přitažlivých jaderných sil odpovědných za fúzi jedině tehdy, mají-li alespoň srovnatelně velkou pohybovou energii. Jelikož jsou však atomová jádra velmi malé objekty, s rozměrem méně než 10⁻¹⁴ m, mohou proniknout skrze potenciálovou bariéru i s energií o něco menší, než je výška bariéry. Jedná se o tzv. tunelový jev. Tento jev je výhradně záležitostí kvantové mechaniky a nemá v klasické fyzice obdobu.

Znalost mechanismu fúzních reakcí byla velmi brzy zneužita pro vojenské účely. Spojením štěpné jaderné rozbušky a vodíkového paliva vznikly na počátku padesátých let první ničivé vodíkové pumy. Nejprve termojadernou nálož zkonstruovali pod vedením Edwarda Tellera Američané a vyzkoušeli její účinky 1. listopadu 1952 na korálovém atolu



1/ Německý tokamak TEXTOR v Jülichu. S laskavým svolením EFDA.

Eniwetok v Tichém oceánu. Energie výbuchu odpovídala osmi milionům tun TNT (asi 500x více než při výbuchu v Hirošimě). Brzy nato se k závodům ve zbrojení přidali sověti pod vedením Andreje Sacharova s bombou s lithiovým pláštěm (12. srpna 1953, Semipalatinsk). Plášť z lithia znamenal, že se vodíková bomba dala snadno transportovat a pro Spojené státy americké tak představovala velké nebezpečí. Ale to už je jiný příběh.

PRVNÍ KROKY KE ZKROCNÍ FÚZE

Dosáhnout teploty několika desítek milionů stupňů nutné k zapálení fúzních reakcí v pozemských podmínkách a navíc způsobem, který povede k energetickému využití tohoto ohromného uvolňovaného termojaderného výkonu, trvalo mnohem déle.

Vzhledem k tomu, že výška coulombické bariéry, a tedy velikost potřebné teploty média (plazmatu), roste s druhou mocninou počtu protonů v jádře slučovaného prvku a s teplotou pak rostou ztráty plazmatu brzděním záření, což znesnadňuje ohřev, soustředil se výzkum na reakce atomových jader s jedním nebo dvěma protony (vodík, helium). Jedná se o reakce těžkých izotopů vodíku – ^2H deuteria (jádro obsahuje 1 proton a 1 neutron; často se též značí D) a tritia ^3H (jádro obsahuje 1 proton a 2 neutrony; často se též značí T): $2\ ^2\text{H} \rightarrow\ ^3\text{H} + \text{p} + 4,03\ \text{MeV}$, $2\ ^2\text{H} \rightarrow\ ^3\text{He} + \text{n} + 3,27\ \text{MeV}$, $^3\text{H} + ^2\text{H} \rightarrow\ ^4\text{He} + \text{p} + 18,35\ \text{MeV}$ a především pak nejsnadněji uskutečnitelná reakce $^3\text{H} + ^2\text{H} \rightarrow\ ^4\text{He} + \text{n} + 17,6\ \text{MeV}$. Deuterium je v přírodě zastoupeno poměrně hojně, jde o každý šestitisící vodíkový atom. Kdybychom přefiltrovali vodu z Máchova jezera a získané deuterium využili v termojaderném reaktoru, produkováná energie by vystačila kryt spotřebu České republiky po 150 let! A jezero samotné by přitom zůstalo téměř nedotčené. Tritium se bohužel v přírodě téměř

nevyskytuje, neboť je radioaktivní (poločas rozpadu 12,3 roku), nicméně dá se uměle připravit na urychlovači (dnes je rovněž k dispozici z těžkovodních štěpných reaktorů typu CANDU). Cena takto vyrobeného gramu tritia, použitého pro první vodíkovou bombu, se však pohybovala okolo jednoho milionu dolarů. Naštěstí, cesta vede i jinudy. Po dodání malého množství tritia vyrobeného na urychlovači lze tritium vyrábět přímo v reaktoru záchytem termojaderných neutronů v lithiu v přístěnové části reaktoru, tzv. blanketu. A stejně jako deuteria i lithia je v přírodě tak ohromné množství, že by jeho zásoby začaly limitovat celosvětovou produkci fúzní energie až po stovkách milionů let. Bohužel, i pro toto z mnoha hledisek optimální palivo vychází teplota potřebná pro uskutečnění termojaderné syntézy v pozemských podmínkách okolo 100 000 000 °C!

