

Historie tokamaku ve světě a u nás

Milan Řípa

Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., Za Slovankou 3, 182 00 Praha 8

- Počátkem roku uplynulo padesát let od zahájení provozu tokamaku T-1 – prvního zařízení s názvem **tokamak**. Stalo se tak v LIPAN, dnešním Kurčatovově ústavu pro atomovou energii v Moskvě.
- V září tomu bude padesát let, kdy na II. mezinárodní konferenci o mírovém využití atomové energie v Ženevě padlo definitivně informační embargo ohledně výzkumu **řízené termojaderné fúze**.
- V srpnu uplyne čtyřicet let, kdy na III. mezinárodní konferenci o fyzice plazmatu a řízené termojaderné syntéze v Novosibirsku vystoupil L. A. Arcimovič se skvělou zprávou. Na **tokamaku T-3** v moskevském Ústavu pro atomovou energii I. V. Kurčatova **dosáhli teploty plazmatu pět milionů stupňů** a nepozorovali obávanou Bohmovu difuzi vedoucí ke značným tepelným ztrátám.
- 10. srpna 1978 v Národní laboratoři pro fyziku plazmatu v Princetonu na **tokamaku PLT** (Princeton Large Torus) úspěšně použili dodatečný ohřev čtyřmi vysokoenergetickými svazky neutrálních atomů, každý o výkonu 0,9 MW a dosáhli rekordní teploty plazmatu 82 milionů stupňů.
- 25. července 1983 – před dvaceti pěti roky – zapálil **největší tokamak na světě – evropský JET** – první plazma, čímž zahájil svoji tak úspěšnou kariéru.



O. A. Lavrentev – muž, který inicioval výzkum řízené fúze v bývalém Sovětském svazu.
(foto: Archiv ÚFP)

OD TOKAMAKU T-1 K PROJEKTU ITER

Před padesáti roky bylo v Ústavu pro atomovou energii I. V. Kurčatova spuštěno zařízení tokamak T-1.

Jako autoři návrhu tokamaku byli dlouho uváděni pozdější laureáti Nobelovy ceny A. D. Sacharov a jeho učitel I. E. Tamm. Po nuceném vystěhování disidenta Sacharova do Gorkého se v ruském tisku z pochopitelných důvodů objevovalo pouze jméno I. E. Tamma. Po přestrojce naopak přibýlo ještě jedno jméno – O. A. Lavrentev. Teprve zpřístupnění archivů prezidenta Ruské federativní republiky v roce 2001 plně odhalilo Lavrentevovu úlohu při výzkumu řízené fúze v bývalém Sovětském svazu a mluvíme-li o tokamaku, je třeba uvést tři jména. Nebo snad čtyři? Byl to L. A. Arcimovič, který zpočátku vedl výzkum fúze v bývalém Sovětském svazu na třetinu úvazku – zbývající třetiny pracovní doby separoval uran 235 – což stačilo, aby mohl novosibirské auditorium v roce 1968 ohromit rekordní teplotou dosaženou ve fúzním zařízení.

Když Lavrentev poprvé navštívil v doprovodu vedoucího laboratoře I. N. Golovina v roce 1951 LIPAN – *Laboratoriju Izmeritelnyh Priborov Akademii Nauk*, což byl kryptonázev dnešního Kurčatovova ústavu –, uviděl v rohu u okna stát na stole toroidální komoru ovinutou elektromagnetickými cívkami. Zeptal se Igora Nikolajeviče, k čemu „to“ je dobré. Golovin odpověděl, že se „ustanovka“ postavila podle první idey A. D. Sa-

charova. Ovšem již během stavby se objevily myšlenky nové (pinč) a experiment uklidili do rohu, kde na něm experimentovali pouze pavouci. Tak se Lavrentev seznámil s předchůdcem tokamaku.

TOroidálnaja KAmera i MAgnitnyje Kатуški – toroidální komora a magnetické cívky – TOKAMAK.

Jak už tomu bývá u velkých objevů, neobjevila se ani myšlenka tokamaku z ničeho nic. Ve svých pamětech Sacharov píše, že o řízené fúzi poprvé přemýšlel v roce 1949 ve vlaku z Moskvy do Arzamasu. Rozhodujícím impulzem byla žádost P. L. Beriji o stanovisko k dopisu seržanta O. A. Lavrenteva, ve kterém se objevil návrh sférického urychlovače uvolňujícího fúzní energii. Ionizovaný plyn Lavrentev od stěn reaktoru hodlal izolovat elektrostatickým polem. Sacharov se obával tepelné destrukce elektrod vytvářejících elektrostatické pole a nahradil ho polem magnetickým a kulový tvar zaměnil tvarem toroidálním. Dlužno podotknout, že toroidální geometrie nebyla začátkem padesátých let ve výzkumu řízené fúze žádnou novinkou. Již v roce 1947 Sir G. P. Thomson s M. Blackmanem podali přihlášku patentu „Vylepšení zařízení pro vývoj v plynu tak, aby umožnilo termojadernou reakci“. Jejich komora měla toroidální tvar.

