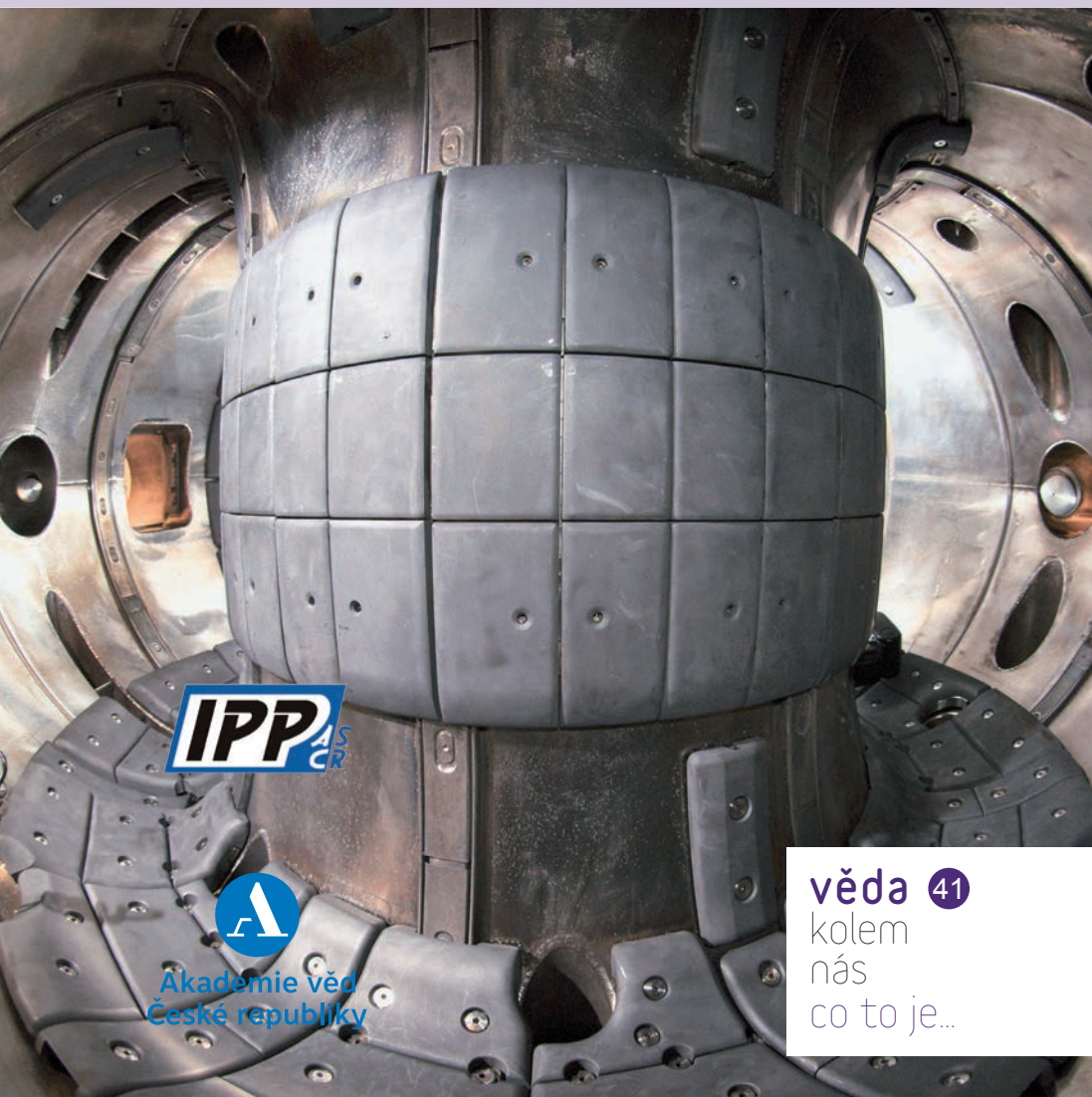


Historie výzkumu řízené termojaderné fúze v ČR



IPP AS
CZ



Akademie věd
České republiky

věda 41

kolem
nás
co to je...

Tokamak COMPASS

Tokamak COMPASS (z anglického Compact Assembly) je hlavním experimentálním zařízením Oddělení tokamak. Původně byl zkonstruován a provozován v devadesátých letech v UKAEA ve Velké Británii a dočasně vyřazen z provozu v roce 2002 z důvodu instalace nového tokamaku MAST.

Tokamak COMPASS se řadí svými rozměry (hlavní poloměr 0,6 m a výška komory přibližně 0,7 m) k menším tokamakům, umožňujícím operaci s H-módem, který představuje standardní referenční režim tokamaku ITER. Důležité je, že díky své velikosti a tvaru odpovídá plazma COMPASSu jedné desetíně (v lineárním měřítku) plazmatu v ITERu. Právě kvůli své relevantnosti byl na podzim roku 2004 COMPASS nabídnut Evropskou komisí a UKAEA Ústavu fyziky plazmatu. Instalace a provoz tokamaku COMPASS řadí Českou republiku mezi země s pokročilým výzkumem vysokoteplotního plazmatu a termojaderné fúze. V současnosti existují v Evropě kromě COMPASSu pouze dva tokamaky s konfigurační podobnou ITERu a s H-mód režimem. Jedná se o JET (Joint European Torus) a německý tokamak ASDEX-U (Institut für Plasmaphysik, Garching). JET je momentálně největším experimentálním zařízením tohoto typu na světě.

Parametry tokamaku COMPASS

Parametr	Hodnota
hlavní poloměr R	0,56 m
vedlejší poloměr a	0,23 m
proud v plazmatu I_p (max)	400 kA
magnetické pole B_T (max)	0,9–2,1 T
tlak vakua	1×10^{-6} Pa
elongace	1,8
tvar plazmatu	D, SND, elipsa, kruh
délka pulzu	~ 1 s
ohřev svazky P_{NBI} 40 keV	$2 \times 0,4$ MW

Fyzikální program

- fyzika H-módu
 - fyzika pedestalu
 - práh L-H přechodu, izotopický efekt
 - nestability ELM (Edge Localized Modes), jejich kontrola pomocí magnetické perturbace a vertikálních rázů
 - zonální toky
 - transport v okrajovém plazmatu a „scrape-off layer“
- turbulentní struktury a intermitence v okrajovém plazmatu – experimenty a modelování
- MHD rovnováha a nestability

Úvod

Podzim na břehu Ženevského jezera ten rok nebyl vůbec příjemný. Místo babího léta chladný déšť a slunce se neukázalo, jak byl den dlouhý. Dlouhé kabáty byly povinnou výbavou tisíců dočasných obyvatel Ženevy. Psal se rok 1958 a nedostatek slunce je až tak nezajímá. Měli oči jen pro jeho příbuzného pod střechou Palais des Nations. Slágrem II. konference, kterou pod názvem „Peaceful Uses of Atomic Energy“ pořádaly Spojené národy, byla řízená termojaderná fúze...

Členem dvaatřicetičlenné delegace z Československa byl Ing. Jan Váňa, ředitel Výzkumného ústavu vakuové elektrotechniky v Praze. Nebyl sám, kdo propadl euforii z vidiny, která posluchače ovládla při sledování přednášek o dosud zapovězeném tématu – euforii z vidiny bezpečné, ekologické, surovinově zcela zabezpečené jaderné energie uvolněné termojaderným slučováním. Uvolňování energie jádra slučováním – procesem opačného směru než bylo známé štěpení jader těžkých prvků!

Na dlouhých procházkách hrbolatými ženevskými uličkami probírali nové téma s dr. Milošem Seidlem, vedoucím sektoru 37 Výzkumného ústavu vakuové elektrotechniky, kterému šéfoval. Na cestě do Prahy byl Jan Váňa rozhodnut.

Nositel ceny Klementa Gottwalda za úspěšnou výrobu miniaturních elektronek měl přezdívku „Bulik“. V mládí oblékal rohovnické rukavice a zmíněná cena neměla v žádném případě politický podtext. Jan Váňa byl schopný a vytrvalý člověk, který šel tvrdě za svým cílem. Vyprávělo se o něm, že dokázal na Vltavě podplavat parník. Sám jsem viděl, jak už jako šedesátiletý ředitel spadl do odkrytého kanálu s rotačními vývěvami a rozřízl si ruku o opřené plechy. Neřekl ani slovo, vylezl z kanálu – krev z něj tekla – a odkráčel do ředitelny. Nové téma Váňu v Ženevě doslova

Ing. Jan Váňa, první ředitel Ústavu fyziky plazmatu, s dr. Milošem Seidlem na pamětné konferenci „Atomy pro mír“ v Ženevě roku 1958

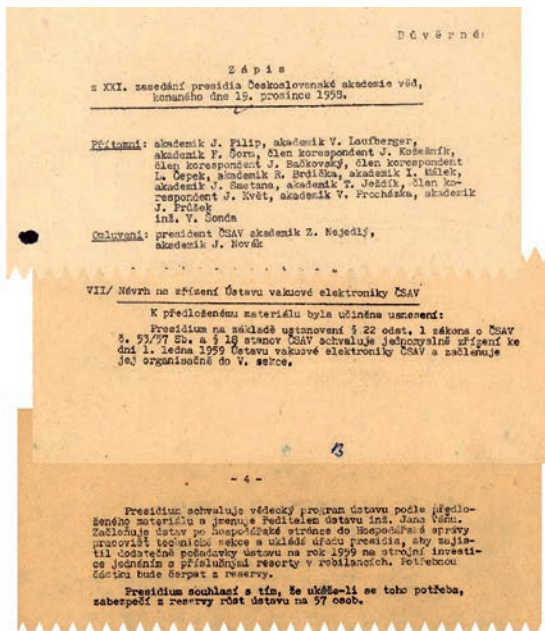




Urychlovací komora betatronu – „zakladatele“ Ústavu fyziky plazmatu ČSAV

uhranulo. Dobře věděl, že na půdě resortního ústavu se nebude moci základnímu výzkumu věnovat. Byla-li to známost s Jindřichem Bačkovským – členem korespondentem ČSAV – nebo s někým docela jiným, co mu pomohlo, se už dnes nedovíme.

Po třech měsících od ženevské konference – 1. ledna 1959 – byl na půdě Československé akademie věd založen zbrusu nový ústav. Ústav vakuové elektroniky ČSAV vedl Ing. Vaňa až do roku 1978. O jeho diplomatických schopnostech vypovídá mimo jiné i to, že dokázal ústav udržet i přes normalizační sedmdesátá léta potom, co z ústavu emigrovalo deset jeho zaměstnanců včetně třech vedoucích oddělení. Mezi nimi i jeden ze zakladatelů ústavu dr. Miloš Seidl.



Zakládací listina Ústavu fyziky plazmatu (do roku 1963 Ústavu fyzikální elektroniky) ČSAV

D ě v ě r n ě :

Z á p í s

z XXI. zasedání prezidia Československé akademie věd,
konaného dne 19. prosince 1959.

