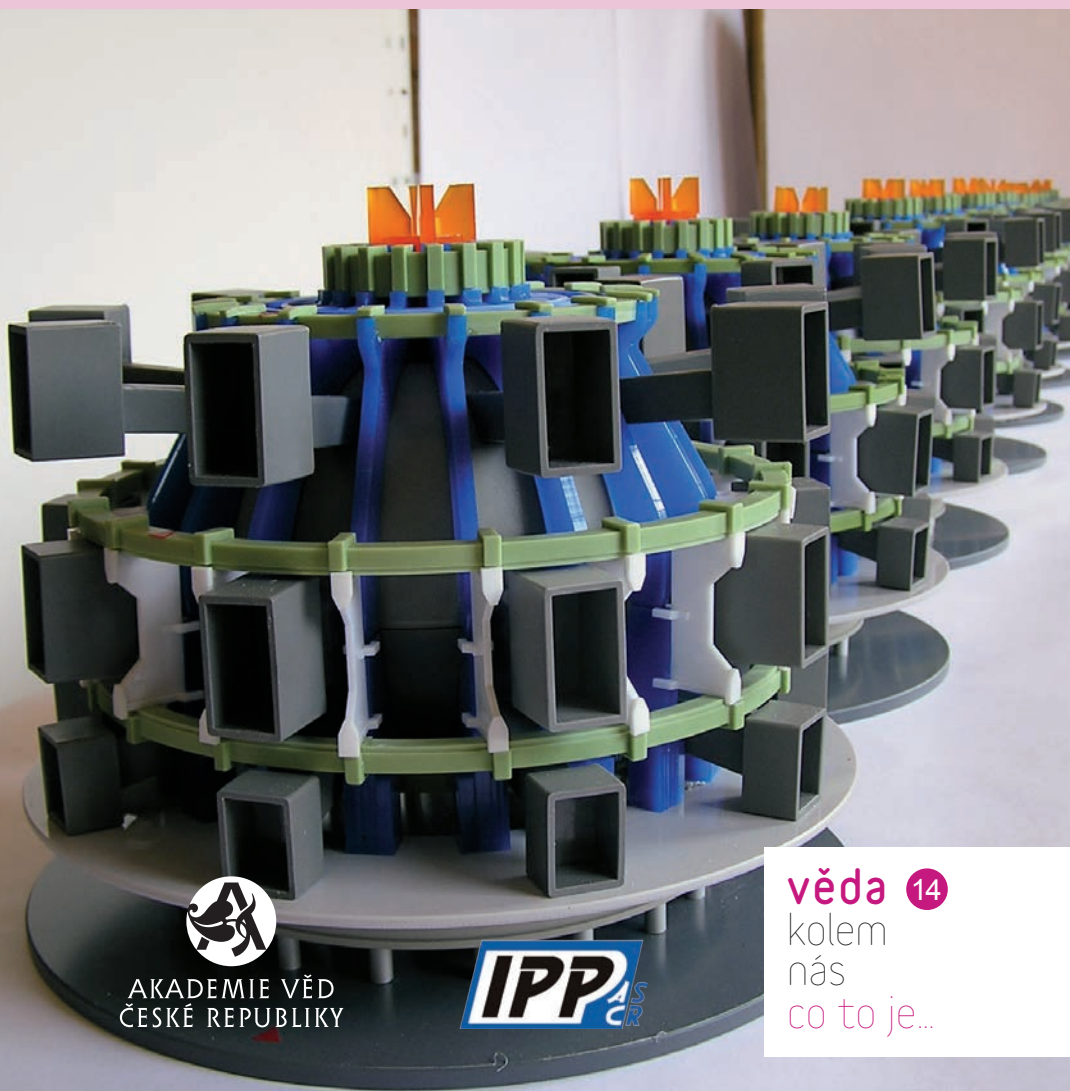


# Historie výzkumu řízené termojaderné fúze



AKADEMIE VĚD  
ČESKÉ REPUBLIKY



**věda** 14  
kolem  
nás  
co to je...

# Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i.

([www.ipp.cas.cz](http://www.ipp.cas.cz))

Předmětem činnosti ÚFP je výzkum a aplikace 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.