Už roku 1932 ukázali angličtí fyzikové Ernest Rutherford a Marcus Oliphant svými pokusy na urychlovači v Cavendishových laboratořích v Cambridge, že fúze je sice dosažitelná i v pozemských podmínkách, ale na těchto zařízeních pouze se ztrátou energie. Mezitím se začala rodit fyzika vysokoteplotního plazmatu na základech, které položil ve dvacátých letech Irving Langmuir svými experimenty s výboji v plynech. Pozorování efektu zvaného *pinch* americkým fyzikem Willardem Bennettem (1934), kterým se plazma při průchodu velkého proudu samovolně stlačuje v důsledku působení indukovaného magnetického pole, spolu s teoretickými pracemi Švéda Hanse Alfvéna definujícími pohybové rovnice plazmatu a pracemi ázerbajdžánského teoretika Lva Davidoviče Landaua popisujícími interakci mezi částicemi a vlnami v plazmatu mělo zásadní vliv na vývoj fúzních zařízení. Zpočátku utajovaný výzkum termojaderné syntézy však probíhal velmi pomalu. Souběžně se totiž zkoumalo mnoho typů zařízení – svazky lehkých a těžkých iontů, magnetická zrcadla, americké stellarátory navržené Lymanem Spitzerem (1951, Princetonská laboratoř fyziky plazmatu), anglické pinče (1954, ZETA), sovětské tokamaky konstruované pod vedením Lva Arcimoviče (1955, Kurčatovský ústav v Moskvě) a výkonové lasery navržené Nikolajem Basovem (1968, neodymový laser). K soustředění výzkumu především na tokamaky došlo po roce 1968, kdy se konala třetí konference o fyzice plazmatu v Novosibirsku. Tehdy Rusové oznámili dosažení teploty 10 000 000 °C na tokamaku T-3, postaveném v Kurčatovském ústavu v Moskvě. Po společném rusko-anglickém experimentu v následujícím roce, který tento senzační výsledek potvrdil (jednalo se o měření teploty s tehdy supermoderním laserem pro Thomsonův rozptyl), se princip tokamaku stal příslibem pro budoucí energetické využití fúze.

KONCEPCE TOKAMAKŮ

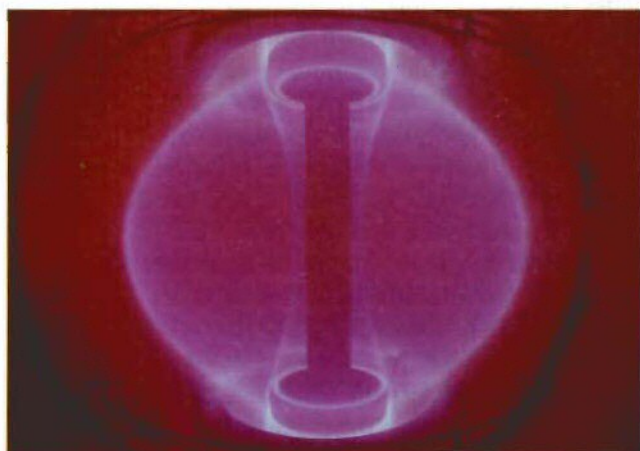
Tokamak (z ruštiny, zkratka: ток – proud, камера – komora, магнитные катушки – magnetické cívký) si lze představit jako dutý prstenec naplněný horkým ionizovaným vodíkovým plynem (plazmatem), obklopený magnetickými cívkami a transformátorovým jádrem. Tokamaky využívají princip transformátoru, kde komora s plazmatem tvoří jediný závit jeho sekundárního vinutí. Přivedením elektrického proudu do primárního vinutí se elektromagnetickou indukci vybudí proud v sekundárním vinutí, to jest v řídkém vodíkovém plynu (10^{-3} Pa) uvnitř komory. Díky značnému elektrickému odporu je plyn rychle ohříván Jouleovým teplem ($P = R \times I^2$, kde P je uvolňovaný výkon, R elektrický odpor plynu a I je protékající proud). Během jedné tisícině sekundy se dosáhne teploty milionů stupňů a zprvu jen slabě ionizovaný vodíkový plyn se změní v plně ionizované plazma tvořené směsí elektronů a atomových jader. Tyto elektricky nabitě částice plazmatu jsou v prstencové komoře udržovány a izolovány od stěn silným magnetickým polem. Podél osy komory má toto pole sílu jednotek tesla (v radiotechnice se běžně používají pole 1000x slabší) a je generováno magnetickými cívkami. Magnetické pole ve směru kolmého řezu (poloidální směr) je přibližně 100x menší a je vytvářeno výše zmíněným elektrickým proudem protékajícím plazmatem. Obě složky dohromady pak vytvářejí šroubovicovitou (helicitní) strukturu magnetického pole. Elektricky nabitě částice, které za vysokých teplot tvoří více než 99 % plazmatu, musí sledovat silokřivky tohoto pole – pohybují se po magnetických površích (šroubovice po mnohanásobném navinutí vytvoří opět prstencový povrch), a nemohou tak unikat na stěny komory. Poloha horkého plazmatu uprostřed komory musí být kontrolována stabilizačními poloidálními cívkami nataženými podél