Přítomní: akademik J. Filip, akademik V. Loubeniger,
akademik F. Šora, člen korespondent J. Košeřík,
člen korespondent J. Bačkovský, člen korespondent
L. Čepák, akademik S. Brdička, akademik I. Mělek,
akademik V. Smetana, akademik F. Ježek, člen korespondent
J. Květ, akademik V. Procházka, akademik
J. Půček
inš. V. Šonda

Omluveni: prezident ČSAV akademik Z. Nejedlý,
akademik J. Novák

VII/ Něvrh na zřízení ústavu vakuové elektroniky ČSAV

K předloženému materiálu byla učiněna usnesení:

Prezidium na základě ustanovení § 22 odst. 1 zákona o ČSAV
č. 53/77 Sb. a § 19 stanov ČSAV schvaluje jednorázně sřízení ke
dni 1. ledna 1959 ústavu vakuové elektroniky ČSAV a začleňuje
jej organizačně do V. sekce.

43

- 4 -

Prezidium schvaluje vědecký program ústavu podle předloženého materiálu a jmenuje ředitelem ústavu inš. Jana Váňa.
Začleňuje ústav po souhlasu sřízce do kompoziční správy
pracovníků technické sekce a ukládá ústavu prezidia, aby sejměl
dotatečně požadovaný ústav na rok 1959 na státní investice
jedním z příslušných resortů v roblisnostech. Potřebnou
částku bude čerpat z rezervy.

Prezidium souhlasí s tím, že učtě-li se toho potřeba,
zabezpečí z rezervy růst ústavu na 57 osob.

Na přání svého ředitele dostal nový ústav od svého zakladatele, Akademie věd, hned zpočátku úkol „koordinovat budoucí výzkum řízené termojaderné fúze v Československu“.

Termojaderná fúze začala psát v Československu svoji historii.

Začátky

První tři roky své existence ústav pokračoval ve výzkumu kruhových urychlovačů. Prvních padesát zaměstnanců ústavu z VÚVETu, odkud přešli za svým ředitelem, „umělo“ betatron – kruhový urychlovač elektronů (říká se, že betatron je tokamak bez cívek podélného pole, zato s napuštěným plynem). Významným tématem současného tokamaku COMPASS v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR jsou ubíhající elektrony (*runaway electrons*). Ubíhající elektrony byly stěžejním úkolem „plazmového betatronu“, který G. P. Thomson zadal svým doktorandům Stanleyemu Cousinovi a Alanovi Waremu, zvanému Wirberlrohr, v roce 1947. Skutečný tokamak ale přišel do ústavu až v roce 1977 – paradoxem bylo, že to byl poslední rok ředitelování Ing. Jana Váni.

Spiritus agens Ústavu dr. Miloš Seidl nezapomněl na ženevské diskuse se svým představeným a přemýšlel o dalším směřování Ústavu. Ač v oblasti urychlovačů měl nevyřízené účty – pro mikrovlnný generátor radiolokátoru, kde byla snaha zkrátit generované vlnové délky pod 3 cm, se nepodařilo vyrobít mikrovlnnou strukturu extrahující záření milimetrových vln z elektronového svazku –, přemýšlel jak se přiblížit tématu, které ho stejně jako ředitele Váňu zaujalo, tedy k řízené termojaderné fúzi. Do betatronu bylo třeba napustit plyn!

Říká se, že každý začátek je těžký. Zcela určitě nesmí chybět nadšení, které překoná nevyhnutelnou nejistotu. Nadšení tím větší, čím je cíl vzdálenější, nejistější a nedosažitelnější. Ústav byl založen v době, kdy nikdo nemohl s definitivní platností prohlásit, že dosažení řízené termonukleární reakce je reálné, nebo jak dlouhou cestu bude nutno ještě projít. Riskantní program neskýtal optimistickou odpověď o budoucnosti ústavu.

Do manželství se většinou vstupuje v bouřlivém optimismu, že se vše podaří, veškeré překážky se zvládnou. Teprve během jeho trvání se objeví okolnosti, s kterými dvojice nepočítala ani ve snu. Pak záleží na trpělivosti, inteligenci a snaze, zda dvojice ve svazku zůstane a vychová potomky. Ne vždy se to podaří, ale jsou takové případy. Ústav fyziky plazmatu je jeden z nich.

Dr. Miloš Seidl v roce 1961 vytyčil dva směry, které by ústav dovedly na pokraj termojaderného bádání:

1. metody ohraničení plazmatu,
2. metody ohřevu plazmatu.

Zatímco první úkol dlouho slavil jeden úspěch za druhým, druhý se trpělivou prací posuňoval kupředu krok za krokem. V zrcadlových nádobách, kde je plazma ohraničeno relativně jednoduchým magnetickým polem, ELMAN, později REBEX (Relativistic Electron Beam Experiment), se studovalo vzájemné působení zprvu nerelativistického a později relativistického elektronového svazku s plazmatem. Vynikající součinnost teoretiků a experimentátorů proslavila originální Pražskou svazkovou školu, řada priorit se týkala virtuální katody v největším experimentálním

zařízení kompletně postaveném v ústavu REBEX (Tokamak COMPASS je zařízení větší, ale některé jeho části byly dovezeny z Culhamu). První téma se na počátku devadesátých let 20. století vyčerpalo; když vedoucí doc. Ing. Pavel Šunka, CSc., emigroval k lékařské tematice, program *ohraničení plazmatu* více méně skončil, či spíše našel pokračování ve studiu rentgenového laseru či ve výbojích v kapalinách. Neměl takové štěstí jako druhý směr – *ohřev plazmatu* –, který získal silnou podporu ve špičkových laboratořích Sovětského svazu zabývajících se výboji a ohřevem plazmatu v toroidálních nádobách.

Metody ohřevu plazmatu

Bylo zřejmé, že ohřev plazmatu pomocí vysokofrekvenčního elektromagnetického pole (VF pole), přepokládá perfektní znalost jeho šíření v plazmatu. V tuto chvíli bylo zajímavé, že řešení prvního úkolu – *ohraničení plazmatu* (magnetickým polem) –, které pracovalo s elektronovým svazkem, mělo k tematice prvních třech let ústavu, k urychlovači elektronů – betatronu, blíže než hledání způsobu ohřevu plazmatu. Plazma bylo oblastí fyziky, které se protagonisté museli naučit. A naučili se výborně! V roce 1973 Richard Klíma a Václav Petržílka publikovali dodnes citovanou práci o silovém působení VF polí na plazma. V tu dobu bylo totiž zřejmé, že fúzní svět se vydal na cestu tokamaku. Na cestu magnetické nádoby autorů D. Sacharova a E. Tamma, která dokázala udržet a ohřát plazma nejlépe ze všech zařízení, co jich do té doby bylo na světě postaveno. Tokamak měl a vlastně dosud má jeden nedostatek. V principu elektromagnetický transformátor musí fungovat s proměnlivým výkonem v primárním vinutí, což dnes představuje pulzní režim. To není pro jeho použití coby zdroje energie to pravé. Elektrický proud protékající plazmatem, nezbytný pro činnost tokamaku, je buzen induktivně. Stacionární tokamak, kterým protéká stejnosměrný elektrický proud bez přerušení, je snem svých konstruktérů. Jednu z metod, jak stacionárního proudu dosáhnout, naznačili právě Klíma s Petržílkou. Vhodným způsobem do plazmatu zavést VF pole, a tím vybudit v tokamaku nepřerušovaný vlečený elektrický proud. Už v reprezentační publikaci k 30 letům ÚFP se objevila věta: „Technologické rozbory totiž ukázaly, že životnost tokamaku s termojadernými parametry v impulsním režimu je tak malá, že pro termojaderný reaktor je nepoužitelný.“

Náhoda přeje připraveným

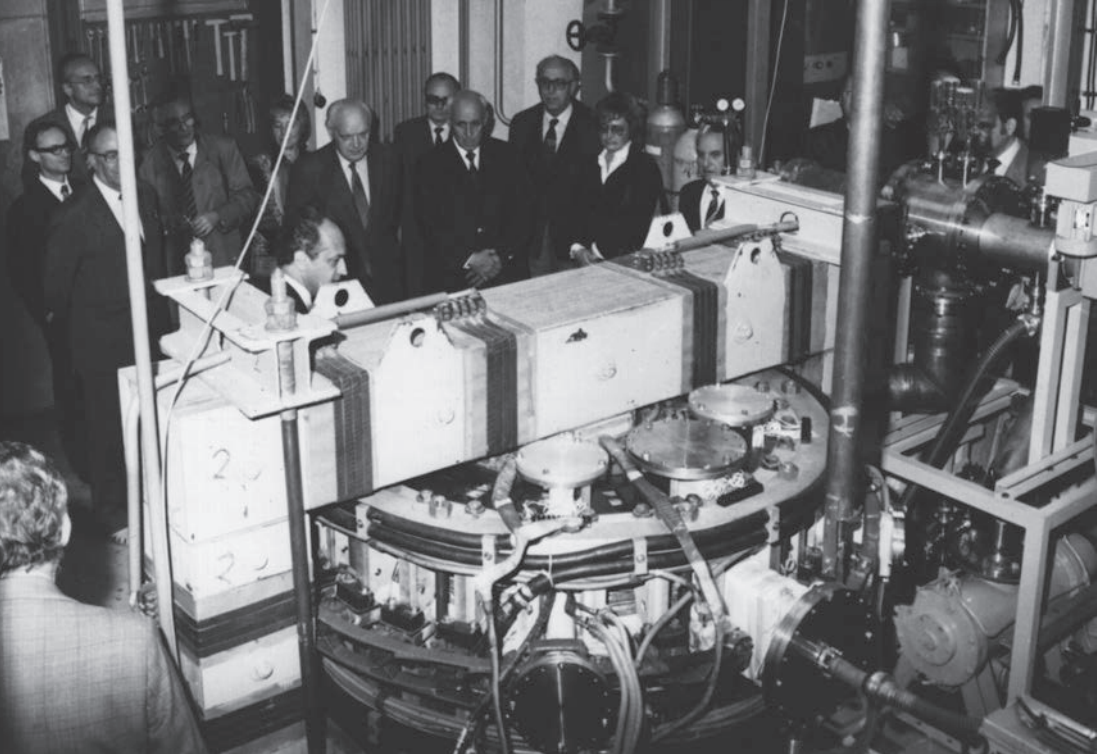
V roce 1964 se konala Pugwashská konference v Karlových Varech, které se účastnila již tehdy významná osobnost fúzního výzkumu ve světě, vedoucí sovětského fúzního programu Lev A. Arcimovič. Ředitel Ústavu fyziky plazmatu Ing. Jan Váňa Arcimoviče přemluvil k návštěvě ÚFP. Arcimovič pozvání přijal a po přednášce, doprovázen dvěma mladými zaměstnanci ústavu Pavlem Šunkou a Vojtěchem Pifflem, se prošel po Karlově městě. Během procházky se vášnivý nimrod svěřil: „Už dlouho toužím po české malorážce!“ Z Karlových Varů už L. A. Arcimovič odjížděl se samonabíjecí malorážkou vyrobenou družstvem Lověna a zakoupenou v jeho prodejně na Národní třídě v Praze a s 200 náboji. Traduje se, že Arcimovič potřeboval do české zbraně české náboje, a proto byla podepsána dohoda o spolupráci mezi Státním výborem pro atomovou energii SSSR a Atomovou komisí ČSSR. Půlročními

stážemi v ÚAE Kurčatova, jehož členy byli vynikající vědci M. A. Leontovič, A. A. Vedenov, J. P. Velichov, R. Z. Sagnejev, B. B. Kadomceev, I. N. Golovin, E. K. Zavojskij, pak prošla řada zaměstnanců ústavu. Dlužno říci, že v té době patřily ústavy v Sovětském svazu k naprosté světové špičce. Úzká spolupráce se sovětskými vědci přinesla ústavu nesmírně cenné zkušenosti.