ÚFP se zabývá výzkumem v řadě oblastí:

- fyzika vysokoteplotního plazmatu a termojaderná fúze; ústav provozuje velkou výzkumnou infrastrukturu „tokamak COMPASS“; v rámci programu EURATOM koordinuje výzkum řízené termonukleární fúze v ČR;
- impulzní plazmové systémy s možným využitím v medicíně (bezoperační likvidace tělních kamenů a tkání), v ekologii (odstraňování nežádoucích organických nečistot z vody a plynů), v elektronice (např. RTG litografie);
- vývoj světově unikátních plazmatronů s vodní a hybridní (plyn–voda) stabilizací pro plazmové technologie (předchozí verze byly instalovány u několika firem v Japonsku, USA a Belgii): nástřiky, destrukci odpadů a zplynování organických látek s produkcí vysoce kvalitního syntetického plynu;
- materiálové inženýrství využívá termické plazma jako nástroj k tvorbě ochranných povlaků, samonosných keramických prvků nebo funkčně gradovaných materiálů; studuje vliv plazmatu na vlastnosti konstrukčních materiálů;
- velká výzkumná infrastruktura „Laser PALS“ je využívána nejen ke generaci a studiu laserového plazmatu, ale i pro širší oblast témat, která potřebují k realizaci vysoce výkonný laser; současně je školícím pracovištěm pro projekty ELI a HiPER;
- Centrum TOPTEC je zaměřeno na výzkum a vývoj speciální optiky a optických a jemnomechanických systémů; jeho nejmodernější špičkové vybavení umožňuje řešení projektů od návrhů, analýz a simulací po velmi přesnou výrobu a testování.

Všechna oddělení ústavu jsou připravena pro spolupráci na domácí i mezinárodní úrovni jak v oblasti řešení vědeckovýzkumných úkolů, tak při přípravě studentů a mladých vědeckých pracovníků.

## Úvod

Historie řízené termojaderné fúze byla popsána v mnoha knížkách. Autoři pocházejí z bývalého Sovětského svazu, Spojeného království či Spojených států amerických, žádný není ze čtvrté země. Jmenované státy byly a jsou protagonisty výzkumu fúze, a tak původ autorů nepostrádá logiku. Každý z nich je ovšem pánem na svém dvorku a jakmile zabrousí k sousedovi, tak buď úmyslně, nebo nechť má zkreslené nebo dokonce chybné informace.

Československá fúzní věda téměř třicet let velmi úzce spolupracovala se Sovětským svazem a od roku 1999 se Česká republika oficiálně zapojila do fúzní Evropy. Shodou okolností jak v prvním, tak ve druhém případě jsme měli štěstí, že se jednalo o vedoucí tým probíhajícího fúzního mistrovství světa. Tato situace přeje autorovi, který může být, na rozdíl od zmíněných, poměrně nestranným. Železná opona byla totiž stažena i mezi spojenci Spojenými státy a Spojeným královstvím.

Útlá brožurka nemůže přinést výčet a popis všech zatáček fúzního bádání, ale může být návodem, kterým směrem se vydat při odbočení z fúzní dálnice do méně projasněného terénu.

První část brožurky popisuje vývoj ve třech zemích odděleně, neboť i bádání politika rozdělila do třech „laboratoří“: Spojeného království, Spojených států amerických a Sovětského svazu. Po definitivním pádu fúzní opony v roce 1958 do suverénního vítězství sovětského zařízení tokamak v roce 1968 bylo deset let naplněno rostoucí výměnou informací vrcholící zahájením stavby mezinárodního tokamaku ITER v roce 2007.

## Kantrowitz a Jacobs 1938

V roce 1936 se Arthur Kantrowitz, mladý zaměstnanec National Advisory Committee for Aeronautics ve vojenské letecké základně Langley Field ve Virginii, a jeho šéf Eastman Jacobs divili, k čemu potřebuje Westinghouse Van de Graaffův generátor vysokého napětí.