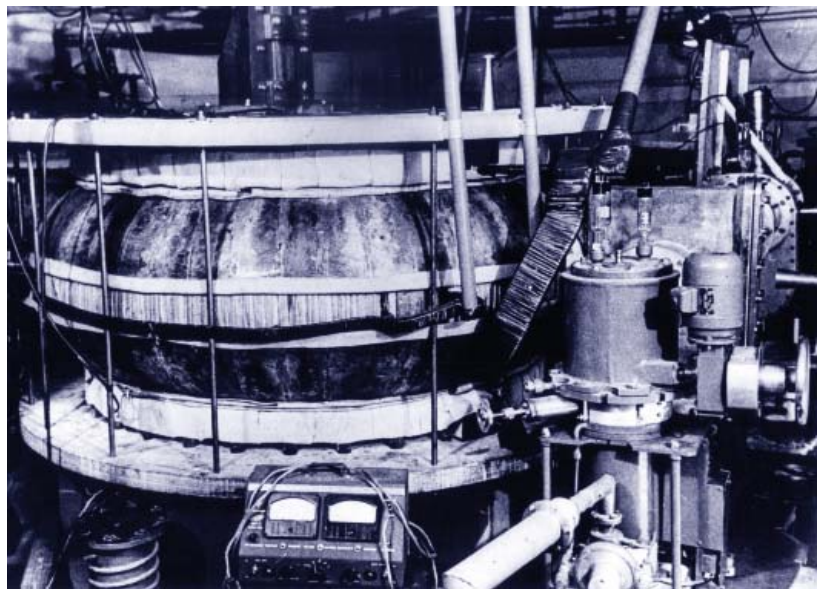
Začátek padesátých let zastihl výzkum řízené fúze ve znamení pinčů. V Austrálii již dlouho předtím zjistili, že elektrický proud blesku protékající dutým hromosvodem zanechá trubkový vodič trvale zmačknutý. Když proud dokáže zmačknout pevnou látku, což tepr-

ve ionizovaný plyn! Podle Bennetova kritéria by měla teplota plazmatu růst s kvadrátem intenzity výbojového proudu, což nabízelo zdánlivě jednoduchý způsob, jak dosáhnout termojaderné teploty. Výbojový proud má snahu zmenšovat svůj příčný průřez vlastním magnetickým polem a tím zahřívá ionizovaný plyn nacházející se ve výbojové dráze. Proces se ve fyzice plazmatu zabydlel pod názvem *pinč*. V roce 1952 se podařilo Angličanovi J. Tuckovi v Los Alamos prosadit pinčový program, který skromně nazval Perhapsatron (perhaps = snad). Jaký rozdíl od ambiciózního generátoru hvězd – stelarátoru – L. Spitzera v Princetonu. Od roku 1954 v Harwellu fungoval legendární toroidální pinč ZETA (*Zero Energy Thermonuclear Assembly*). Konečně pinč, na kterém v době moskevské etapy Lavrentěva chtěla skupina Oddělení výzkumu plazmatu v LIPAN pod vedením Golovina dosáhnout termojaderných podmínek, používal také skleněný torus. Toroidální pinče byly částečně stabilizovány podélným (toroidálním) magnetickým polem. Thoneman v Oxfordu použil k zapálení pinče transformátor, kdy výboj představoval sekundární vinutí.

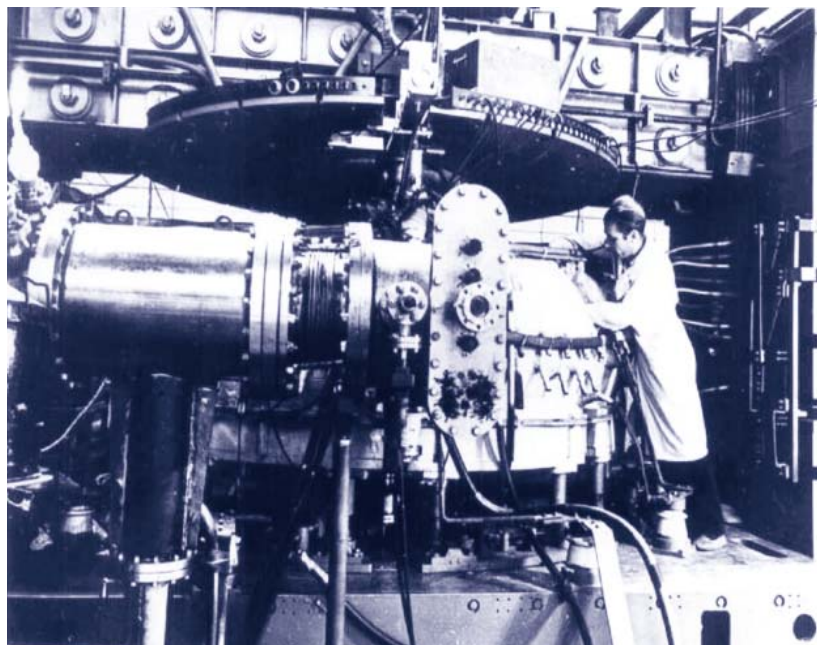
Sacharov tedy o jiném než toroidálním tvaru komory neuvažoval. Zatímco v jednoduchých solenoidálních magnetických polích, která později používala magnetická zrcadla, unikalo plazma podél siločar otevřenými konci, stočíme-li solenoid do prstence (toru), odstraníme sice „otevřené konce“ siločar, které zůstanou celé uzavřeny v plazmatu, ale plazma bude unikat na stěny díky takzvanému toroidálnímu driftu. Sacharov se po diskusi s Tammem rozhodl eliminovat tento drift zkroucením toroidálních siločar do šroubovicového tvaru. Šroubovicového tvaru nabude čistě toroidální pole přičtením poloidální složky. Nechá se ukázat, že tato konfigurace magnetického pole skutečně toroidálnímu driftu nepřeje.