V roce 1976 byla na zařízení s toroidální vakuovou komorou, INTERMEZZU vyrobeném v ústavu, ověřena platnost teorie R. Klímy a V. Petržilký. Název INTERMEZZO (mezičas/vsuvka) naznačoval, že na obzoru je pokračování lineárních zařízení VF a ER. A bylo. Dokonce v tu dobu nejúspěšnější fúzní zařízení. Zajímavé je, že se nedochovala žádná fotografie INTERMEZZA – pouze výkres. V roce 1977 byl v září uveden do provozu tokamak TM-1 VČ, který Ústav atomové energie I. V. Kurčatova v Moskvě zapůjčil Praze. Tokamak TM-1 nashromáždil za dobu své existence pozeňnaný počet názvů. V Moskvě se tokamak čísluvaly podle pořadí, v jakém se dokončily. Začínal T-1, T-2, veleslavný T-3, první supravodivý tokamak na světě T-7, první tokamak s nekruhovým průřezem vakuové komory T-8, známý a dodnes provozovaný T-10, největší sovětský tokamak T-15. Pokud bylo třeba na stávajícím tokamaku ověřit nějaký jev důkladněji, postavil se mladší bratříček s písmenkem navíc. Tak přišel na svět TM-1 (*tokamak malýj*) pro výzkum ohřevu plazmatu jeho stlačením pomocí magnetického pole. Později se na TM-1 zkoušel ohřev VF polem a byl tu TM-1 VČ (*vysokočastotnyj*) – a to už byla voda na mlýn pražského ústavu, kde měl VF ohřev plazmatu vysokou úroveň. V Praze se vyměnilo VČ za MH (*microwave heating*, ohřev mikrovlnami). Všimněte si, prosím, jak anglicko-ruský název československého tokamaku demonstroval pozdější spolupráci Sovětského svazu a USA při konstrukci projektu ITER. V roce 1985 byl přestavěn TM-1-MH

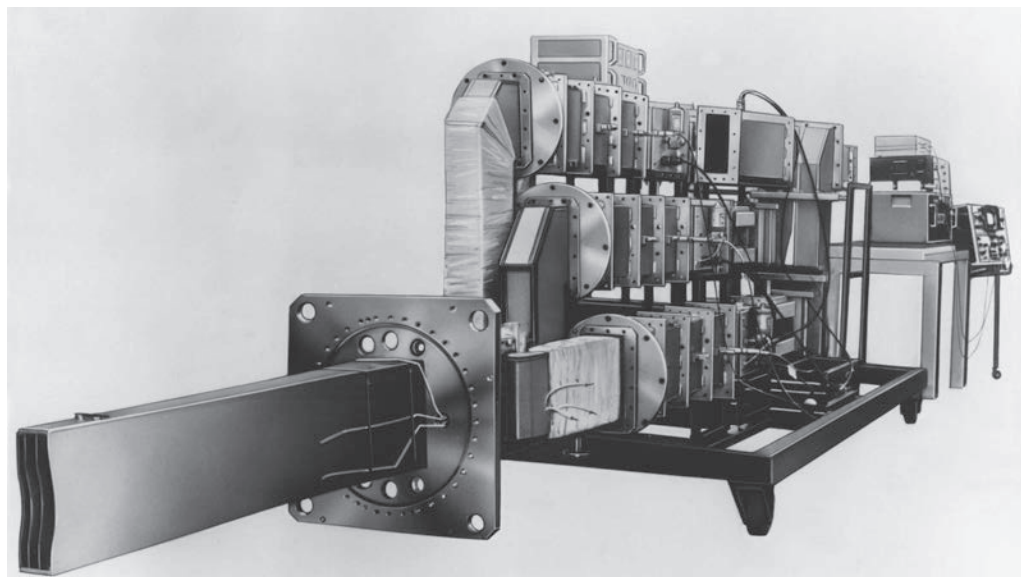
Vitrína muzea Kurčatovova ústavu pro atomovou energii v Moskvě patří světové osobnosti výzkumu řízené termojaderné fúze L. A. Arcimovičovi. Dole je puška, pravděpodobně samonabíjecí malorážka Model Brno 581 ráže 22 LR, kterou Arcimovič dostal darem při návštěvě Ústavu fyziky plazmatu ČSAV v roce 1964





Slavnostní spuštění tokamaku TM-1-MH v roce 1977 v Ústavu fyziky plazmatu ČSAV. Hlava za jhem transformátoru patří RNDr. Vladimíru Kopeckému, DrSc., hovořícímu s předsedou ČSAV prof. Bohumilem Kvasilem; právě Kopeckého zásluhou se tokamak objevil v Praze

Třílnovodný „grii“ navržený a vyrobený v Ústavu fyziky plazmatu ČSAV, který v roce 1982 generoval v 1. supravodivém tokamaku na světě T-7 v Moskvě světový rekord - 50 ms teklo plazmatem 200 kA elektrického proudu



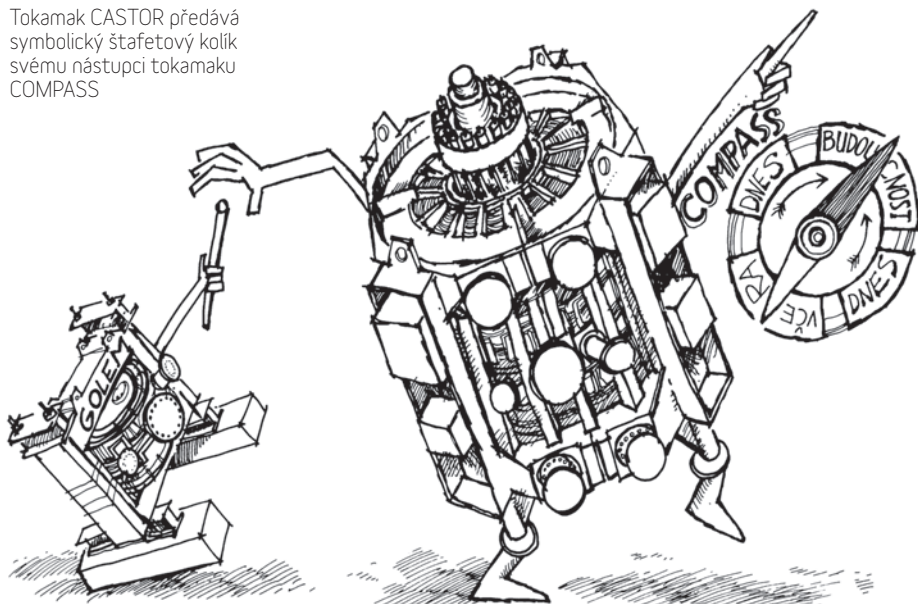
spuštěn jako CASTOR (Czechoslovak Academy of Science Torus) a zřejmě poslední přejmenování absolvoval třetí nejstarší tokamak na světě na půdě Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze – po internetu ovladatelný výukový tokamak oslovil doslova celý svět názvem GOLEM.

Tokamak CASTOR

Vědci v Ústavu fyziky plazmatu dostali možnost pracovat na zařízení, jehož princip byl a je dosud nejspěšnějším způsobem, jak zvládnout termojaderné hoření plazmatu. Na principu tokamaku se staví dosud největší a mezinárodní zařízení pro výzkum fúze ve Francii – ITER. Tokamak bude s velkou pravděpodobností uvolňovat fúzní energii pro výrobu elektřiny v demonstrační elektrárně DEMO, která se již projektuje v Evropské unii, Číně, Japonsku a Koreji. V roce 2004 při vstupu postkomunistického bloku do Evropské unie byla Česká republika jediným státem z deseti, který vstupoval s tokamakem. Dneska je Česká republika suverénně jediným z postkomunistických států se dvěma tokamaky a dokonce patří se svým fúzním parkem k nemnohým státům v celé Evropě.

Program práce na tokamaku CASTOR se do roku 2007 měnil, nicméně osou byl výzkum neinduktivního buzení elektrického proudu v plazmatu s cílem konstrukce stacionárního tokamaku. „Osamělost“ tokamaku na Východě přitahovala vědce ze „sprátelených“ států, kteří neměli možnost pracovat v domácích laboratořích s tokamakovým plazmatem a Sovětský svaz je z různých důvodů nelákal. A tak již v roce 1984 publikovali Češi spolu s Gruzínci, později s Němci z NDR a s Rumuny. Tokamak TM-1-MH ovšem nevyhovoval záměrům pražských vědců, a tak byl

Tokamak CASTOR předává symbolický štafetový kolík svému nástupci tokamaku COMPASS



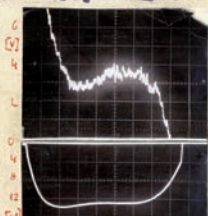
20. 2. 1985

16,30 HOD.

TOKAMAK CASTOR PROMLUVIL

PO RAFINOVANÉ PŘÍPRAVĚ EXPERIMENTÁLNÍHO
ZAŘÍZENÍ DOSÁHL VYČERPANÝ TÝM VOT VÝBOJOVÉ
PARAMETRY SROVNATELNÉ S TOKAMAKEM TM1-MH.