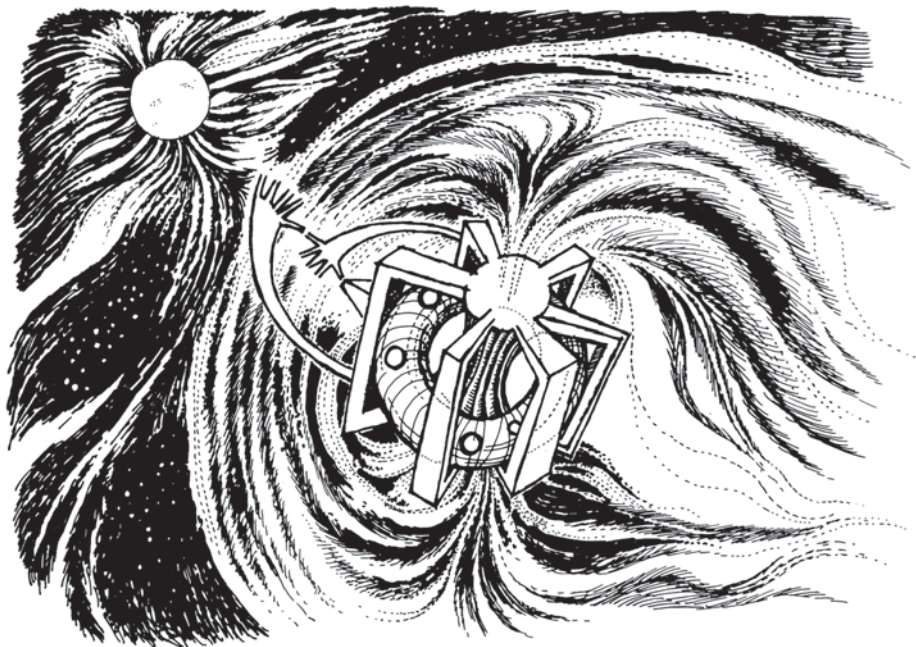
„*Snad ne k uvolňování energie jádra?*“ Hans Bethe v *Reviews of Modern Physics* publikoval seznam známých slučovacích jaderných reakcí. Kantrowitz se okamžitě rozhodl: „*Zkusím vyrobit plazma o teplotě středu Slunce a uvidím, zda se jádra stejně jako na Slunci budou slučovat!*“ Zvolil fúzi deuteria s deuteriem.

Tu se stalo z dnešního pohledu něco zcela neuvěřitelného. Kantrowitz navrhl plazma zahrát *mikrovlnami*, od stěn vakuové nádoby oddělit *magnetickým polem* a nádobu zvolil ve tvaru *toroidu*!

Kantrowitz odhadl rozměry toroidu a vyšla mu vakuová nádoba velikosti v budoucnosti dosti vzdáleného tokamaku TFTR – Tokamak Fusion Test Reactor! Vyčázel z energie uvolněné při D–D reakci, vnějšího ohřevu mikrovlnami a ztrát energie způsobených klasickou difuzí, jinými slovy počítal si breakeven. V roce 1938!

Reakci deuterium–tritium Betheho článek neobsahoval, dokonce ani samotné deuterium nebylo na trhu a Kantrowitz se rozhodl nahradit deuterium vodíkem.

Jacobs při návštěvě vedení společnosti NACA (National Advisory Committee for Aeronautics, předchůdce NASA) ve Washingtonu využil své autority objevitele a získal pro Kantrowitze 5000 amerických dolarů.



(Ivan Havlíček)

Kantrowitzův torus svařený z leteckých plechů půl palce tlustých měl slušné rozměry: 4 stopy napříč (3,6 m), 18 palců hluboký (46 cm). Vakuová komora byla opatřena okénkem. Vodíkové plazma chtěl Kantrowitz ohřát rozhlasovým vysílačem o výkonu 150 W. Kolem toroidální nádoby omotal kabely používané k napájení aerodynamického tunelu. „Cívky toroidálního pole“ měly izolovat plazma od stěn vakuové nádoby. Výkon proháněný cívkami dosáhl několika stovek kW. Nadšený Kantrowitz stavěl své zařízení na plný úvazek a večer mu pomáhal jeho šéf Eastman Jacobs.

Pionýrskou dobu výzkumu fúze dokumentuje to, jak hledali vakuové netěsnosti. Zahájili metodou automechanika, který hledá otvor v pneumatice pomocí mýdlových bublin, a teprve později použili zárodek heliového hledače a „netěsnost“ zalepili emailovou barvou!