prstence. Tepelné ztráty v magnetických cívkách (tudíž i příkon do nich) jsou při generaci silných magnetických polí obrovské, navíc cívký u velkých experimentálních zařízení již nelze trvale uchladiť, a tím také limitují délku výboje. Proto se dnes u tokamaků používají supravodivé cívký (slitiny Nb-Ti nebo Nb-Sn při teplotě 4,5 K, což odpovídá $-268,6$ °C), které mají minimální spotřebu elektrické energie.

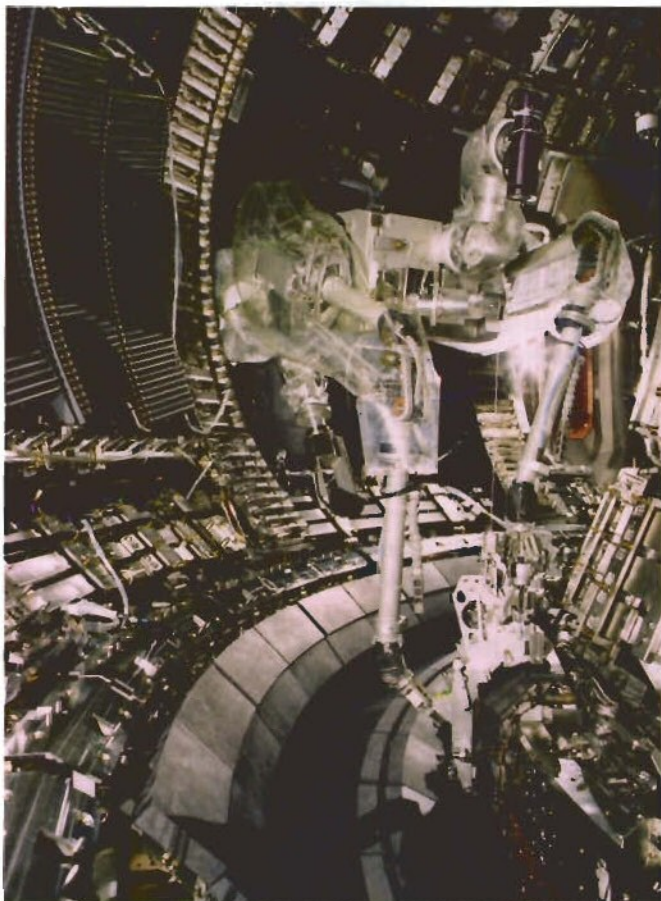
Jak se vzrůstající teplotou klesá elektrický odpor plazmatu, začíná být ohřev Jouleovým teplem neefektivní. Jeho místo pak zaujímají metody ohřevu založené na absorpci elektromagnetického vlnění v plazmatu, jejichž obdoba se uplatňuje například i v domácnostech v mikrovlnných troubách. V termojaderných zařízeních s magnetickým udržením částic jde zejména o ohřev na cyklotronní rezonanci (frekvence rotace nabitě částice kolem magnetické silokřivky) iontů v rozmezí frekvencí 20–120 MHz a elektronů 70–200 GHz. Naprosto odlišným přístupem k ohřevu plazmatu, avšak velmi využívaným, je vstřík neutrálních částic s energií až stonásobku teploty plazmatu, které svoji energii předají srážkami okolnímu plazmatu. Na současných tokamacích se používají svazky neutrálních částic s energií do 120 keV mající výkon 10 MW, což představuje nebývalý proud částic z urychlovače – až 100 A! Jakmile se dosáhne termojaderných teplot, začnou se vodíková jádra slučovat a část uvolňované energie plazma ohřívá (samoohřev), podobně jako plazma ohřívaly vstříkované částice v předchozím případě. Ve fúzních elektrárnách pak bude samoohřev naprosto dominantní metodou k udržení pro fúzní reakce nezbytně vysoké teploty paliva.