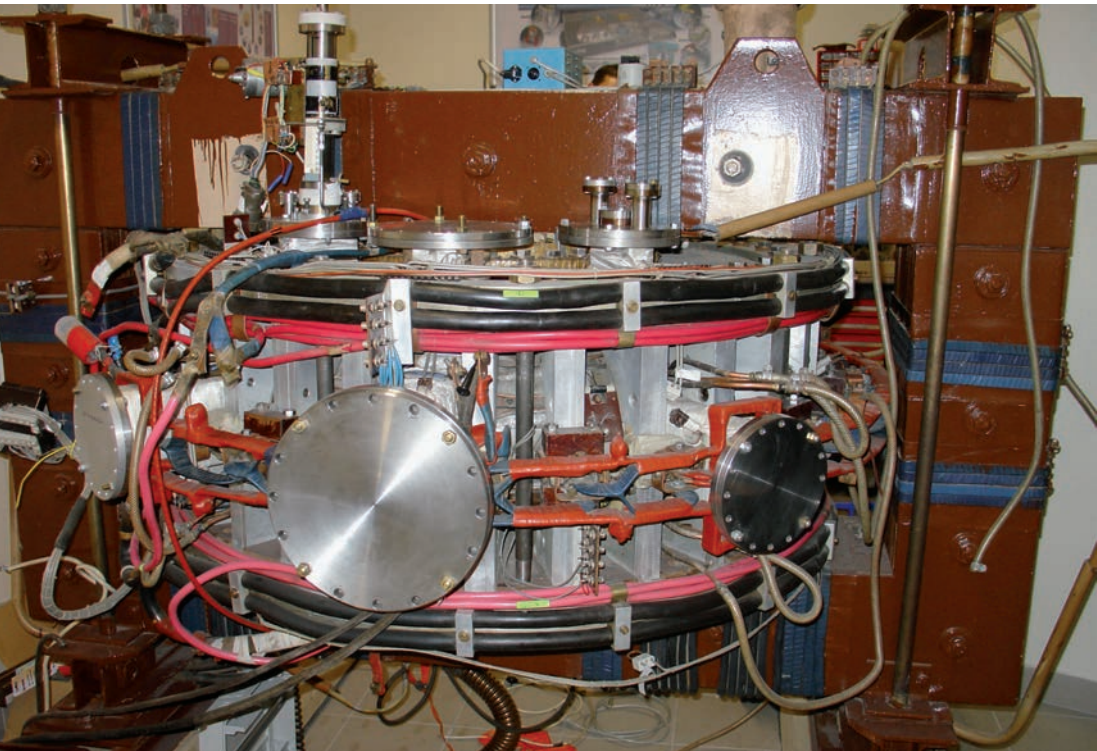
$$U_{\text{LOOP}} = 3-4 \text{ V}$$



$$I = 14-15 \text{ kA}$$

Oznámení prvního výstřelu tokamaku CASTOR na nástěnce Oddělení tokamak

Výukový tokamak GOLEM je od roku 2007 na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze



v letech 1983–1985 kompletně přestavěn – šlo zejména o vybavení diagnostikou, vstupem VF pole a čerpacím systémem a o automatizaci záznamu měřených údajů.

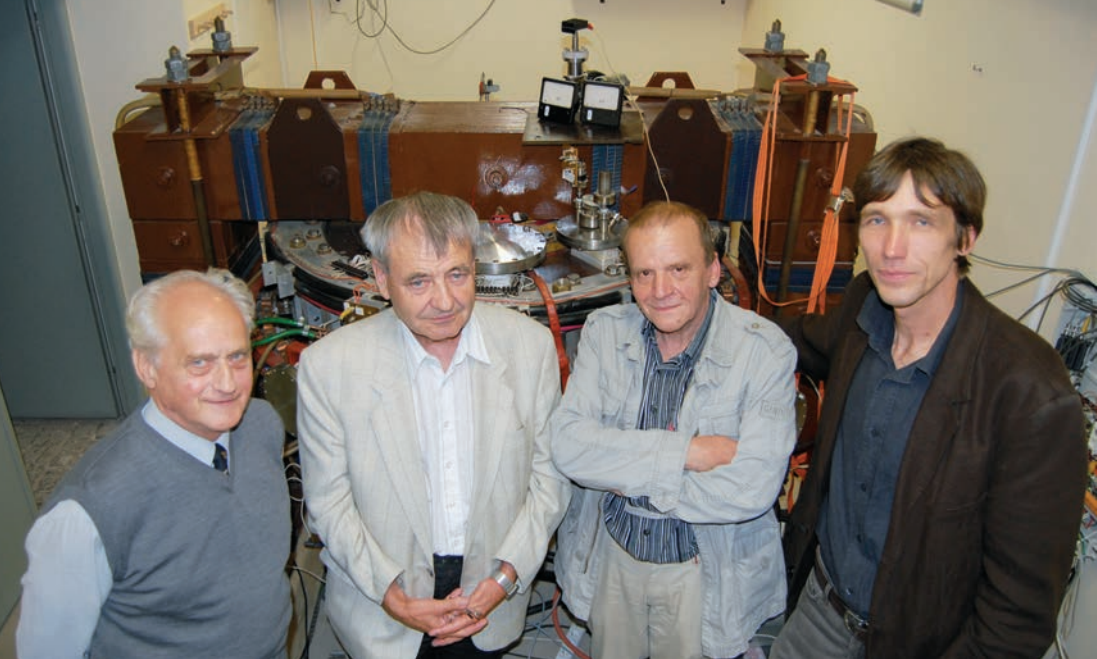
V roce 1985 se objevily zajímavé výsledky po zavedení VF pole na tzv. dolní hybridní frekvenci. Frekvence dolního hybridu je kombinace dvou typických frekvencí plazmatu v magnetickém poli. Kromě očekávaného neinduktivně buzeného elektrického proudu v plazmatu, který dosahoval až 50 % celkového proudu, se zvýšila hustota plazmatu. VF pole potlačilo turbulenci na okraji plazmového provazce a tím snížilo ztráty částic. Podotýkám, že mohutnou transportní bariéru v divertorovém plazmatu objevil Fritz Wagner na tokamaku ASDEX Upgrade v Garchingu v roce 1982. Divertor je komponenta ve vakuové komoře všech moderních tokamaků, která plazma čistí. CASTOR z pochopitelných důvodů divertorem vybaven nebyl. Na počátku devadesátých let CASTOR a ASDEX při společném experimentu prokázaly, že potlačení turbulence VF polem je obecný jev. V každém případě osmdesátá léta znamenala pro CASTOR nové téma, kterému se věnoval až do svého rozebrání v roce 2007. Turbulence okrajového plazmatu je odpovědná za mimořádné ztráty částic a tím i energie z plazmatu a úspěšné metody jejího potlačení jsou stejně důležité jako metody kvalitního ohřevu plazmatu. Co je platné, že umíte plazma ohřát, když vám teplo uniká! Pro studium okrajového plazmatu se uplatnily zejména Langmuirovy sondy, což jsou v podstatě drátky vkládané do plazmatu, ovšem v případě tokamaku CASTOR jednak ve velkém počtu, jednak sofistikovaným způsobem.

Studia turbulence okrajového plazmatu pomocí nejrůznějších, často unikátních, Langmuirových a magnetických sond se zejména po roce 1989 účastnila řada odborníků ze zahraničí: Maďarska, Rakouska, Belgie a Kanady. Mimořádného úspěchu dosáhla Ball Pen Probe (BPP) Jiřího Adámka, která svou univerzalitou měření potenciálu plazmatu v širokém intervalu podmínek zaujala odborníky nejen v Evropě na zařízeních RFX (Itálie), ASDEX U (Německo), MAST (Velká Británie), ISTTOK (Portugalsko), ale i mimo Evropu (kupříkladu stelarátor Helic v Austrálii, tokamak IR-1 v Íránu). Sonda se neomezila jen na vysokoteplotní plazma a používá se v magnetronu na Matematicko-fyzikální Fakultě UK a ve Fyzikálním ústavu AV ČR či v lineárních experimentech v Lublani a na univerzitě v Nancy.

Počátkem osmdesátých let se slibně rozvinula spolupráce s Ústavem I. V. Kurčatova na návrhu a zhotovení vlnovodné struktury pro neinduktivní vlečení proudu na prvním supravodivém tokamaku na světě – na tokamaku T-7. Experimenty s tímto anténním systémem (tzv. grilem) v Moskvě byly velmi úspěšné. Bylo tehdy dosaženo světového rekordu ve velikosti vlečeného proudu 200 kA po dobu 50 ms.

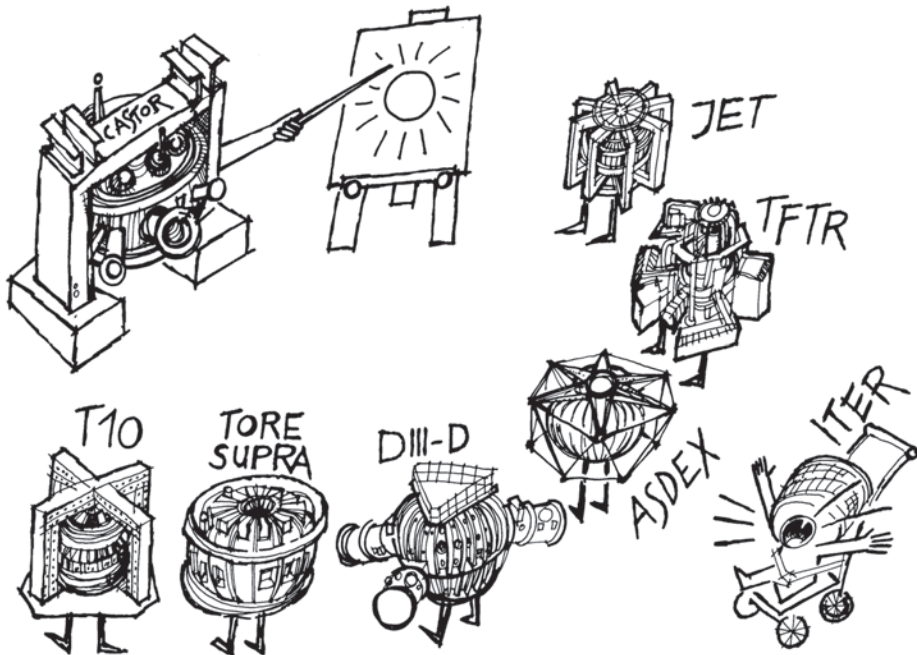
Koncem osmdesátých let začal CASTOR spolupracovat s IAEA ve Vídni a zapojil se do konsorcia „Research Using Small Tokamaks“.

Během osmdesátých let se ÚFP v rámci RVHP (Rady vzájemné hospodářské pomoci bývalého sovětského bloku) podílel na projektu velkého tokamaku T-15, který se budoval v Ústavu I. V. Kurčatova v Moskvě. Pro tento tokamak byl bezplatně dodán komplex 30 supravodivých magnetů v kryostatech gyrotroňů pro elektronový cyklotronní ohřev v celkové ceně 30 milionů korun. Kromě toho ÚFP rovněž vyvinul průletový analyzátor energie atomů vodíku, který měl sloužit k měření iontové teploty na okraji sloupce plazmatu. V důsledku různých konstrukčních chyb se však nepodařilo tokamak T-15 uvést do plného provozu a na nezbytnou rekonstrukci se v SSSR v té době nedostávalo finančních



Všichni šéfové tokamaku TM1-MH/CASTOR/GOLEM při jeho slavnostní inauguraci na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské, ČVUT; zleva: RNDr. Vladimír Kopecký, DrSc., Ing. František Žáček, CSc., RNDr. Jan Stöckel, CSc. a Ing. Vojtěch Svoboda, CSc.