Asi po dvou měsících hledání netěsností omotali komoru kabelem, napustili do toroidální komory vodík a zapnuli zdroj. Oknem viděli modré doutnavé světlo sledující magnetické siločáry. Ozářili zubní rentgenový film a Jacobs, který měl doma temnou komoru, film vyvolal a volal Kantrowitzovi: „Na fotografii nic není!“

Kantrowitz a Jacobs usoudili, že plazma nebylo dostatečně horké. Zvětšili výkon vysílače a plazma se začalo chovat nepochopitelně. Kantrowitz zřejmě objevil nestabilitu plazmatu!

Po několika měsících pokusů je náhodou navštívil George Lewis, šéf NACA. Lewis viděl hliníkovou troubu s okénkem obalenou kabelem připojeným na zdroj pro aerodynamický tunel, rozhlasový vysílač, vakuovou pumpu chráněnou skleněným akváriem, ale co neviděl, to byly výsledky. Verdikt byl nasnadě – další činnost obou nadšenců skončila.

Později byl Kantrowitz několikrát pozván k účasti na projektu Manhattan, ale vždy odmítl.

Nicméně v březnu 1939 přihlásili Kantrowitz a Jacobs patent „*Diffusion Inhibitor*“ = omezovač difuze; *Objev se týká metody a prostředků, jak zabránit úniku tepla... Zjistili jsme, že použití magnetického pole zmenšuje difuzi nabitých částic.*

Na obrázku je torus omotaný magnetickou cívkou takovým způsobem, že ohřívání plazma by mohlo být zachyceno a udržováno uvnitř vakuové komory tak, že se nedotýká stěn. Patent jim ale nebyl udělen.

Kantrowitz později navrhoval řízené střely, Jacobs křídla o nízkém odporu pro letadla P-51 a B-29. Ani jeden se k fúzi už nevrátil.

## Sovětský svaz

Sovětský svaz sice porazil fašistické Německo, ale za cenu totálně rozvrácené ekonomiky. Když přičteme čistky, které Velké vlastenecké válce předcházely, nezastihla poválečná léta Sovětský svaz v optimální kondici. Horká válka skončila a začínala se objevovat její „mírová“ varianta – válka studená. Spojené státy demonstrovaly na obyvatelích japonských měst Hirošimy a Nagasaki vlastnictví hrozné zbraně – atomové pumy – a Sovětskému svazu nezbyvalo nic jiného, než připravit své válečné spojence o jaderný monopol, ačkoli se šéfkonstruktor sovětské A-bomby Igor Kurčatov vyjádřil o svržení atomových bomb na Hirošimu a Nagasaki jako o „*odporném, cynickém a nelidském činu*“.

Poválečná léta v Sovětském svazu nebyla rozhodně dobou, kdy by jeho vědecká elita přemýšlela, jak využít procesy probíhající na Slunci – termojadernou fúzi – pro civilní účely. Zato na vodíkové bombě se pracovalo více než usilovně. Byly to nevypané závody mezi Spojenými státy a Sovětským svazem.

Elita na civilní využití termojaderné fúze skutečně čas neměla, ale seržant Rudé armády Oleg Alexandrovič Lavrentěv, patřící do Tichomořské flotily, čas měl...

Neuvěřitelný příběh seržanta Rudé armády Olega Lavrentěva začal na Dálném východě, kde očekával demobilizaci. Bez vysoké školy napsal v roce 1950 dopis ÚV KSSS, ve kterém načrtl konstrukci vodíkové bomby s pevným deuteridem lithia a termojaderného reaktoru na principu elektrostatického udržení. Dopis dostal k posouzení D. Sacharov.

Sacharova nápad mladého seržanta O. A. Lavrentěva zaujal. Poprvé se setkal s jadernou reakcí ve zředěném plynu, byť ionizovaném – v plazmatu. Dosud byl zvyklý na hustoty větší než hustota pevné látky. Dvaadvacátého října 1950 v kanceláři První hlavní správy generála KGB (Komitet gosudarstvenoj bezopasnosti) N. I. Pavlova A. D. Sacharov a I. J. Tamm seznámili s ideou řízeného termojaderného slučování v plazmatu izolovaném magnetickým polem I. N. Golovina, zástupce ředitele LIPAN (Laboratorija izmeritel'nyh priborov Akademiji nauk – dnešní Kurčatovův ústav pro atomovou energii). Od něho byl už jen krůček k řediteli LIPAN, I. V. Kurčatovovi.