OD PRVNÍCH TOKAMAKŮ K JETU

Téměř současně se stavbou prvních stelarátorů a tokamaků se vynořila otázka, jaké parametry musí mít plazma fúzního zařízení, které bude sloužit jako elektrárna, tj. které bude produkovat energii. Velmi jednoduchou úvahu založenou na znalostech účinného průřezu (pravděpodobnosti) fúzních reakcí a srovnání velikosti ohřevu plazmatu a ztrát energie zářením a únikem částic publikoval v roce 1957 anglický fyzik John Lawson z tehdy utajovaného výzkumného centra v Harwellu. V kritériu, které dodnes nese jeho jméno, svázal teplotu a hustotu plazmatu a dobu udržení energie. Pro danou fúzní reakci pak ve fúzní elektrárně musí být součin hustoty a doby udržení energie větší než jistá hodnota daná teplotou plazmatu. Pro zapálení nejčastěji uvažované reakce deuteria s tritiem nabývá výše zmiňovaná závislost, zvaná též fúzní součin, minima při teplotě asi 30 keV (více než 300 000 000 °C) a zní: $n \cdot \tau_E > 1,7 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$. Pro jiné teploty je nutno dosáhnout buď větší hustoty plazmatu (cesta inerciální fúze, např. lasery), nebo delší doby udržení



2/ Plazma ve sférickém tokamaku START v anglickém Culhamu poblíž Oxfordu.
S laskavým svolením EFDA.



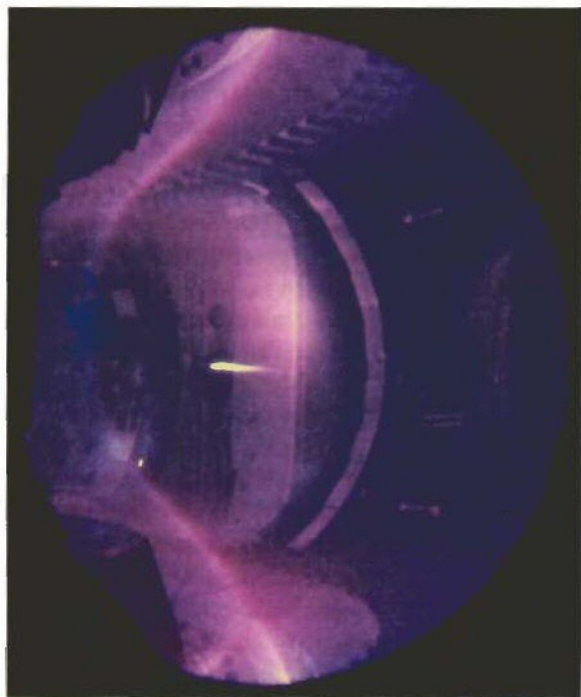
3/ Robotická paže ve vakuové komoře největšího tokamaku světa JET v anglickém Culhamu poblíž Oxfordu.

S laskavým svolením EFDA.

(cesta zařízení s magnetickým udržením, např. tokamaky, pro oblast $T \sim 100\text{--}200\ 000\ 000\ ^\circ\text{C}$ lze nerovnost psát jako $n \cdot T \cdot \tau_E > 3 \cdot 10^{21}\ \text{m}^{-3}\text{keV s}$).

Po ohromném úspěchu ruského tokamaku T-3 v roce 1968, dosažení $10\ 000\ 000\ ^\circ\text{C}$, nastává zlatá éra tokamaků v sedmdesátých letech, kdy se mnoho jiných fúzních zařízení přestavuje právě na typ tokamak. A když svět v roce 1973 zažívá ropnou krizi, zvyšuje se podpora hledání alternativních zdrojů energie, včetně fúze, geometrickou řadou. Jen v USA se během dvou let dotace na výzkum fúze více než zdesetinásobily! Tehdejší experimentální data ukazovala, že se jak teplota plazmatu, tak doba udržení částic zvyšují se zvyšující se hodnotou proudu protékajícího plazmatem. Extrapolace pak naznačovaly, že by tokamak s proudem okolo 3 MA již měl dosáhnout vyrovnání mezi výkonem potřebným na ohřev a uvolňovaným fúzním výkonem. Jenže v polovině sedmdesátých let dosahovaly ruský T-4 a francouzský TFR jen 400 kA. A tak se začala stavět zařízení nové generace. Rusové postavili nové tokamaky T-10 (1975) a T-7 (1979), který byl jako první na světě vybaven supravodivými cívkami (použita slitina NbTi). Američané uvedli v roce 1975