Na tokamaku CASTOR se učili odborníci z velkých zařízení



prostředků. Po sto výstřelech byl tokamak zakonzervován. Několik supravodivých magnetů se použilo pro gyrotrony používané doposud na tokamaku T-10 v ústavu I. V. Kurčatova.

Po roce 1989 se zákonitě a občas i neuváženě utlumovala spolupráce s výzkumnými pracovišti v Sovětském svazu a dalšími státy jako Maďarsko, NDR a Rumunsko. Následné budování spolupráce s vyspělými evropskými laboratoři nebylo jednoduché a trvalo téměř deset let.

Výsledky CASTOR prezentoval na konferencích organizovaných IAEA nazvaných „Technical Committee Meeting on Research Using Small Tokamaks“, které se konaly poměrně pravidelně každé dva roky. Jedna z těchto konferencí byla pořádána také v Praze v roce 1996.

Důležitým zlomem se stal rok 1998, kdy ústav organizoval velkou mezinárodní konferenci pro téměř 900 účastníků „European Conference on Plasma Physics“ spojenou s „International Congress on Plasma Physics“. Během této konference a po ní se podařilo navázat klíčové kontakty s předními evropskými laboratoři. Od tohoto roku začal ústav organizovat zejména dalších deset let probíhající satelitní workshop „Role of Electric Fields in Plasma Confinement“ (což mimochodem není nejšťastnější název, neboť inerciální elektrostatické udržení používající elektrická pole je o něčem zcela jiném). Komunita, která se zformovala v rámci tohoto setkávání, se poté až do roku 2007 stala základem mezinárodní spolupráce tokamaku CASTOR.

Jako velmi užitečné se ukázalo pozvání předních odborníků evropské fúze, kteří se každý rok počínaje r. 1999 scházeli v Praze nejdříve jako International Advisory Board of the CASTOR tokamak a dnes pod názvem The International Board of Advisors of IPP.CR. Konzultační orgán posuzoval předložené výsledky tokamaku CASTOR a navrhoval další program výzkumu na tokamaku.

Flexibilita tokamaku CASTOR se ukázala cennou devizou, kterou využívali i odborníci z velkých laboratoří.

Asociační dohoda

Již čtyři roky před vstupem České republiky do EU, jsme byli vyzváni k přidružení se k evropskému programu EURATOM. Po poměrně komplikovaných rozhovorech se koncem roku 1999 podařilo podepsat příslušné dokumenty, zejména tzv. *Contract of Association* (Asociační dohodu). Pod vedením ÚFP byla vytvořena Asociace EURATOM IPP.CR českých univerzit (MFF UK, FJFI ČVUT) a výzkumných ústavů (Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR, Ústav jaderné fyziky AV ČR) a později Ústav jaderného výzkumu Řež a ještě později Centrum výzkumu Řež, s. r. o. V prosinci 2013 spolu s ukončením 7. rámcového programu EU skončila platnost Asociační dohody a s nástupem nového programovacího období Horizon2020 evropské fúzní laboratoře založily konsorcium EUROfusion, které nyní pomocí evropského grantu koordinuje a spolufinancuje fúzní výzkum v členských zemích. Členem konsorcia za Českou republiku je Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., a CV ŘEŽ, MFF a FJFI se činnosti konsorcia účastní jako přidružené třetí strany. Tyto čtyři instituce také založily společnost Česká fúze (Czech Fusion Society) – jedním z cílů bude vytvořit platformu pro širší spolupráci v oblasti výzkumu fúze v ČR po zániku Asociace EURATOM IPP.CR.



Skupina českých a britských odborníků před převozem tokamaku COMPASS z Culhamu do Prahy. Zcela vpravo je ředitel Ústavu fyziky plazmatu AV ČR Radomír Pánek. Růžice v rukou vědců symbolizuje směr stěhování tokamaku ze západu na východ

Slavnostní „první plazma“ tokamaku COMPASS v roce 2009. Ukazuje RNDr. Radomír Pánek, Ph.D., vedoucí Oddělení tokamak, dnes i ředitel Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i.



Byl také zformulován vědecký program a odsouhlasen představiteli EURATOMu. V rámci asociace byla navázána spolupráce s předními evropskými laboratořemi, zejména TORE Supra (Cadarache, Francie), ASDEX-U (Garching, Německo), TEXTOR (Jülich, Německo), RFX (Padova, Itálie) a JET (Culham, Velká Británie). O spolupráci s námi projevila zájem i evropská univerzitní pracoviště jako Ghent University a University of Innsbruck. Účast v programu EURATOM znamenala významný finanční přínos, neboť Brusel hradil přibližně 25 % našich výdajů na fúzní výzkum. Toto procento se postupně snižovalo až na 18 % (až do zániku asociace v roce 2013).

Velmi důležitou součástí naší účasti byla dohoda o výměně vědeckých pracovníků (*Mobility Agreement*).

Vědecký program Oddělení tokamak Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., se poté soustředil na tradiční témata, která se studovala již předtím:

1. Interakce elektromagnetických vln s plazmatem – zejména numerické modelování, např. interpretace elektronové cyklotronní emise na tokamaku JET, generace rychlých elektronů před LH anténou na tokamaku Tore Supra a MAST apod.
2. Studium okrajového plazmatu na tokamaku CASTOR.

V této oblasti výzkumu se Oddělení tokamak od počátku zaměřilo na generaci radiálního elektrického pole v okrajovém plazmatu.

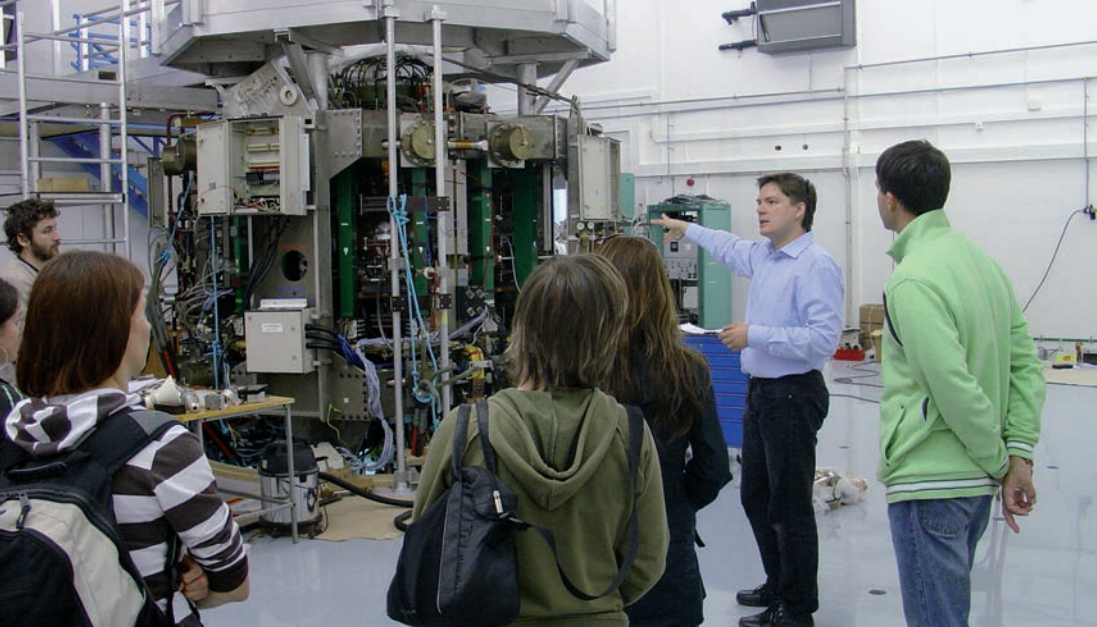
Pád železné opony umožnil modelovat okolí tokamakových divertorů v rámci společného projektu USA a ČR. Zajímavou epizodou byl úspěšný pokus o interpretaci výsledků čtyřkanálového radarového reflektometru ve FOM Institute for Plasma Physics v holandském Rijnhuisenu pomocí neuronových sítí. Byla vypracována teorie vlnovodných soustav (grilů) vhodných pro zavádění VF energie do plazmatu. Na půdě ÚFP byla poprvé na světě použita teorie deterministického chaosu pro modelování turbulentního vysokoteplotního plazmatu.

Práce na tokamaku CASTOR byly ukončeny v roce 2007, kdy byla dokončena stavba hal pro nový tokamak COMPASS a bylo nutné soustředit úsilí vědců a techniků na instalaci tohoto nového experimentálního zařízení a zprovoznování pomocných systémů. CASTOR byl posléze převezen na Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze, kde funguje jako výukové zařízení tentokrát pod názvem GOLEM.

Zlatá éra české fúze – tokamak COMPASS

Každý z dosavadních ředitelů Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR, v. v. i., se nesmazatelným způsobem zapsal do jeho historie. Jan Váňa ústav založil a instaloval v ústavu svého času jediný tokamak na Východě (pochopitelně kromě Sovětského svazu), Zdeněk Tluchoř soustředil roztržštěný ústav pod jednu střechu a přivedl pod ni plazmatron, Pavel Šunka provedl ústav rozbouřenými porevolučními dobami a postavil budovu pro laserový systém PALS.

Cestou do ústavu se mi Pavel Chráska svěřil: „Víš, že jsem věřící? To, že jsme dostali peníze na tokamak COMPASS, byla Boží prozřetelnost!“ Ředitel Pavel Chráska se zasloužil o to, že Česká republika se významným způsobem zapsala do evropské fúzní historie. Další ředitel Petr Křenek nastartoval významnou



Návštěvy studentů na tokamaku COMPASS nejsou nic výjimečného. Provází doc. RNDr. Jan Mlynář, Ph.D.

etapu české fúze, během níž se Oddělení tokamak postupně stalo s počtem 60 zaměstnanců (a téměř 40 studentů) největším v ústavu. A současný ředitel Radomír Pánek je stále vedoucím Oddělení tokamak a stavbu budovy a instalaci tokamaku COMPASS v Praze řídil od samotného počátku. Během krátkých sedmi let dovedl tokamak COMPASS mezi evropskou špičku výzkumu řízené termojaderné fúze.

Ball Pen Probe - modifikovaná Langmuirova sonda Jiřího Adámka se používá nejen na tokamacích doslova po celém světě



výsledek vzhledem k tomu, že H-mód je předpokládaným standardním režimem provozu tokamaku ITER.