A. D. Sacharov a I. J. Tamm, nehledě na časově náročnou práci týkající se vodíkové bomby, vypracovali návrh „*Magnetického termojaderného reaktoru*“ (MTR), který předložili na konci října 1950 svému vedoucímu I. V. Kurčatovovi. Název MTR pochází od I. J. Tamma, který zamítl Sacharovovu verzi „*Toroidální termojaderný reaktor*“ s tím, že jeho název je obecnější.

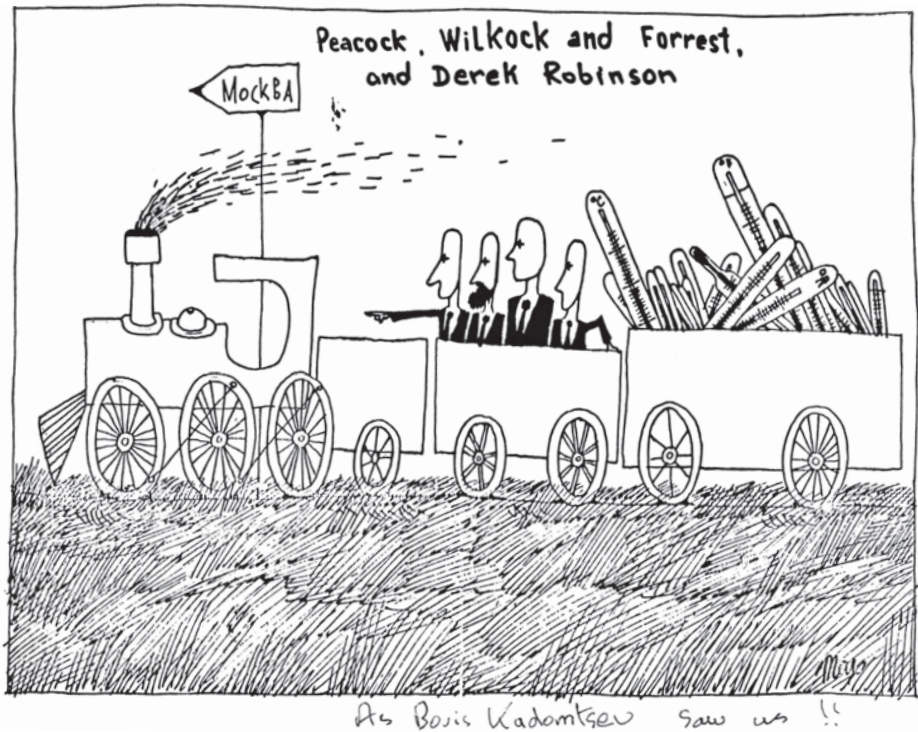
Na tomto místě je vhodné připomenout, že o magnetické izolaci plazmatu ve vodíkové bombě se zmiňují materiály, které poskytl Sovětskému svazu Klaus Fuchs 19. září 1945. Obsahovaly výťah přednášek Enrica Fermiho o vodíkové bombě, v němž se mluvilo o magnetickém poli jako o způsobu, jak zmenšit tepelnou vodivost plazmatu.

Při práci na vodíkové bombě v Los Alamos roku 1946 skupina Teller, Fermi, Tuck a Ulam uvažovala o řízené termojaderné fúzi a o magnetickém poli jako izolantu termojaderného plazmatu 100 miliónů stupňů teplého v toroidální komoře. Toroidální tvar sice eliminuje ztráty částic otevřenými konci válcové nádoby, ovšem, jak poznamenal Fermi, za cenu toroidálního driftu způsobeného nehomogenitou magnetického pole toroidálního solenoidu. Toroidální drift vrhá plazma na stěny komory a tím ho likviduje. Na základě výpočtů Teller spočítal, že ztráty včetně toroidálního driftu jsou tak veliké, že konstrukce fúzního reaktoru není možná.