do provozu jednomegapérový tokamak známý jako *Princeton Large Torus* (PLT, v roce 1978 dosáhl $60\ 000\ 000\ ^\circ\text{C}$), zatímco Evropané spojili síly v projektu společného, již třimegapérového tokamaku *Joint European Torus* (JET). JET, jehož design vznikl od roku 1973, byl zprovozněn v červnu 1983 v anglickém Culhamu poblíž Oxfordu a je dosud největším a nejúspěšnějším tokamakem světa. Plány postavit obrovský JET vyprovokovaly Američany k rychlé reakci a dokonce se jim podařilo svůj 2,5-megapérový projekt *Tokamak Fusion Test Reactor* (TFTR) díky rychlému rozhodnutí o jeho umístění v Princetonu uvést do provozu o půl roku dříve než JET! Ani Rusové nechtěli zůstat pozadu a oznámili záměr postavit srovnatelně velký a výkonný tokamak T-20, nicméně nakonec zůstalo u skromnějšího jednomegapérového T-15 (1989), tentokrát se supravodičem Nb₃Sn, který umožňoval dosáhnout magnetického pole až 3,5 T. Bohužel, pro nedostatek finančních prostředků a pro velké technické problémy byl experiment uzavřen. Nakonec o sobě dala vědět i čtvrtá tokamaková velmoc – Japonsko. Japonci přišli s projektem 2,7-megapérového tokamaku JT-60 ve městě Naka (zprovozněn v dubnu 1985), který se po pozdějších úpravách výkonem i technologií vyrovnal JETu (ve verzi JT-60U). Ač tyto velké tokamaky demonstrovaly možnost provozu s velmi vysokými proudy v plazmatu (7 MA, JET), kvůli degradaci (snížení) doby udržení energie při vysokých teplotách, způsobené růstem turbulence plazmatu při dodatečných ohřevech, svůj cíl přiblížit se fúzní elektrárně a dosáhnout alespoň vyrovnání příkonu a fúzního výkonu nakonec nespínily (nejblíže se ocitl JET při kampani v roce 1997 s poměrem příkonu a fúzního výkonu přepočteným na stacionární stav o hodnotě 0,94, viz dále). Mezinárodní spolupráce v oblasti fúze však ukázala cestu dál. V tokamacích se původně vymezovalo plazma materiálovou clonou z těžko tavitelného materiálu (molybden, wolfram) uvnitř komory, tzv. limiterem (limitovat = ohraničovat). Změna konfigurace magnetických povrchů (protahování z kruhové konfigurace do tvaru kapky či písmena D v poloidální rovině) tak, že magnetické siločáry na okraji plazmatu vyvádějí částice unikající v důsledku difuze či turbulencí postupně ven z horkého jádra do zařízení zvaného divertor (angl. *divert* = odklonit, odvést), umožnila od limiteru upustit. A právě na menším německém tokamaku ASDEX s divertorem v roce 1982 fyzici objevili režim se zlepšeným udržením částic a energie, tzv. *H-mode* (z angl. *high confinement* – lepší udržení) a popsali podmínky, za nichž vzniká (ohřev plazmatu svazkem neutrálních částic, použití divertoru). Jako první z velkých tokamaků použil konfiguraci magnetického pole ve formě divertoru JET v roce 1986 (naštěstí byl původně kvůli elektromechanickým



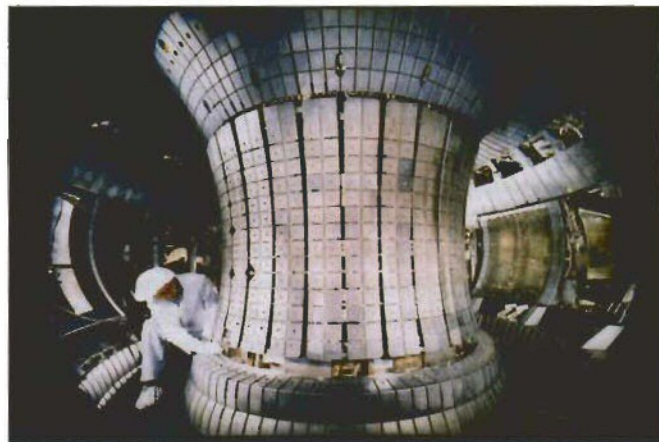
4/ Plazma v německém tokamaku ASDEX. Záblesk uprostřed představuje odpařující se zmraženou vodíkovou tabletku vstřelenou do plazmatu v rámci dodávání paliva.