V roce 2014 Tokamak COMPASS v rozsáhlé sérii experimentů na žádost ITER organization dosáhl výsledků, které vedly ke změnám první stěny reaktoru ITER. Výsledky, které se využijí při konstrukci tokamaku ITER, jsou ve fúzním světě hodnoceny známkou té nejvyšší kvality, jde o další a významný důkaz schopností mladého týmu kolem COMPASS.

Po zkušenostech s tokamakem CASTOR si vědci tokamak COMPASS skutečně vychutnávají. Nejen, že dostali do rukou moderní zařízení s obrovskými možnostmi, ale začali ho připravovat na ještě náročnější experimenty, než jakých bylo schopné při provozu v Británii.

Tokamak COMPASS je především podobný mezinárodnímu tokamaku ITER. To znamená, že výsledky na něm získané mohou být použity pro extrapolační vzorce, ze kterých lze usuzovat na chování plazmatu ITER. „Podobný“ v tomto případě znamená podobný tvar plazmatu, podobný průřez vakuové komory ve tvaru písmene D, podobnou konfiguraci magnetických polí.

Oproti tokamaku CASTOR má COMPASS divertor, což je komponenta ve spodní části vakuové komory, jejíž primární úkol je odvod nečistot z plazmatu a regulace jeho výkonu, ale ukázalo se, že je také klíčovou podmínkou pro režim vysokého udržení plazmatu, již zmíněný H-mód. Kromě této výbavy, kterou si tokamak COMPASS přivezl z rodného Culhamu, mu Praha musela přichystat nezbytné energetické zázemí, neboť potřebných 50 MW elektrického příkonu, ač během krátkého pulsu, mu pražská síť zdaleka neposkytla. Proto byly zkonstruovány dva tzv. rázové generátory akumulující kinetickou energii ve dvou mohutných setrvačnicích a roztáčené elektromotory s celkovým příkonem 0,5 MW. Celá řada zcela nových moderních diagnostických zařízení umožní měřit ve vysokém časovém i prostorovém rozlišení. Unikátní je flexibilní konfigurace dodatečného ohřevu pomocí vstříku dvou energetických svazků neutrálních částic.

Program prací na tokamaku COMPASS vychází pochopitelně ze zkušeností získaných na tokamaku CASTOR.

Po šesti letech činnosti lze s uspokojením říci, že tokamak COMPASS v rukou vědců a techniků Oddělení tokamak v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR:

- Umožňuje našim i hostujícím fyzikům získávat původní/vyhledávané experimentální výsledky.
- Doplnuje databanku výsledků pro ITER a další tokamaky.
- Je základnou pro výchovu a odbornou přípravu fyziků a techniků.
- Obecně posiluje mezinárodní vztahy ČR a zvyšuje její prestiž.
- Popularizuje fúzi mezi českou veřejností.

V současné době probíhají diskuse o variantách větší modernizace tokamaku COMPASS, která by mohla proběhnout kolem roku 2019.

Technologie

Zatímco v Ústavu fyziky plazmatu se vědci zabývají zejména fyzikou řízené termojaderné fúze, 15 kilometrů na sever od ÚFP se o technologii fúze začal od roku 1987 systematicky zajímat Ústav jaderného výzkumu (ÚJV) Řež. Už před tímto datem se

objevily první vlašťovky díky Vlastimilu Šulcovi a Jiřímu Čermákovi. Ještě dnes na břehu Vltavy fungují zařízení podle Šulcových návrhů zkoumající chlazení jaderných zařízení tekutými kovy. Jedná se o způsob chlazení, který bude použit u některých variant testovacích modulů obalu [Test Blanket Module, TBM] tokamaku ITER. Už v roce 1982 Jiří Čermák publikoval zprávu „Výpočet prostorově energetického rozdělení hustoty neutronového toku v blanketu hybridního termojaderného reaktoru“ v rámci zakázky UJV 704 „Vybrané problémy 1. stěny a blanketu reaktoru“. Všimněte si slůvka „hybridního“. Osmdesátá léta proběhla ve znamení zájmu o hybridní reaktory i v Ústavu fyziky plazmatu ČSAV (ředitel Zdeněk Tluchoř, Jiří Ďatlov).

V prosinci roku 1988 požádal absolvent Moskevského energetického institutu (MPEI) Slavomír Entler o aspiranturu u docenta MEI V. G. Sviridova na téma chlazení termojaderného reaktoru tekutým eutektikem LiPb, ale nakonec zůstalo jen u návštěvy delegace složené ze zástupců ÚJV, ÚFP, ELÚ SAV a ČSKAE v Moskvě, která vyjednala účast Československa na projektu ITER pod křídly regulérního účastníka projektu – Sovětského svazu. Ještě téhož roku byla účast Československa na projektu ITER prostřednictvím SSSR schválena radou ITER. Na projektu ITER se od této doby za Československo oficiálně podílely ÚJV a ÚFP, každý svou tradiční odborností. Revoluční rok 1989 přinesl politické rozhodnutí zrušit spolupráci se Sovětským svazem a tím i účast Československa na projektu ITER, neboť Sovětský svaz naši účast na projektu ITER financoval. Zatímco Ústav fyziky plazmatu ve studiu fúze pokračoval na tokamaku CASTOR, v ÚJV Řež došlo k návratu k fúznímu výzkumu až za dlouhých deset let – v roce 1999 byla díky ÚFP podepsána asociční smlouva nazvaná Association EURATOM_IPP.CR. Asociaci koordinoval ÚFP a ÚJV se v jejím rámci vrátil k fúznímu technologickému výzkumu, ať už to byly zkoušky tepelného namáhání a ozařování neutrony nízkooaktivovatelných ocelí Eurofer, nebo testy první stěny tokamaku ITER. Neutrony z řežského reaktoru LVR-15 mají do energie fúzních DT neutronů daleko, ale lepší nějaké neutrony, nežli žádné. Sonda TW3 pro výzkum působení kombinace neutronového toku a tepelných cyklů na zkoumané materiály byla unikátní i ve světovém měřítku: 17 000 cyklů představovalo dvojnásobek počtu cyklů dosažených na jiných zařízeních. Vzorky k testování do Řeže poslaly Čína, Korea, EU a USA.

Rok 2002 přinesl další změnu názvu: na břehu Vltavy stála tentokrát akciová společnost UJV Řež, a. s., a bylo založeno neziskové Centrum výzkumu Řež, s. r. o., (CVŘ), které postupně převzalo fúzní aktivity ÚJV Řež. V roce 2011 Evropská komise schválila CVŘ rozsáhlý projekt SUSEN (Sustainable Energy) v jehož rámci se v Plzni buduje experimentální komplex pro testování fúzních materiálů vysokým tepelným tokem na zařízení HELCZA (High Energy Load Czech Assembly), které poskytne hustotu tepelného toku 40 MW/m^2 pro testování první stěny reaktorů a terčů divertoru reaktorů ITER a DEMO a dokonce 40 GW/m^2 pro materiálový výzkum. V Plzni bude také sestavena maketa testovacího modulu obalu (TBM) pro ITER v měřítku 1 : 1 (tj. zhruba v rozměrech $1 \times 1,5 \text{ m}$) pro zkoušení dálkové manipulace, neutronová laboratoř se zdrojem DT neutronů o energii 14 MeV zůstane v Řeži.

V roce 2013 byla v souvislosti s koncem 7. rámcového programu EU ukončena platnost dohody *European Fusion Development Agreement* (EFDA) a existence evropských fúzních asociací sdružujících jednotlivé fúzní laboratoře v členských státech EU. S počátkem nového rámcového programu H2020 založily tyto fúzní

laboratoře nové evropské konsorcium EUROfusion, které převzalo roli koordinátora fúzního výzkumu v Evropě.

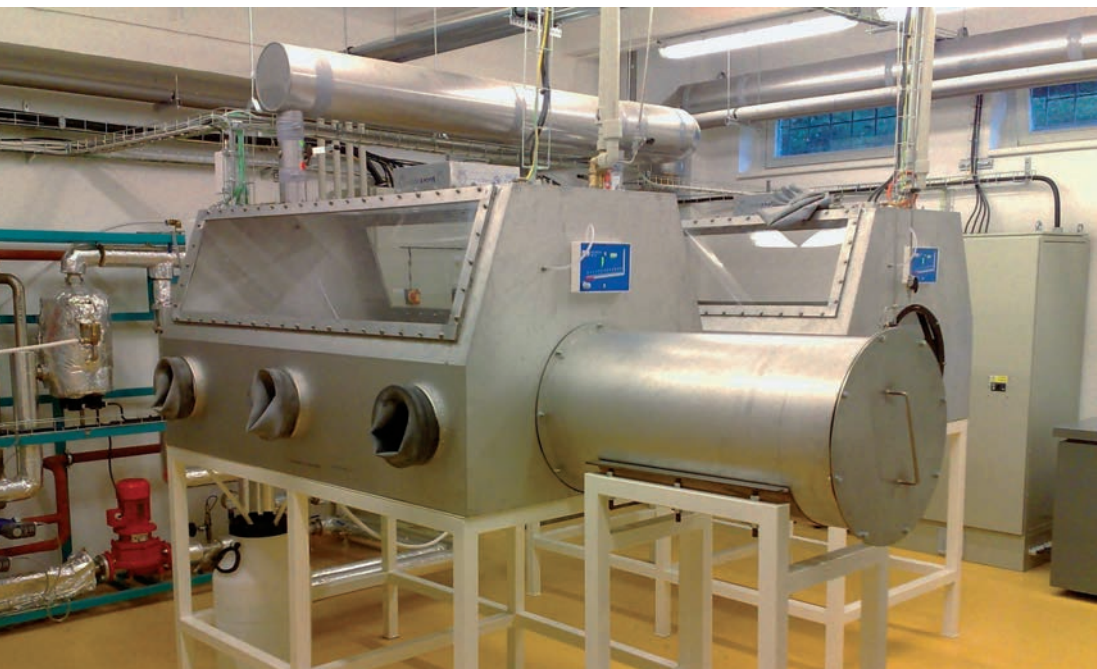
ÚJV v roce 2009 spoluzaložil Konsorcium TBM-CA (Test Blanket Module – Consortium of Associates), které pod vedením KIT (Karlsruhe Institute of Technology) podepsalo s evropskou agenturou pro ITER – Fusion for Energy – řadu smluv týkajících se testovacích modulů obalu – TBM. Nástupce ÚJV Řež – CVŘ – pokračoval ve výzkumu fúzních technologií v programu schvalovaném konsorciem EUROfusion. Konkrétně se jedná o vývoj obalu pro reaktor elektrárny DEMO, vývoj divertoru a nakládání s jadernými odpady. V roce 2013 vyhrálo CVŘ výběrové řízení na stavbu zařízení High Heat Flux Test Facility pro testování prototypů a sériových modulů první stěny reaktoru ITER, což vyústilo v osmiletý kontrakt s F4E.