Původní návrh generátoru poloidálního magnetického pole ve tvaru vodiče zavěšeného ve výbojové komoře nahradil Sacharov provazcem plazmatu vyplňujícím výbojovou komoru. Princip tokamaku byl na světě! Vzhledem k tomu, že se šroubovicové siločary po oběhu kolem osy toroidu neuzavřou samy na sebe, mohou vytvářet takzvanou magnetickou plochu. Magnetickými plochami se Tamm zabýval již v učebnici „Základy teorie elektřiny“ v roce 1937. Sacharovův *Toroidálníj Těrhojaděrnij Reaktor* změnil I. E. Tamm na obecnější MTR – *Magnitnyj Termojadernij Reaktor*. Krátká přestávka ve výzkumu tokamaku zapříčiněná odbočkou ke slibně vyhlížejícím pinčům byla díky neřešitelným nestabilitám pinče ukončena a v LIPAN se stavěly další tokamaky. Mimochodem, pinče nebyly jedinou odbočkou od tokamakového programu. Tou druhou byly již zmíněné otevřené magnetické nádoby, které se předvedly mohutnými stroji, jako byl OGRA (*Odin GRAM nějtronov v sutki* – jeden gram neutronů denně) v Moskvě či DSX v Oak Ridge. Dnes přežívají zrcadla v Novosibirsku.

V roce 1955 bylo postaveno první zařízení podobné dnešnímu tokamaku. Torus s magnetickým polem (TMP) měl keramickou výbojovou komoru a energie vyzářená nečistotami odpařenými z povrchu komory nedovolila překročit teplotu 30 eV. V roce 1957 se začalo stavět zařízení, které bylo spuštěno začátkem následujícího roku. T-1 bylo první zařízení, které vysloužilo jméno „tokamak“, viz obr. 1. Zajímavé je, že první článek o novém zařízení slovo tokamak zkomolil na „toko-



Obr. 1 Tokamak T-1 byl prvním nositelem názvu tokamak. (zdroj: www.toodlepip.com/tokamak/gallery-ext.htm)



Obr. 2 Tokamak T-3 zahájil světovou éru tokamaků. (zdroj: EFDA JET)

mak“ [1]. Tato zkomolenina pak ještě dlouho přežívala, zejména v japonských odborných člancích. T-1 měl komoru vyrobenou z nerezové oceli a nebyl ve fúzní komunitě pochopitelně vůbec známý.

„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 očistcem. Pokud snad mohou být nějaké pochybnosti o tom, že problém termojaderné fúze bude vyřešen, pak pouze není jasné, jak dlouho se v očistci zdržíme. Z něho musíme vystoupit s ideální vakuovou technikou, přesně určenou geometrií magnetických siločar, s naprogramovanými režimy elektrických obvodů, nesouce v rukou klidné, stabilní vysokoteplotní plazma, čisté jako mysl teoretického fyzika, ještě nenarušeného setkáním s experimentálními fakty.“

» ITER je druhý největší vědecko-technický projekt v dějinách lidstva po ISS. «

Nic lépe nevystihuje situaci, která nastala v šedesátých letech ve výzkumu řízené termojaderné fúze, než citát L. A. Arcimoviče. Čisté plazma bez příměsí a pokud možno bezchybné magnetické pole – to byl recept, který vedl v Novosibirsku k úžasné zprávě o desetkrát větší teplotě, než byla do té doby vůbec dosažena. Pět milionů stupňů byla teplota iontů a osm milionů stupňů byla teplota elektronů na tokamaku T-3, obr. 2.

Je na čase si říci, v čem se lišily méně úspěšné toroidální pinče typu ZETA či jeho ruské obdoby ALFA od úspěšného tokamaku. Tvar komory (toroidální) – stejný, způsob buzení elektrického proudu v plazmatu (transformátor) – stejný, typy magnetických polí (toroidální – vnějších cívek, poloidální – elektrického proudu v plazmatu) – stejné!

Přesto ZETA nedosáhla pěti milionů stupňů a tokamak ano.

V lednu 1958 informoval anglický tisk o obrovském úspěchu britských vědců, kterým se podařilo na zařízení ZETA „zapálit“ termojadernou fúzi. L. A. Arcimovič komentoval zprávy o fúzních neutronech ZETA lapidárně: „Hloupost!“ Nicméně V. D. Šafranov a S. I. Braginskij podle obrázků zveřejněných v anglických novinách usoudili, že Britové nezávisle na nich postavili zařízení podobné jejich tokamaku. Později se ukázalo, že Šafranov s Braginským se mýlili. Tokamak patřil i nadále jen Moskvě!