S laskavým svolením EFDA.

silám při výbojích koncipován s tvarem komory D; dodatečná instalace fyzického divertoru byla provedena až v roce 1992) a dosáhl dvakrát lepšího fúzního součinu, než byl dosavadní rekord. Nicméně produkce skutečného fúzního výkonu si vyžádala další krok, použití radioaktivního tritia jako součásti paliva (doposud se používalo pouze deuterium). V listopadu 1991 tak na JETu proběhla experimentální kampaň se směsí D+T 89 % : 11 % při produkovaném fúzním výkonu 1,7 MW. O dva roky později, v listopadu 1993, použil americký TFTR již optimální směs D+T jedna k jedné, aby tak zlepšil rekord produkovaného výkonu na 6 MW, v roce 1994 až 10,7 MW a dosáhl tím poměr fúzního výkonu k ohřevovému příkonu $Q \sim 0,25$. Završením tritiových experimentů bylo dosažení špičkového výkonu 16 MW a v nestacionárním stavu $Q \sim 0,64$ (při přepočtu na stacionární stav výboje by se dosáhlo $Q = 0,94 \pm 0,17$, tedy téměř vyrovnání výkonu a příkonu) na JETu v roce 1997, a to opět za použití optimální směsi D+T jedna ku jedné. Typické délky výbojů jsou pro tyto velké tokamaky sekundy až desítky sekund. Rekord v délce pulsu při vysokých výkonech, 6 minut 30 sekund při rekordní odvedené fúzní energii 1 GJ, drží mezi tokamaky francouzský supravodivý Tore Supra. Mnohem menší japonský TRIAM-1M sice uskutečnil výboj o délce 3 hodiny, avšak s parametry plazmatu velmi daleko od uvažované fúzní elektrárny.

K FÚZNÍ ELEKTRÁRNĚ SPOLEČNĚ CESTOU JMÉNEM ITER

Po druhé světové válce dlouho utajované národní programy výzkumu fúze svojí izolací velmi strádaly. Jaké bylo proto překvapení, když v roce 1956 přijel do Střediska atomového výzkumu v anglickém Harwellu známý ruský jaderný fyzik Igor Kurčatov (s čelnými představiteli Sovětského svazu Nikitou Chruščovem a Nikolajem Bulganinem) s přednáškou o řízení termojaderné syntéze! Informační embargo definitivně padlo dva roky poté na 2. mezinárodní konferenci o mírovém využití jaderné energie v Ženevě, ale první mezinárodní projekt tokamaku spadá až do období konce sedmdesátých let. Mělo se jednat o „Next Step“ (další krok) zařízení, které by ukázalo, že fúze se ziskem energie je na Zemi technicky realizovatelná. Projekt dostal název INTOR (*International Tokamak Reactor*) a zasadil se o něj Jevgenij Velichov, později ředitel Kurčatovského ústavu v Moskvě a blízký poradce prezidenta Michaila Gorbačova. Naneštěstí, projekt INTOR se začal rodit ve chvíli, kdy se velké tokamaky teprve začínaly stavět. A tak byly extrapolace fyzikálních parametrů z menších tokamaků do měřítek elektrárny velmi nepřesné. Nakonec, ve fázi dokončení projektu, už bylo všem jasné, že je INTOR, co se týká parametrů plazmatu, příliš skromný a se stavbou se ani nezapočalo. Vždyť původně projektovaných 8 MA proudu plazmatem by bylo zapotřebí zvýšit nejméně na 20 MA! A tak další krok na cestě k fúzní elektrárně nakonec udělali demonstrativně politici na summitu v Ženevě (1985). Prezident Sovětského svazu Michail Gorbačov se dohodl se svým americkým protějškem Ronaldem Reaganem na zintenzivnění spolupráce vedoucí k projektu tokamaku další generace. K němu se přidala i Evropská unie (plus Kanada jako člen evropského týmu) a Japonsko a práce na



5/ Pohled do vakuové komory tokamaku ASDEX Upgrade v německém Garchingu u Mnichova. S laskavým svolením EFDA.