Význam studia materiálů pro fúzi podtrhuje první a úspěšný mezinárodní workshop „Advances in materials development for fusion devices“, který uspořádal na jaře roku 2015 Ústav fyziky plazmatu AV ČR. Mnohem početnější bude setkání fúzních technologií v roce 2016 při 29. ročníku SOFT (Symposium of Fusion Technology), které 5. až 9. září 2016 pořádá ÚFP a CVŘ v Praze.

Materiály

Výzkumem a vývojem fúzních materiálů se zabývá ÚFP od roku 2000, a to zejména s využitím technologie, která zde má dlouhou tradici – plazmového stříkání. První vlašťovkou byly povlaky B4C s potenciálním využitím pro stelarátory; mj. u nich byly zjištěny zajímavé vlastnosti z hlediska absorpce mikrovln. V roce 2002 se aktivita

Experimentální zařízení BESTH v ÚJV Řež, a. s., pro testování modulů první stěny vakuové komory tokamaku ITER cyklickou tepelnou zátěží



přeorientovala na materiály relevantní pro tokamaky – ITER a DEMO –, konkrétně na wolfram jakožto perspektivní materiál pro komponenty obklopující plazma.

V letech 2003–2005 bylo chování wolframových nástřiků v podmínkách vhodných pro fúzi zkoumáno přímo v tokamaku CASTOR a také při tepelných tocích v zařízení JUDITH ve Forschungszentrum Jülich (FZJ). S touto přední laboratoří v oblasti fúzních materiálů spolupracuje Oddělení materiálové inženýrství ÚFP dodnes.

Gradované vrstvy z kombinace wolfram/měď a wolfram/ocel snižující pnutí byly připravovány v rámci rozsáhlého evropského projektu EXTREMAT. Kromě plazmového stříkání jsou zkoumány i další technologie – nanášení laserem, lisování za tepla a nově i slinování plazmovým výbojem (*spark plasma sintering*). Vliv neutronového ozařování na vlastnosti vybraných materiálů byl sledován v letech 2007–2011 ve spolupráci s ÚJV Řež, později CVŘ.

Od roku 2013 probíhá intenzivní spolupráce se dvěma zahraničními pracovišti orientovaná na interakci fúzních materiálů (zejména wolframu) s plazmatem podobným fúznímu, ale generovaným v laboratorních zařízeních. V nizozemském ústavu DIFFER a polském IPPLM probíhá expozice plazmatem a v ÚFP pak následná charakterizace. Interakce perspektivních materiálů s tokamakovým plazmatem je studována v ÚFP na tokamaku COMPASS. Chování nejnověji vyvíjených materiálů na bázi wolframu a oceli v heliu, v podmínkách blízkých chladicímu systému divertoru, je sledováno ve spolupráci s CVŘ a Ústavem fyziky materiálů (ÚFM) v Brně. Na studiu interakce těchto materiálů s izotopy vodíku spolupracuje ÚFP dále s FZJ, polským Ústavem fyziky plazmatu a laserové mikrofúze (IPPLM), ÚJF a ÚJP Praha (bývalý Ústav jaderných paliv) na Zbraslavi. V ÚFM se dlouhodobě zabývají studiem a vývojem disperzně zpevněných ocelí, které by měly umožnit použití za vyšších teplot než dosavadní „standard“ Eurofer. K výzkumu fúzních materiálů v ČR rovněž přispíval ÚJF, a to experimenty simulujícími neutronové ozařování v IFMIF (plánované mezinárodní zařízení pro ozařování fúzních materiálů), a Ústav fyzikální chemie (ÚFCH) teoretickým a experimentálním studiem interakce uhlovodíkových iontů s uhlíkem.

Výchova

S nástupem tokamaků v České republice se jednak otevřely možnosti pro výchovu odborníků ve fúzní oblasti, jednak vyvstala i jejich potřeba, která zesílila instalací tokamaku COMPASS a možností zahraničních kontaktů po roce 1989. Diplomové a disertační práce studentů Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské (FJFI) a Fakulty elektrotechnické (FEL) ČVUT v Praze i Matematicko-fyzikální fakulty UK v Praze se běžně vypracovávaly na tokamaku CASTOR a dnes i na tokamaku COMPASS. Potřeba uceleného souboru fúzních informací vyústila v semestrální systém přednášek odborníků ze jmenovaných fakult a zejména z Ústavu fyziky plazmatu, který probíhal na půdě ÚFP. Semestrální soubor přednášek Fyzika a technika jaderného slučování skončil v roce 2010, neboť v tu dobu již byli na světě první inženýři nového magisterského studia na FJFI ČVUT v Praze nazvaného Fyzika a technika termojaderné fúze (FTTF). Díky iniciativě Jana Mlynáře a Vojtěcha Svobody bylo FTTF poprvé vypsáno na FJFI ČVUT v Praze v roce 2004. Dnes FJFI otvírá doktorské studium fúze a ČVUT uvažuje o ustavení mezifakultního centra výzkumu fúze spojeném s rekonstrukcí laboratoře pinče na FEL.

ČVUT prostřednictvím FJFI a UK prostřednictvím MFF jsou zapojeny do evropské sítě FUSENET (European Fusion Education Network) – konsorcia 36 škol a laboratoří z 18 zemí EU. Zájemci mohou žádat o stipendium na dvouleté magisterské studium FUSION-EP Erasmus Mundus, kde jsou FJFI a ÚFP od roku 2010 asociovanými partnery. Tradicí se stávají zimní školy EMTRAIC pořádané od roku 2012, při kterých se studenti European Master of Science in Nuclear Fusion Erasmus Mundus účastní desetidenního praktického výcviku na tokamacích COMPASS a GOLEM.

V roce 2015 bude Oddělení tokamak pořádat již 13. ročník letní školy fyziky plazmatu SUMTRAIC (Summer Training Course). Na rozdíl od jiných letních škol zahrnuje SUMTRAIC praktická cvičení na tokamaku. Naprosto unikátním počinem bylo přestěhování tokamaku CASTOR na Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou, kde byl přejmenován na GOLEM. Možnost ovládat GOLEM po internetu využívají studenti nejen v České republice, ale i v cizině. Málokterá univerzita na světě má možnosti školit své studenty jak ve fúzi, tak ve štěpení tak, jak to může FJFI na tokamaku GOLEM a štěpném reaktoru VRABEC.

Popularizace

Popularizace fúze – a nejen fúze, ale vědy obecně – se razantně přihlásila o slovo po roce 1989. Nástup standardu otevřené demokratické společnosti prakticky všechny úrovně vedení Akademie zaskočil, ale situace se rychle zlepšila. Zatímco sporadické začátky popularizace byly spíše koníčkem nadšenců, v současné době pomalu jeden plný úvazek na jeden ústav Akademie věd nestačí. Kapitola popularizace je nedílnou součástí hodnocení činnosti akademických ústavů. Popularizaci se věnují stránky Střediska společných činností (SSČ AV ČR) „Věda pro život“, stránky



Unikátní stavebnice tokamaku, původně didaktická pomůcka, najde uplatnění i při mezinárodních workshopch

„Sci Line“, národní akce Týden vědy a techniky se rozrostla v mohutnou akci propagující vědu mezi širokou veřejností, zejména mládeží. SSČ každoročně organizuje soutěž popularizátorů SCIAP. Od roku 2003 uděluje Akademická rada AV ČR čestnou medaili Vojtěcha Náprstka nejen publicistům a vědcům jako ocenění za dlouholetou a cíleně vedenou činnost v popularizaci vědeckých poznatků. Mimořádnou příležitostí k popularizaci výsledků akademické vědy byl rok 2015, kdy AV ČR oslavila 125 let své existence. Česká fúze se účastnila čtyř akcí – výstavy Věda a technika, kterou poněkud nešťastným způsobem pojalo Národní technické muzeum, národní putovní výstavy plakátů (Brno, Olomouc, Ostrava, Jihlava, České Budějovice, Praha) – fúze dominuje na jednom z nich –, jarní období Týdne vědy a techniky – Jarní exkurze do světa vědy. Pochopitelně existuje řada akcí a stránek také mimo Akademii věd.

Televizně výraznou soutěž Česká hlava nemusím představovat. Nepořádá ji Akademie věd, nicméně její popularizační kategorie Media má s Akademií hodně společného. Do rozběhnuté soutěže byla zmíněná kategorie zařazena v roce 2004 a v roce 2008 bez vysvětlení skončila. Cenu půl milionu korun tehdy nepřevzal Jiří Grygar na protest proti politice tehdejší Rady pro vědu a výzkum a na obranu svého dlouholetého zaměstnavatele – Akademie věd České republiky. Astrofyzik Grygar má k termojaderné fúzi velmi blízko, neboť fúze je energií vesmíru.

Ústav fyziky plazmatu zareagoval na popularizační vlnu vydáním knížky *Říze-
ná termojaderná fúze pro každého*. Při křtu třetího vydání byli přítomni současný předseda AV ČR prof. Jiří Drahoš, minulý předseda prof. Václav Pačes, děkani vysokých škol, první zástupce senátu dr. Alena Gajdůšková a řada dalších osobností akademického a univerzitního světa. Během činnosti COMPASS se jak v tištěných, tak v internetových, našich i zahraničních mediích objevil bezpočet článků. Co se pokrytí příjemců informace týče, je bezkonkurenční televize, v níž se COMPASS, zejména na kanále ČT24, objevil nejméně pětkrát. COMPASS byl přítomen na výstavách a mezinárodních veletrzích jako AMPER v Brně. Velký zájem projevují návštěvníci během každoročních listopadových Dnů otevřených dveří, které se konají v rámci celonárodního akademického Týdne vědy a techniky (TV&T), který trvá 14 dnů. Během TV&T COMPASS prostřednictvím přednášek navštěvuje města po celé republice. Ve vstupní hale budovy tokamaku COMPASS je vystaven interaktivní model tokamaku ITER v měřítku 1:50. Bezprecedentní byl projekt Materiály pro nové tisíciletí, kde se COMPASS prostřednictvím Ústavu fyziky plazmatu účastnil jako partner: návštěvní dny, mimořádně úspěšná stavebnice tokamaku jako učební pomůcka, webová stránka a v neposlední řadě osm čísel časopisu *MAT21*. Jan Mlynář a Milan Řípa jsou členy evropské Public Information Network fungující pod hlavičkou konsorcia EUROfusion. V letech 2003 až 2008 Jan Mlynář zodpovídal za komunikaci s veřejností v publikačním oddělení kanceláře ředitele na tokamaku JET. Česká fyzikální společnost udělila finalistovi prestižní akademické ceny Vojtěcha Náprstka 2015 za popularizaci vědy Milanu Řípovi několik ocenění za významný čin v popularizaci fyziky, konkrétně za popularizaci termojaderné fúze. Nárůst zájmu médií o vědu je, jak už to bývá, doprovázen i negativními jevy: někteří novináři (a nejenom novináři) nepovažují na nutné své zprávy konzultovat s odborníky a stačí jim neumělý překlad pofiderního zdroje. Výsledkem jsou směšná sdělení, která zaujmou jen bulvární rétorikou.