Rozdíl byl v relativních intenzitách toroidálního a poloidálního magnetického pole. Zhruba řečeno – zatímco propagátoři pinčů nejprve vyrobili výboj, a pak se ho snažili uklidnit vnějším magnetickým polem, Sacharov s Tammem nejprve vyrobili silné vnější magnetické pole coby izolant/stabilizátor, a teprve pak v něm ohřáli plazma. V tokamacích bylo splněno kritérium stabi-

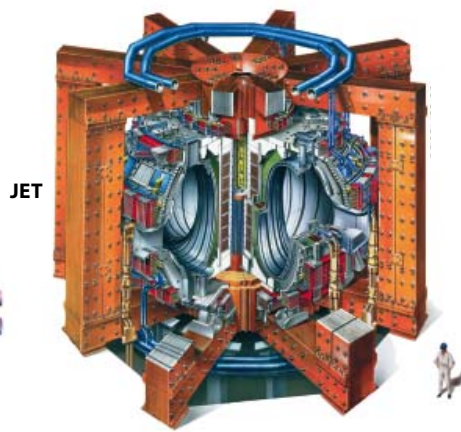
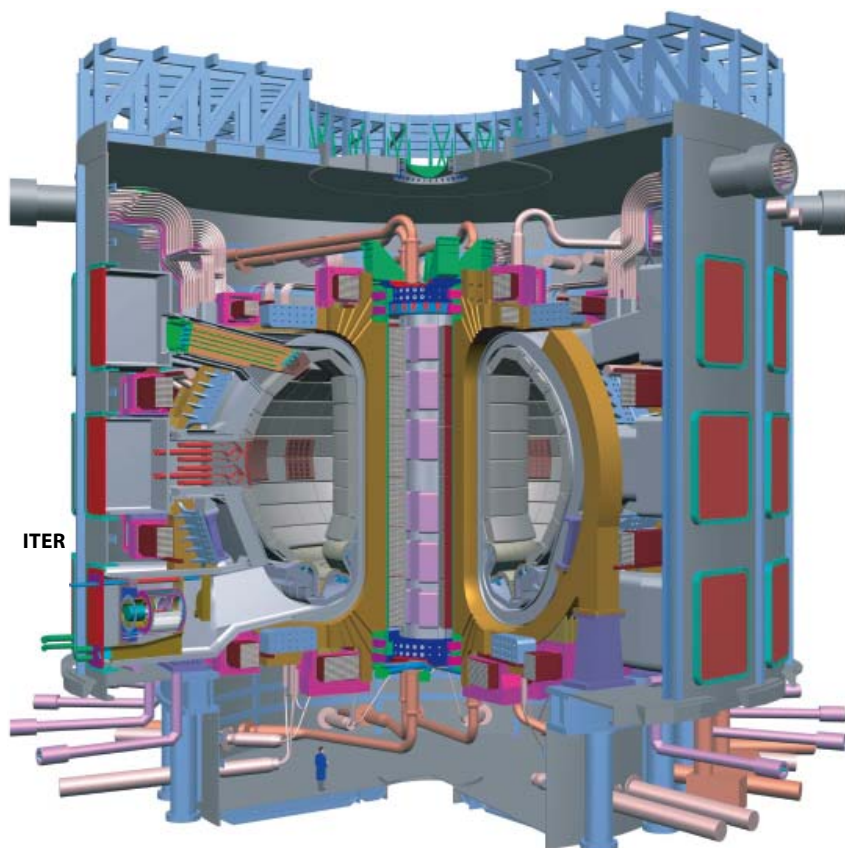
ty Šafranova-Kruskala, jinými slovy tzv. bezpečnostní faktor (v ruské odborné literatuře známý i jako tzv. zásoba stability) q byl větší než jedna. Toroidální pole tokamaku bylo mnohem silnější než používaly pinče. Bezpečnostní faktor q je definován pro kruhový průřez magnetického povrchu takto:

$$q = B_T \cdot a / B_p \cdot R,$$

kde B_T je intenzita toroidálního a B_p poloidálního magnetického pole, R je velký a je malý poloměr plazmatu. Jde tedy v podstatě o převrácenou hodnotu stoupání šroubovicových siločar, větší q značí pomalejší stoupání. „Jemný“ rozdíl v bezpečnostním faktoru q mezi tokamakiem T-1 a ZETA demonstrovali v roce 1958 v Moskvě tím, že snížili více než desetkrát intenzitu toroidálního magnetického pole v tokamaku T-1, čímž v podstatě smazali rozdíl mezi T-1 a ZETA a dosáhli stejných výsledků jako Angličané.

Nevýhoda tokamaků oproti pinčům spočívá v relativně malém poměru tlaku plazmatu a tlaku magnetického pole. To je daň za to, že plazma tokamaku je stabilní a plazma má lepší dobu udržení. Chceme-li vyšší hustoty plazmatu, potřebujeme silnější magnetické pole. Zvyšování intenzity magnetického pole ovšem naráží na technické obtíže – obrovské silové působení cívek, spotřeba energie, u supravodičů pokles kritické teploty. To vše je důvodem, proč pokračuje výzkum toroidálních pinčů (*Reversed Field Pinch*), které mohou pracovat s vyššími hustotami plazmatu (RFX Padova, Itálie, MST v USA, Extrap ve Švédsku a jiné).

Je 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 (*Tokamak Fusion Test Reactor*, USA), JT-60 (*Japan Tokamak*, Japonsko), T-15 v bývalém SSSR a především tokamaku JET (*Joint European Torus*), viz obr. 3, v anglickém Culhamu a provozovaného EURATOM, později EFDA (*European Fusion Development Agreement*). Zvětšování objemu plazmatu zlepšuje totiž jeho tepelnou izolaci, a tím i prodlužuje dobu udržení energie plazmatu. 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



Obr. 3 Tokamak JET a ITER. Srovnání největšího tokamaku na světě – evropského tokamaku JET a mezinárodního tokamaku ITER, který se staví ve francouzském Cadarache. (zdroj: EFDA JET)

– 6 MW, 1994 – 10,7 MW), a špičkový výkon 16 MW dosažený se směsí 50 % D – 50 % T v roce 1997 opět na JET potvrdily, že nastoupená cesta je správná.