Ne tak Sacharov, který při návštěvách LIPAN přemýšlel, jak drift částic kolmý k ploše toroidu odstranit (stabilizace toroidálního driftu). Napadlo ho stočit siločáry magnetického pole do šroubovice a nechat částice během jejich cesty toroidem střídát pozici uvnitř a vně toroidu. Jinými slovy oblast slabého a silného magnetického pole. K tomu potřeboval druhé magnetické pole kolmé na stávající pole vnějších cívek. Sečtením obou polí by pak vzniklo požadované šroubovicové pole.

Angličané jedou změřit teplotu na tokamaku T-3A

(archiv autora)



Sacharov navrhl dvě možnosti, jak do toroidální vakuové nádoby toroidální elektrický proud – generátor poloidálního pole – zavést:

- do vakuové komory instalovat pevný vodič elektrického proudu, nebo
- elektrický proud ve vakuové komoře vybudit indukci (bez přítomnosti pevného vodiče).

Rovnováhu plazmového prstence hodlal zajistit měděným obalem (kožuchem) s příčnými (vstup toroidální EMS) a podélnými (vstup magnetického pole) štěrbinami.

Koncem ledna 1951 svolal Kurčatov v KB-11 (Konstruktivnoje bjuro 11) seminář ohledně MTR pro vedoucí výroby vodíkové bomby a po kladné odezvě překvapeného auditoria (nikdo netušil, že v Sovětském svazu výzkum termojaderné fúze probíhá a už vůbec ne v tak velkém měřítku) sepsal návrh výzkumu řízené fúze na MTR pro vládu. V únoru 1951 návrh obdržel L. P. Berija.

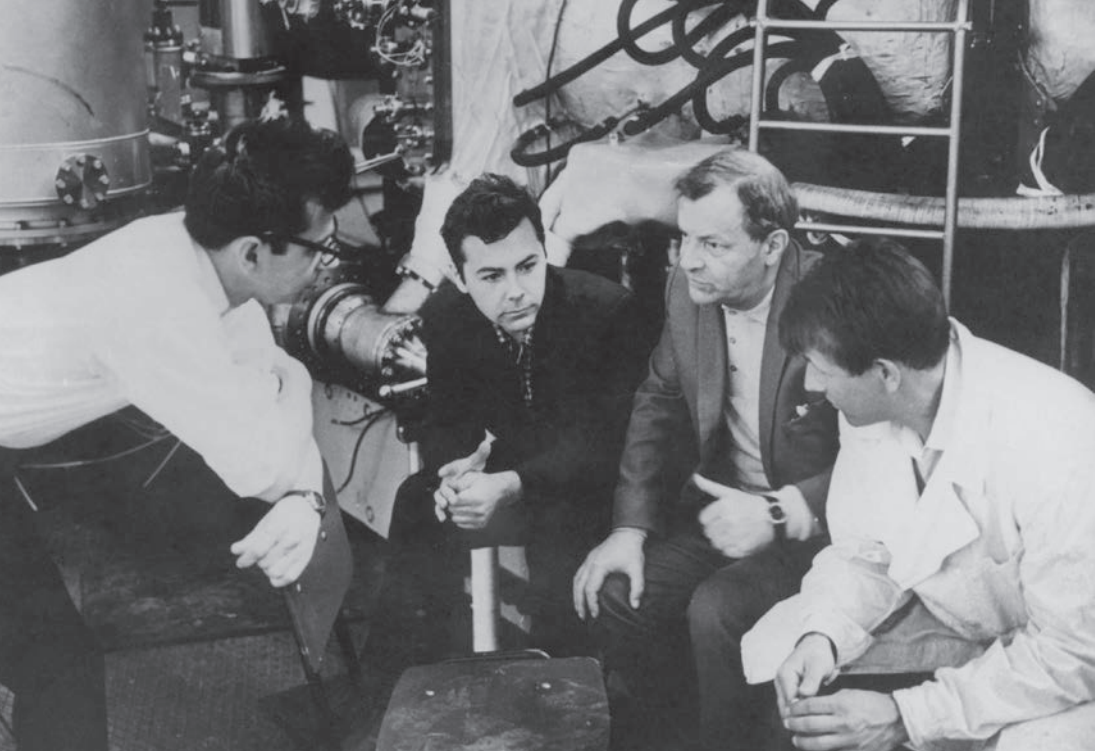
Druhý „nesystematický“ impuls – první přišel od příslušníka Tichomořské flotily ze Sachalinu – vyslala Argentina. V dubnu 1951 vtrhl do pracovny Kurčatova ministr elektrotechnického průmyslu D. V. Jefremov s novinami se zprávou o „úspěšném“ výzkumu Ronalda Richtera na argentinském ostrově Huemul: „*Uvolnění jaderné energie bez použití uranového paliva.*“ Kurčatov informoval Beriju. Berija okamžitě svolal schůzi, kde se dohodly organizační podrobnosti, jak „odpovědět“ Argentíně.