Inerciální fúze

Ve svazku *Historie výzkumu řízené termojaderné fúze* pro laserovou fúzi nezbyl prostor. Československé inerciální fúze je málo, a tak není na prostor tak náročná. Experimentální výzkum laserového plazmatu v ÚFP je prováděn na unikátním terawattovém jódovém laseru, jednom z největších laserů v Evropě, známém od roku 2000 pod jménem Prague Asterix Laser System (PALS), jehož je ÚFP provozovatelem. PALS je současně klíčovým experimentálním zařízením tzv. Badatelského centra PALS, společného výzkumného pracoviště ÚFP a Fyzikálního ústavu (FÚ AV ČR), a zakládajícím členem evropského konsorcia laserových laboratoří LASERLAB-EUROPE. Část výzkumného programu Oddělení laserového plazmatu spadá pod tzv. Keep-in-touch activity v oblasti inerciální fúze, koordinované skupinou Inertial Fusion Energy Working Group EURATOM. Oddělení spolupracuje s dalšími domácími pracovišti zabývajícími se výzkumem lasery vytvářeného i laserujícího plazmatu.

Za spojnicí mezi magnetickým a inerciálním udržením lze považovat Z-pinče – rychlé výboje v plynu. V Československu se od roku 1966 studuje Z-pinč na Fakultě elektrotechnické ČVUT (FEL), která spolupracuje s varšavským Ústavem fyziky plazmatu a laserové mikrofúze (IPPM), jenž je sídlem celosvětové organizace International Centre for Dense Magnetized Plasma. Dalším významným spolupracujícím pracovištěm je Kurčatovův ústav v Moskvě. Pinčová aparatura na FEL je využívána k výuce studentů v magisterském programu Fyzika a technika termonukleární fúze FJFI. Krátkou epizodu prožil Z-pinč v osmdesátých letech coby zdroj intenzivního rentgenového záření v ÚFP.

Ani laserový systém PALS v ÚFP, ani Z-pinč z FEL nesledovaly inerciální fúzi jako hlavní směr bádání.

Studená fúze

Obnovená premiéra studené fúze se v roce 1989 dotkla i Československa. Po senzačním „objevu“ jaderné fúze ve zkumavce pánů Martina Fleischmanna a Stanleyho Ponse psaly československé noviny, že se jejich výsledky podařilo zopakovat i v československé kotlině. První se přihlásila Bratislava, konkrétně Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Komenského. Tehdejší *Mladá fronta* z 21. dubna popsal průběh bádání poměrně dramaticky v článku Vědec klepal na dřevo – vypadá to slibně: „Stopy po únavě v jeho tváři [mladého člena úspěšného kolektivu] byly zjevné, vždyť opět strávil v laboratoři noc. Zahlédl jsem spokojenost v jeho očích. I druhý pokus se vydařil? ... poklepává prstem na dřevo – vypadá to velmi slibně!“ Fundovaněji v celostránkovém článku Žertem k nové energii popsal situaci náš dobrý známý Karel Pacner. Nicméně si na závěr neodpustil poznámku: „Zpráva z Utahu nám znovu důrazně připomněla starou pravdu, že k odkrývání nových výzkumných směrů nejsou vždycky zapotřebí drahé a složité přístroje, nýbrž stačí něco, čemu u nás říkáme selský rozum.“ Karel Pacner svoji úvahu ukončil, jak sám řekl, kacírskou otázkou: „Mohl by se náš vědec v podmínkách, jakými je svázán československý výzkum, někdy pokusit rozvinout podobnou bláznivou myšlenku?“ Možná by závěr jeho článku v MF vyzněl jinak, kdyby K. Pacner věděl o Němcích

F. Panethovi a K. Petersovi, kteří se studenou fúzí experimentovali dlouho před americkou dvojicí v roce 1926. Bylo 22. dubna 1989.

Po 15. dubnu Jiří Ullschmied z ÚFP spolu s kolegy z Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského v prvním patře Laboratoře impulsních systémů sestavil podle dvojice Fleischmann a Pons aparaturu pro studenou fúzi, jejíž podstatné části zapůjčil Ústav dozimetrie záření. Ani opakované pečlivé měření neobjevilo průvodní produkty D–D reakce, tedy fúzní neutrony. Ústav fyziky plazmatu svolal spolu s kolegy z Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského shromáždění, kde Jiří Ullschmied referoval o negativních výsledcích. Na téma studená fúze proběhl na Katedře jaderné fyziky Matematicko-fyzikální fakulty 27. dubna seminář Fúze ve zkumavce, kde Jiří Ullschmied opět referoval o negativních výsledcích svých měření. V úterý 25. dubna 1989 *Mladá Fronta* otiskla, zřejmě na dlouhou dobu poslední, článek týkající se studené fúze Za hranice jaderné fyziky, v němž prof. P. Povinec z MFF UK prohlásil: „... jednoznačně vyplývá, že efekt není možné připsat jaderné syntéze“ a dále, že „se chceme pokusit o takovýto experiment“. Experiment měl spočívat v „použití plynného deuteria ohřátého na vysokou teplotu“. Na příběhu těchto týdnů zaráží jedna skutečnost. Proč žádný novinář nenavštívil instituci, která se o jadernou fúzi zajímá od roku 1959 a od roku 1977 provozuje tokamak?

Závěr

Dva silní hráči na českém fúzním hřišti jsou ve výborné kondici. Oba jsou plně zapojeni do mezinárodních struktur a mají postaráno o kvalitní domácí lidské zdroje. Není důvod se obávat fúzní budoucnosti České republiky.

Poděkování patří RNDr. Radomíru Pánkovi, Ph.D., řediteli Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR, v. v. i., doc. RNDr. Janu Mlynářovi za pečlivé přečtení rukopisu, Ing. Slavomíru Entlerovi, Ph.D., za přečtení rukopisu a za příspěvky týkající se fúzních aktivit výzkumných ústavů v Řeži, prof. RNDr. Pavlovi Kubešovi, CSc., a Ing. Jiřímu Matějčkovu, Ph.D., za připomínky týkající se výzkumu Z-pinče na FEL ČVUT a studia technologie materiálů pro fúzi v ÚFP a zejména RNDr. Janu Stöckelovi, CSc., za pečlivé uspořádání materiálů týkajících se tokamaku CASTOR.

MEZINÁRODNÍ SYMPOZIUM
O FÚZNÍCH TECHNOLOGIÍCH
SOFT 2016



PROBĚHNE
5.-9. ZÁŘÍ 2016
V PRAZE

za účasti více než 800 vědců
z celého světa

SYMPOZIUM POŘADAJÍ
ÚSTAV FYZIKY PLAZMATU AV ČR, v.v.i.
A CENTRUM VÝZKUMŮ ŘEŽ, s.r.o.

WWW.SOFT2016.EU

- interakce plazmatu se stěnou
- fyzika ubíhajících elektronů a disrupcí
- vývoj pokročilých diagnostických metod
- integrované modelování a vývoj kódů

Hlavní systémy

- systém řízení, sběru dat a komunikace (CODAC – Control, Data Acquisition and Communication)
- zdroje napájení
- systém rychlé zpětnovazební regulace
- chlazení
- vakuum
- napouštění pracovního plynu
- systém hydraulického předtížení
- ohřev pomocí vstříku svazků neutrálních částic
- systém vypékání komory
- systém pro doutnavý výboj

Systémy diagnostiky plazmatu

- magnetická diagnostika (400 cívek)
- mikrovlnná diagnostika
 - 2mm interferometr
 - okrajový mikrovlnný reflektometr (K & Ka pásma)
 - ECE / EBW radiometr
- spektroskopická diagnostika
 - Thomsonův rozptyl s vysokým rozlišením pro středové a okrajové plazma
 - dvě rychlé kamery pro viditelné světlo
 - fotomultiplikátory (viditelné světlo, Ha, CIII + kontinuum pro Zeff)
 - HR2000+ spektrometry pro blízké UV, viditelné a blízké infračervené záření
 - rychlé AXUV bolometry (pole)
 - polovodičové detektory rentgenového záření (pole)
 - scintilační detektor a kamera pro tvrdé rentgeny
 - pomalá infračervená kamera, rychlá divertorová termografie (35 kHz, 1 mm) – ve výstavbě
- svazková a částicová diagnostika
 - HR2000+ spektrometr pro Ha & Da vyzařování
 - neutron scintilační detektor
 - diagnostika používající lithiový svazek (BES, ABP)
 - dva analyzátory neutrálních částic
 - Spektroskopie rekombinace výměnou náboje (*charge exchange*) – ve výstavbě
 - Detekce fúzních produktů
- sondy
 - 39 divertorových sond a sada sond na vnitřní straně divertoru
 - divertorové ball-pen sondy
 - dva vratné manipulátory (horizontální a vertikální)
 - Langmuirovy sondy na vnitřní straně limiterových dlaždic

Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., (www.ipp.cas.cz) se zabývá výzkumem čtvrtého skupenství hmoty – plazmatu. Výzkum zahrnuje jak experimentální, tak i teoretické studium vysokoteplotního plazmatu a jaderné fúze, laserového plazmatu, nízkoteplotního plazmatu a plazmové chemie, materiálového inženýrství a optické diagnostiky. Nedílnou součástí tohoto výzkumu je vývoj potřebných diagnostických metod a vyhledávání možností aplikačního využití plazmatu. ÚFP dále získává, zpracovává a rozšiřuje vědecké informace, poskytuje vědecké posudky, stanoviska a doporučení a ve spolupráci s vysokými školami uskutečňuje doktorské studium a vychovává vědecké pracovníky.

V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:

Ivana Štětinová: **ScholarOne systém**

Jan Vít: **Jan Patočka**

D. Černý, A. Doležal, T. Doležal: **Bioetika**

DOSUD VYŠLO:

Zuzana Vondráková: **Somatická embryogeneze jehličnanů**

Petr Zacharov: **Observatoř Milešovka**

Milan Řípa: **Historie výzkumu řízené termojaderné fúze**

Edice Věda kolem nás | Co to je...

Historie výzkumu termojaderné fúze v ČR | Milan Řípa

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i.

Grafická úprava dle osnovy Jakuba Krče a sazba Serifa.

Technická redaktorka Monika Chomiaková. Odpovědná redaktorka

Petra Královcová. Vydání 1., 2016. Ediční číslo 11935.

Tisk **SERIFA**®, s. r. o., Jinonická 80, 158 00 Praha 5.

ISSN 2464-6245

Evidováno MK ČR pod e. č. E 22344

Další svazky získáte na:

www.vedakolemnas.cz | www.academiaknihy.cz | www.eknihy.academia.cz