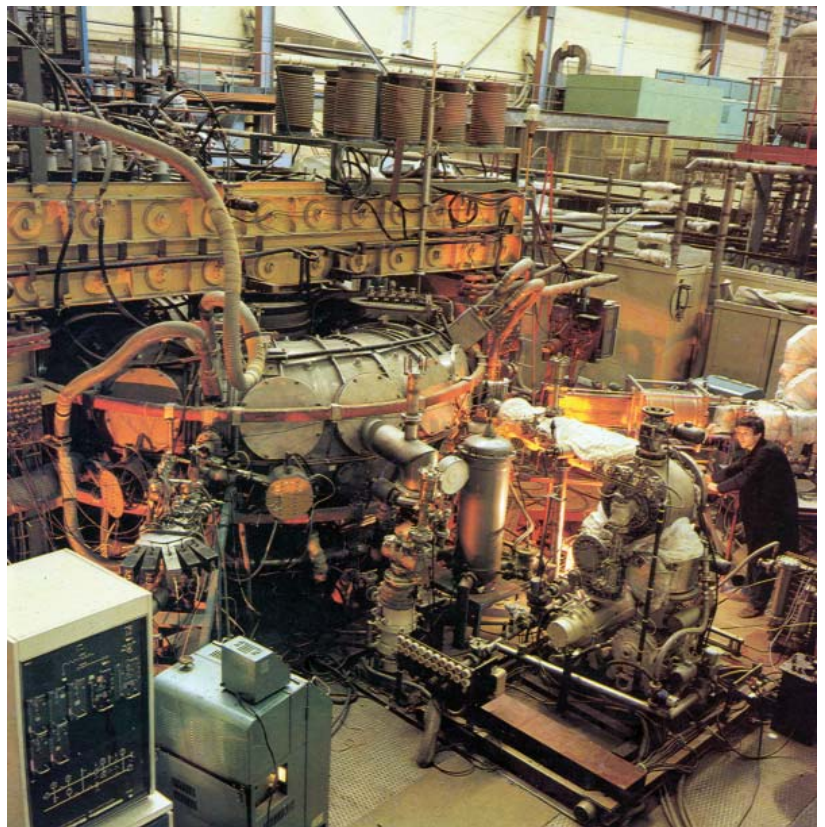
Byl to bývalý SSSR, který ústy Jevgenije Velichova, ředitele Kurčatovova ústavu a později blízkého poradce generálního tajemníka M. Gorbačova, navrhl koncem sedmdesátých let zahájit studii mezinárodního tokamaku, který později dostal název INTOR (*International Tokamak Reactor*). Právě na INTOR se vědci a inženýři učili dlouhodobé a rozsáhlé spolupráci. V případě INTOR zůstalo u řady pracovních setkání a výzkumných zpráv, takže k výrobě žádné komponenty – natož ke stavbě zařízení – nedošlo.

Ještě jako generální tajemník ÚV KSSS se Michail Gorbačov (1985) dohodl s francouzským prezidentem Françoisem Mitterandem a později i s prezidentem USA Ronaldem Reaganem na projektu ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*, viz obr. 3). 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 dávnou za své a demonstrace dobré vůle Západu a Východu ztratila smysl, stejně tak svět momentálně nepotřeboval nový zdroj energie. Tok dotací vysychal a výsledkem bylo odstoupení USA od projektu, následované redukcí původních záměrů. Současná neklidná doba opět vlila krev do žil ambiciózního projektu. Od roku 2003 se rozrostla rodina ITER opět o USA, přibyla Čína a Jižní Korea, v roce 2005 podepsala Indie a blíží se přijetí Kazachstánu. Po tvrdých a zdoluhavých jednáních byla stavba ITER v roce 2005 umístěna do lokality Cadarache na jihu Francie. Dnes již *ITER Organization* zahájila pozemní práce a podepisují se první smlouvy o dodávkách komponent a služeb.

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 konfigurace (elektrický proud v plazmatu obrátí/reverzuje směr vnějšího magnetického pole, čímž lze také vytvořit uzavřené magnetické plochy), elektromagnetická udržení. Žádný z těchto systémů nebyl z hlediska reaktoru absolutně neprůchodný, pouze ustoupil momentálně slibnějším směrům. Všechny tyto systémy měly své příznivce, kteří vytrvali i přes nepřízeň finančního počasí. Připravili tak intelektuální základnu případnému pozdějšímu vzkříšení. Příkladem budiž stavba v současné době nejmohutnějšího stelarátoru na světě – Wendelstein W7-X v německém Greifswaldu. Díky vývoji výpočetní techniky i přesnějšímu inženýrství se vědcům daří potlačovat anomální únik tepla, kvůli kterému zatím stelarátory pracují tak trochu ve stínu tokamaků.

Omezujícím faktorem délky pulzu – pozor, nezaměňovat s dobou udržení energie plazmatu – v tokamaku jsou tepelné ztráty v magnetických cívkách, které mohou způsobit jejich destrukci. Řešením jsou *supravodivé cívky*. Jakmile je jednou ve vnitřní supravodivého magnetu vybuzen elektrický proud, elektrická energie je třeba pouze k pohonu chladicího – kryogenního – systému, který udržuje teplotu cívek v blízkosti absolutní nuly.