velkolepém 1,5 GW (elektrický výkon jednoho bloku JE Temelín představuje 1 GW) dvacetimegawattovým tokamaku ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*, též lat. cesta) mohly začít (1988). Byly zřízeny tři koordinující týmy – v San Diegu v USA, v Garchingu u Mnichova v Německu a v japonském městě Naka. Projekt ITERu, který by byl téměř třikrát větší než největší současné tokamaky, stavěl by se deset let a stál by šest miliard dolarů, byl hotov v roce 1989. V tom samém období však padala „železná opona“ mezi Východem a Západem a demonstrace dobré vůle ztratila svůj smysl. Navíc vlády USA i Japonska řešily, jak ušetřit ve vlastních rozpočtech, a tak nakonec USA od projektu docela odstoupily a zbylé strany se dohodly na přepracování projektu na menší, přibližně poloviční variantu. Skromnější projekt ITERu, který by měl demonstrovat hoření ($Q \sim 10$), nikoli však zapálení fúzních reakcí jako ve fúzní elektrárně ($Q \sim \infty$), byl dokončen v roce 2001 (500 MW, 15 MA). Následující rok se strhává doslova bitva o to, kde bude ITER postaven. Zájemci byli celkem čtyři – Clarington za Kanadu, Vandellós za Španělsko, Cadarache za Francii a Rokkasho-mura za Japonsko. V únoru 2003 se k projektu připojuje Čína, vracejí se USA a v červnu 2003 přibývá ještě Jižní Korea. O místě stavby ale stále není rozhodnuto! 26. listopadu dávají nakonec zástupci Evropy přednost jedinému kandidátovi, a to francouzskému Cadarache před španělským Vandellos, a Kanada z boje o ITER odstupuje. Soupeření mezi Rokkasho (Japonsko) podporovaným USA a Jižní Koreou a na druhé straně francouzským Cadarache (EU) s ruskou a čínskou podporou pokračuje celý následující rok. Evropané lobují za svoji lokalitu a jsou připraveni postavit ITER v Cadarache jako projekt šesti partnerů stejně jako pouze tří. Jde o prestiž, technologii a o nový zdroj energie. Ale především jde o lidstvo, a to vyhraje, pokud se ITER postaví! Kdekoli. Neboť bez ITERu nelze dobře předpovědět parametry plánovaného demonstračního tokamakového reaktoru DEMO a ani v budoucnu začít stavět první fúzní elektrárny. Nakonec je dohoda o stavbě ITERu ve francouzské lokalitě Cadarache poblíž přístavního města Marseille učiněna 28. června 2005 na ministerské schůzce šesti hlavních fúzních partnerů v Moskvě – EU, Japonska, USA, Ruska, Číny a Jižní Koreje. O náklady se přitom jednotlivé strany podělí následovně: EU zaplatí 50 %, ostatní partneři každý po 10 %. Se samotnou stavbou ITERu by se mělo začít do konce téhož roku. A zatím ceny fosilních paliv, zejména pak ropy a zemního plynu, letí strmě vzhůru ...

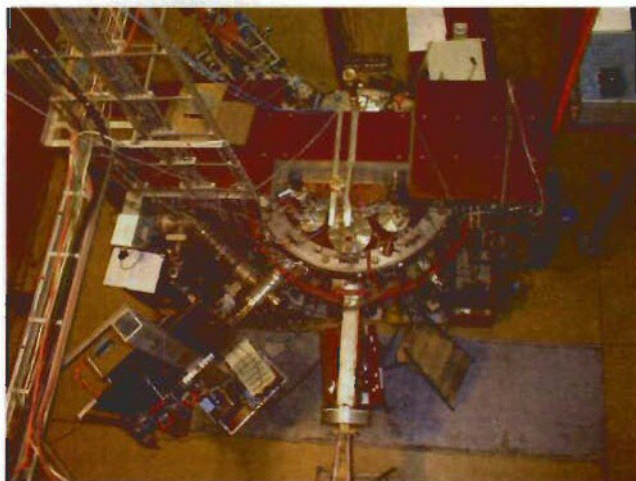
HORKÉ PLAZMA V ČESKU

1. ledna 1959 byl v Praze pod hlavičkou Československé akademie věd založen Ústav vakuové