Vedoucím projektu „*O provedení vědeckovýzkumných prací s cílem objasnit možnost stavby magnetického termojaderného reaktoru*“ byl jmenován L. A. Arcimovič (2/3 pracovního času stále věnoval elektromagnetické separaci izotopů pro atomové nálože). Teoretickou část projektu dostal na starost M. A. Leontovič. Předsedou Rady MTR se stal I. V. Kurčatov, A. D. Sacharov a I. J. Tamm obsadili místa náměstků – konzultantů. Ustanovení obsahovalo i termín ukončení projektu: 1. října 1952. Berija se s nikým nemazlil!

Osobnost Arcimoviče vyžaduje stručnou informaci. S termojadernou fúzí vyjel do zahraničí poprvé v roce 1957 na Astrofyzikální konferenci do Stockholmu na pozvání významného astrofyzika Hannese Alfvéna. Prezentoval „svoje“ od roku 1955 utajované Lawsonovo kritérium. Faktem je, že Kurčatov nedovolil Arcimovičovi účast na druhé ženevské konferenci, ani ho v roce 1959 nepustil do Anglie na pozvání Sira Johna Cockcrofta. Po smrti Kurčatova si Arcimovič zchladil záhu na Američanech roku 1961 na II. Konferenci o fyzice plazmatu a řízené termojaderné fúzi v Salcburku, kde s gusem jemu vlastním vytkl chyby v prezentacích Frederica Coensgena a Richarda Posta z Livermoru. Uražení Američanů žádali omluvu, načež Arcimovič odvětil, že nejsou v ústavu pro výchovu šlechticů (institut blagoprijatnyh děvic), aby jeden druhému skládali komplimenty. Arcimovič se ve světě stal po zásluze fúzní osobností číslo jedna.

Stalin podepsal usnesení vlády o projektu 5. května 1951. První státem podporovaný výzkum fúze byl na světě. Díky I. J. Tammovi a A. D. Sacharovovi. Díky Olegu Alexandroviči Lavrentěvovi. A díky Ronaldu Richtrovi.

Ronald Richtr se narodil ve Falkenau am Eger, což není nikde jinde než v Sokolově nad Ohří. Jeho kariéra se dotkla Prahy, kde v roce 1935 vystudoval na Německé univerzitě. Po válce se objevil v Argentíně, kde mu prezident Juan Perón na projekt Huemul poskytl 300 miliónů amerických dolarů (hodnota roku 2003).



Arcimovičova sborná: Zleva I. S. Muchovatov, S. V. Mírnov, L. A. Arcimovič, V. S. Strelkov.  
Vzadu: tokamak T-3A

(archiv autora)

Pro srovnání – Lyman Spitzer a James Tuck dostali v USA na stelarátor resp. na Perhapsatron po 50 000 dolarů. V dubnu 1951 Perón na tiskové konferenci prohlásil, že díky argentinskému vědci (Richter neuměl slovo španělsky) zvládla Argentina řízenou termojadernou fúzi... Zpráva nebyla pravdivá, nicméně „zapálila“ státem podporovaný výzkum jak v SSSR, tak v USA.

Sacharovův toroidálně stabilizační elektrický proud v plazmovém prstenci byl buzen indukčně. V tento okamžik si někteří výzkumníci v Kurčatovově ústavu řekli, že vlastně žádné magnetické pole vnějších cívek nepotřebují, a začali studovat „čistě“ pinče, které se řídily Bennetovou formulí

$$T = J^2 / (4c^2N) \quad \{1\}.$$

Sacharovovými resp. Tammovými myšlenkami se řídila pouze malá skupina kolem I. N. Golovina a N. A. Javlinského.