Obr. 4 Tokamak T-7 – první tokamak se supravodivým vnutím (zdroj: UFP)

Ve vzdálenosti přibližně 2 metry od cívky, ve výbojové komoře, je přítomná teplota plazmatu stovky milionů stupňů. Supravodivé cívky magnetických polí tak umožňují dlouhotrvající výboje, bez nebezpečí tepelného poškození cívek.

Tokamaky, které využívají této technologie, označujeme jako supravodivé. To ale neznamená, že vnitřní všech tří soustav magnetických cívek jsou u takového zařízení supravodivé.

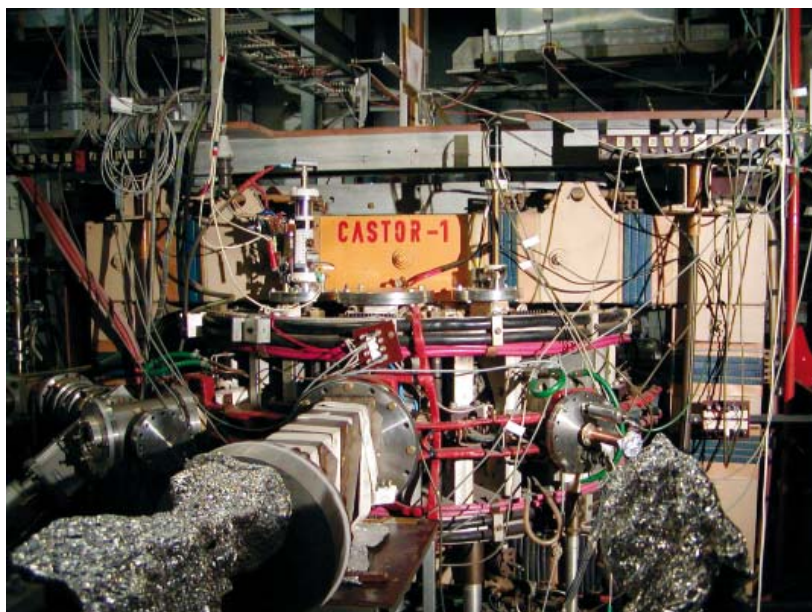
První supravodivé tokamaky měly supravodivé jen cívky toroidálního pole. Vůbec prvním tokamakem, který supravodič zařadil do své výbavy, byl v roce 1979 ruský T-7, viz obr. 4, v kolébce tokamaků v Kurčatovově ústavu atomové energie v Moskvě.

Významnými výsledky do světové fúzní databanky přispívá francouzský supravodivý tokamak Tore Supra, fungující v Centru pro jadernou energii Cadarache.

V Ústavu fyziky plazmatu Čínské akademie věd v Hefei zahájil supravodivou etapu tokamak HT-7 roce 1990. HT-7 byl přestavěný ruský T-7. Mimořádně supravodivý tokamak T-7 byl koncem osmdesátých let nejprve nabídnut Praze. Sám tokamak T-7 patřil k největším zařízením svého druhu na světě, a navíc vybaven kryogenní technikou by pro Prahu znamenal značné investice finanční a personální. Praha nabídku s díky odmítla. Teprve potom Moskva nabídla tokamak T-7 Číně, která přijala.

První celosupravodivý tokamak na světě je v Číně a jmenuje se *Experimental Advanced Superconducting Tokamak* neboli EAST (východ). EAST zažehl první plazma v září 2006. Plazma by mělo časem dosáhnout teploty 50 až 100 milionů stupňů a pulz by měl trvat 1 000 sekund. Přibližně stejnou dobu jako u ITER. V návaznosti na tokamaky v USA tokamak EAST též plně podporuje možnosti řízení ze vzdálené laboratoře.

» Termojaderný výzkum je nejrozsáhlejší mezinárodní vědeckou spoluprací. «



Obr. 5 Tokamak CASTOR – první tokamak v České republice (1977–2007) (foto: Archiv ÚFP)

Počátkem června 2008 předvedl první plazma druhý celosupravodivý tokamak KSTAR (*Korea Superconducting Tokamak Advanced Research*) v korejském Národním ústavu pro výzkum fúze sídlícím v Daejo. Konečně třetím celosupravodivým tokamakem bude tokamak SST-1 (*Steady-state Superconducting Tokamak*), který staví Ústav pro výzkum plazmatu v indickém Gandhinagaru.

Během padesátileté historie tokamaku došlo k několika událostem, které stojí za to, aby byly zdůrazněny:

1. Na počátku systematického výzkumu řízené fúze byla mystifikace: zpráva argentinského prezidenta J. Peróna o tom, že Argentina zvládla řízenou fúzi, vedla ke schválení státního plánu výzkumu magnetického termojaderného reaktoru v Sovětském svazu a v USA k podepsání smlouvy známé pod názvem Matterhorn s Princetonskou laboratoří fyziky plazmatu (PPPL). Bylo to v roce 1951.
2. Iniciátorem idey tokamaku byl člověk, který se o tom, že podnítil výzkum fúze v SSSR, dozvěděl až po dvaceti letech a dokázat tuto skutečnost mohl po padesáti letech. Ač pomohl na svět tokamaku, zůstal O. A. Lavrentěv celý život věrný elektrostatickému, resp. jeho přímému následníku – elektromagnetickému – udržení.
3. Tři státy si našly k fúzi tři vlastní přístupy, které se, nehledě na množství odboček, pěstují do dnešní doby. Byly to USA – stelarátor, Spojené království – toroidální pinč, Sovětský svaz – tokamak.
4. Zatímco analýza pinčového zařízení ZETA pomohla při návrhu tokamaku T-3, analýza stelarátoru stavbu tokamaku T-3 pozdržela. Právě tokamak T-3 zahájil úspěšné tažení tokamaků fúzním světem.
5. Pedagogika doporučuje postupovat od jednoduchého ke složitějšímu. Při výzkumu fúze tomu tak nebylo vždy. Nejprve byly toroidální magnetické nádoby, a pak se objevila magnetická zrcadla – mnohem jednodušší lineární magnetické nádoby.