6/ Ústav fyziky plazmatu AV ČR v Praze

elektroniky, který o čtyři roky později v souvislosti se změnou výzkumné tematiky přijal název Ústav fyziky plazmatu (ÚFP). Zároveň byl pověřen i koordinací prací na poli fúze v tehdejší Československu. Hlavním směrem výzkumu bylo přitom studium horkého plazmatu, zejména jeho interakce se svazkem energetických elektronů a s vysokofrekvenčním polem, během šedesátých let v lineárních zařízeních ELMAN1 a ELMAN2, během let sedmdesátých a osmdesátých pak na svazku relativistických elektronů (100 kA, 0,5 MeV) na zařízení REBEX. Během tohoto výzkumu bylo dosaženo řady prioritních fyzikálních výsledků, hovořilo se dokonce o „pražské svazkové škole“. Vývoj a použití vysokovýkonové impulsní techniky v ÚFP ale později vedly i k několika významným technickým aplikacím, jako je vývoj zařízení pro bezoperační odstraňování ledvinových kamenů. Jiné oddělení ÚFP v polovině sedmdesátých let provedlo vůbec první experimentální důkaz tantéž vypracované teorie generace elektrického proudu vysokofrekvenční vlnou, a to na toroidálním zařízení INTERMEZZO. A jelikož je existence elektrického proudu v plazmatu podstatou principu magnetického udržení nabitých částic v tokamacích, bylo na zá-



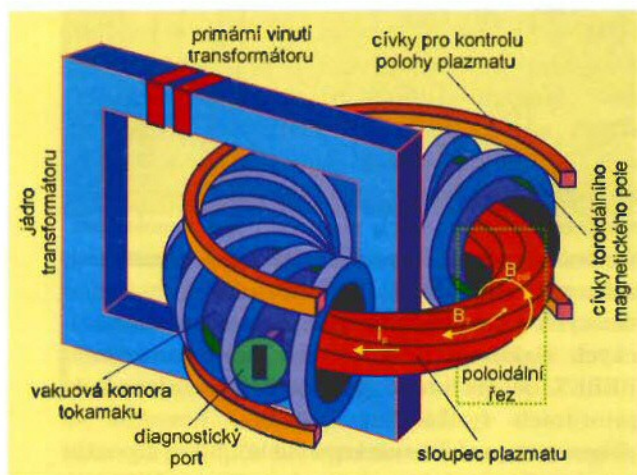
7/ Tokamak CASTOR v ÚFP AV ČR

kladě tehdejší úzké spolupráce mezi ÚFP a Kurčatovským ústavem v Moskvě předáno v roce 1977 do Prahy ruské zařízení TM-1 MH, jeden z prvních tokamaků na světě. Zařízení TM-1 prošlo rozsáhlou rekonstrukcí a v roce 1984 bylo uvedeno do provozu jako CASTOR (*Czech Academy of Sciences Torus*). Po sametové revoluci (1989) se pak do té doby rozsáhlá mezinárodní spolupráce v oblasti termojaderné fúze se státy východní Evropy rychle přeorientovala na západoevropské laboratoře. Od roku 1999 pak Ústav fyziky plazmatu s jedním z nejmenších tokamaků na světě tvoří jádro Asociace EURATOM/IPP.CR, která vznikla přidružením šesti institucí z ČR, zabývajících se výzkumem souvise-

jícím s termojadernou syntézou, k evropské organizaci zastřešující jaderný výzkum – EURATOM. Ceněna je přitom flexibilita zařízení CASTOR při testování nových diagnostik a rozsáhlý výzkumný program týkající se studia turbulentních procesů vedoucích k anomálním ztrátám částic a energie plazmatu, hlavního důvodu tak často vytýkané časové i finanční náročnosti termojaderného výzkumu. Oddělení tokamaku CASTOR má i velký potenciál pro výchovu studentů a doktorandů, a to jak z ČR, tak ze zahraničí, pro které každoročně pořádá letní experimentální školy. Během jediné tisícinové sekundy si tak studenti mohou zapálit na dobu jednoho mžiknutí oka své pozemské slunce o teplotě několika milionů stupňů.

Literatura

- [1] M. Řípa, V. Weinzettl, J. Mlynář, F. Žáček: *Řízená termojaderná syntéza pro každého*. ÚFP AV ČR, Praha, 2004.
- [2] G. McCracken, P. Stott: *Fusion The Energy of the Universe*. Elsevier Academic Press, London, UK, 2005.
- [3] F. Žáček, J. Stöckel: *Současný stav a perspektivy řízeného termojaderného slučování v tokamacích*. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, ročník 38 (1993), č. 4, s. 219-232
- [4] I. Úlehla, M. Suk, Z. Trka: *Atomy – jádra – částice*. Academia, Praha, 1990. Internetové zdroje – EFDA
- [5] (<http://www.efda.org>), Kurčatovský ústav (<http://www.kiae.ru/index.html>) a další.



B/ Schéma tokamaku