V současné době pracuje na celém světě téměř sedmdesát tokamaků. Následující tabulka přináší srovnání vybraných parametrů návrhů fúzních reaktorů. Návrhy Thomson/Blackman a Sacharov/Tamm se nerealizovaly, ITER se staví.

	Thomson/ Blackman, 1947	Sacharov/ Tamm, 1951	ITER, 2001
Velký poloměr R_0	1,3 m	12 m	6,2 m
Malý poloměr a	0,3 m	2 m	2 m
Proud plazmatem I_p	0,5 MA		17 A
Magnetické pole B_T		5 T	5,3 T
Fúzní výkon		880 MW _{DD}	500 MW _{DT}

CESTA ÚSTAVU FYZIKY PLAZMATU K TOKAMAKU COMPASS

1. dubna 2008 byl v Ústavu fyziky plazmatu slavnostně odhalen tokamak COMPASS.

To, že se UKAEA dohodla s ÚFP AV ČR, v. v. i., nebyla náhoda. ÚFP má ve výzkumu vysokoteplotního plazmatu dlouhou tradici. Příští rok tomu bude padesát let, kdy byl založen Ústav fyziky plazmatu ČSAV pověřený od samého počátku koordinací výzkumu řízené termojaderné fúze v Československu. Díky úzké spolupráci s ústavu v Moskvě, Charkově, Leningradě, Suchumi a v Novosibirsku, které patřily na začátku druhé poloviny minulého století ke světové špičce, se Československo vzdělávalo jak teoreticky, tak experimentálně v bouřlivě se rozvíjející fyzice vysokoteplotního plazmatu. První české toroidální zařízení Intermezzo vstoupilo v roce 1974 do světové historie experimentálním důkazem teorie neinduktivního buzení elektrického proudu v plazmatu. Část unikátní teorie vznikla rovněž na půdě ÚFP [2, 3].

Jak bylo výše uvedeno, prvním tokamakem, který zařadil do své výbavy supravodič, byl ruský T-7 v kolébe tokamaků v Kurčatovově ústavu atomové energie v Moskvě. Významnou měrou se na zavedení novinky podílelo i bývalé Československo. V roce 1982 vlnododá aparatura vyvinutá a vyrobená v Ústavu fyziky plazmatu ČSAV generovala v plazmatu tohoto tokamaku proud 200 kA, což byl tehdy světový rekord. Další účast české techniky zaznamenal největší ruský tokamak T-10, který byl uveden do provozu v roce 1979 a který stále funguje. Jinými slovy, i špičkové vybavení dovezené z Československa je dosud rovněž funkční. Pro společné experimenty na tomto tokamaku bylo z tehdejšího Československa dodáno v 80. letech přes 30 kusů unikátních heliových kryostatů (Ferox Děčín) pro supravodivé magnety ruských vysokofrekvenčních generátorů (gyrotroňů), přičemž samotné supravodivé magnety byly vyrobeny z ruského vodiče v BEZ v Bratislavě a nalaďeny v Elektrotechnickém ústavu SAV tamtéž.

Malý tokamak TM1-MH převzatý v roce 1977 z Moskvy a nedlouho poté kompletně přestavěný na CASTOR se stal ve východním bloku legendou a také díky němu se Česko zařadilo mezi první postkomunistické státy, které podepsaly asociaci s EURATOM již v roce 1999. A když o pět let později vstupovalo Česko jako jeden z deseti států do Evropské unie, jako jediná země s sebou brala tokamak!

Tokamak CASTOR (*Czech Academy of Sciences TORus*, 1984), viz obr. 5, byl dostaveníčkem odborníků východní Evropy: NDR, Rumunska i SSSR. Po listopadu 1989 se dokázalo Oddělení tokamak velmi rychle přizpů-

sobit novým možnostem a navázalo pracovní kontakty s předními evropskými laboratoři na západ od našich hranic. Vyvrcholením těchto snah byl rok 1999, kdy byla Ústavem fyziky plazmatu AV ČR za Českou republiku podepsána asociční dohoda EURATOM-IPP.CR, kterou Česko vstoupilo do „termojaderné Evropské unie“. Jak už název dohody napovídá, je Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i. (Institute of Plasma Physics, IPP) garantem účasti České republiky ve fúzním programu EURATOM. 75 % programu asociace zajišťuje samotný ÚFP, na zbylých 25 % se podílejí další vědecké ústavy a vysoké školy naší Asociace: Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s., Ústav aplikované mechaniky Brno, s. r. o., Ústav fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského AV ČR, v. v. i., Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, Ústav jaderné fyziky AV ČR, v. v. i., a Matematicko-fyzikální fakulta UK.

Podepsáním asociční dohody se Česku otevřely dveře k největším termojaderným evropským experimentálním zařízením. Rozsáhlá je spolupráce Oddělení tokamak s ostatními asociacemi: CEA (Francie), ENEA (Itálie), ETAT Belgie (Belgie), CIEMAT (Španělsko), IST (Portugalsko), HAS (Maďarsko), VR (Švédsko), OAW (Rakousko), Tekes (Finsko), FZK (Německo), UKAEA (Spojené království), Confédération Suisse (Švýcarsko), a samozřejmě se střediskem evropského fúzního výzkumu JET (Joint European Torus). 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 Novosibirsku, Fyzikálním ústavem v gruzínském Tbilisi a konečně s univerzitou ve Lvově na Ukrajině. Ústav fyziky plazmatu se rovněž podílí na programu INTAS nastartovaném v roce 2003, kterým Evropská unie podporuje vědu ve státech bývalého Sovětského svazu.

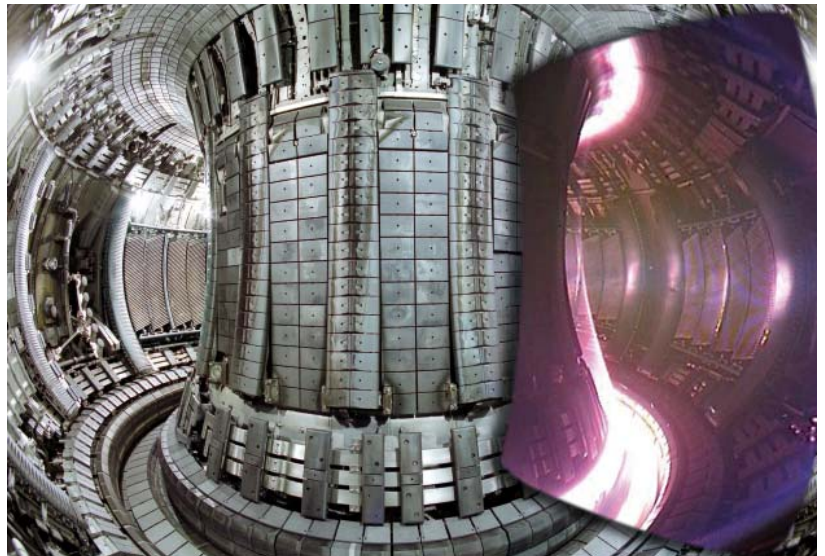
Bezesporu nejsledovanějším počinem světové termojaderné komunity je příprava a stavba Mezinárodního termojaderného experimentálního reaktoru ITER. Od samého počátku se na ambiciózním projektu podíleli odborníci z ÚFP. V letech 1990 až 1994 byly vyvinuty modely pro numerické simulace interakce dolně hybridních vln s elektrony a alfa částicemi, to je s reaktorovým plazmatem. Dalším příspěvkem je vývoj speciálních Hallových sond pro měření magnetického pole v plazmatu ITER.

Technologická témata týkající se neutronové zátěže, tepelného a mechanického namáhání materiálů pro ITER zpracovávají Ústav jaderné fyziky AV ČR, Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s., a Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. Spolupracuje i průmysl – Škoda Výzkum, s. r. o., Vítkovice Research and Development, s. r. o. a další. V informační brožuře vydané Ústavem jaderného výzkumu Řež, a. s., „Czech Industry for ITER“ nabízí pro ITER své služby dvacet osm společností z České republiky. Více viz <http://www.czech4iter.cz>.

Zkušenosti Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., a návrh kvalitního vědeckého programu práce byly pro UKAEA dostatečnou zárukou využití tokamaku COM-PASS v Praze.

Poděkování

Jsem rád, že mohu za řadu podnětných připomínek poděkovat řediteli Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., prof. Pavlu Chráskovi a kolegům z téhož ústavu



Obr. 6 Vakuová komora tokamaku JET s vloženým obrázkem výboje (zdroj: EFDA)

RNDr. Janu Mlynářovi, Ph.D., a Ing. Františku Žáčkovi, CSc.

Literatura

- [1] G. G. Dolgov-Saveljev a kol.: *4th ICPiG*. Uppsala 1959, Vol. 2, s. 947.
- [2] R. Klíma, V. Petržílka: „The energy momentum tensor for an electromagnetic wave in plasma“. *Phys. Lett.* **43A**, 151 (1973).
- [3] J. Preinhaelter, V. Kopecký: „Penetration of high-frequency waves into a weakly inhomogenous magnetized plasma at oblique incidence and their transformation to Bernstein modes“. *J. Plasma Phys.* **10**, 1 (1973).

Doporučená literatura

- C. M. Braams, P. Stott: *Nuclear Fusion – Half a Century of Magnetic Confinement Fusion Research*. IoP, Bristol-Philadelphia, 2002.
- G. S. Voronov: *Šturm termojaderné kreposti*. Nauka, Moskva 1985.
- G. McCracken, P. Sott: *Fúze – energie vesmíru*. Mladá fronta, edice Kolumbus, Praha 2006; překlad anglického originálu *Fusion – the Energy of the Universe*. Elsevier, Amsterdam, ..., Tokyo 2005.
- M. Řípa, V. Weinzettl, J. Mlynář, F. Žáček: *Řízená termojaderná syntéza pro každého*. ÚFP AV ČR & ČEZ, a. s., 2005.



L. A. Arcimovič – fúzní fyzik světového formátu při návštěvě Ústavu fyziky plazmatu ČSAV v roce 1964 (foto: Archiv ÚFP)