Zda byl zájem o pinče v LIPAN iniciován zpoza železné opony, jsem se v azbukou psané literatuře nikde nedočel. Moskva se o tom nikde nezmiňuje, zatímco Západ ano. Zdá se to nanejvýš pravděpodobné – časově se výbuch zájmu Moskvy o pinče shoduje s pinčovým bohem na Západě a Fuchsovou špionážní aférou v roce 1950. V roce 1952 se už v LIPAN provozovaly hlavně pinče, na jejichž lineárních verzích Šafranov sestavil svoje známé kritérium:

$$q = (B_t \times r_p) / (B_p \times R_t) > 1 \quad \{2\},$$

kde  $B_t$  resp.  $B_p$  jsou toroidální resp. poloidální magnetická pole a  $r_p$  resp.  $R_t$  jsou vedlejší resp. hlavní poloměry plazmatu.



Čtvrtého července 1952 skupina vedená N. V. Filipovem na deuteriovém pinči zaregistrovala neutrony. Počáteční euforii zchladil L. A. Arcimovič: neutrony nebyly termojaderné. Studium pinče opustilo v Moskvě termojaderné ambice a transformovalo se na studium tzv. plazmového fokusu, když ve vedení skupiny zůstal N. V. Filipov.

Termojaderná skupina se pokorně vrátila k prvotní myšlence Tamma a Sacharova (toroidální magnetické pole – vnější cívky – a toroidální elektrický proud – indukce, poloidální magnetické pole).

V roce 1955 bylo postaveno první zařízení tokamakového typu s keramickou vakuovou komorou. Energetické ztráty vyzařováním čárového spektra byly tak obrovské, že byl velký problém vůbec výboj zapálit. Spektrální analýza ukázala na viníka – křemík, stavební prvek vakuové nádoby. TMP – *Toroid v Magnitnom Pole* – byl nahrazen v roce 1957 tokamakem T-1. Autorem názvu tokamak byl v roce 1957 I. N. Golovin. Nicméně již TMP splňoval Šafranovo–Kruskalovo kritérium: při silném toroidálním (podélném) poli bylo  $q > 1$ .

Tokamak T-1 měl vakuovou komoru z nerezové oceli tloušťky desetiny milimetru, takže oproti plazmovému provazci nepředstavovala žádnou vodivou konkurenci, tudíž nepotřebovala žádná přerušení. T-1 byl současně největším termojaderným zařízením na světě, které bylo v roce 1957 spuštěno v Harwellu pod názvem ZETA (Zero Energy Thermonuclear Assembly). Ambiciózní název prozradil cíl svých autorů: zařízení ZETA uvolní nejméně tolik fúzního výkonu, aby pokrylo příkon zařízení.

Tokamak T-1 a ZETA se lišily „pouze“ silou podélného magnetického pole. Když T-1 pole snížil, dosáhl stejných výsledků jako ZETA. Ovšem plazma bylo nestabilní. Potvrdilo se Šafranovo–Kruskalovo kritérium stability {2} výboje s podélným magnetickým polem.

Ani tokamak T-1 teplotu plazmatu markantně nezvýšil a ta se pohybovala kolem 100 000 stupňů. Energie stále unikala zářením, i když tentokrát místo křemíku zářily kyslík a uhlík. To ovšem nebyly stavební materiály vakuové komory, ale prvky adsorbované stěnou komory.

V roce 1956 navštívil středisko fúzního výzkumu Spojeného království Harwell v rámci státní delegace Sovětského svazu I. D. Kurčatov a přednesl konsternovanému publiku „*O možnosti zapálení termojaderné reakce v plynovém výboji*“. Dosud hluboko utajované téma odhalil demokratickému státu zástupce totalitního komunistického Sovětského svazu. Auditorium absurdně mlčelo, neboť nemohlo dotazy vyžradit, co o tajemném výzkumu ví. Nicméně v roce 1958 na II. Mezinárodní konferenci Atom pro mír v Ženevě byl fúzní výzkum jedním z hlavních témat a brzy se rodící mezinárodní spolupráce začínala přinášet první výsledky. USA a Spojené království odtajnilo fúzi dva dny před konferencí.

Tokamak T-2 využil konstrukčních prvků amerického stelarátoru B-2 a vakuovou komoru vybavil jednak vypékáním a jednak clonou – limiterem. Zahřívání komory na teplotu 450 °C zbavilo stěny adsorbovaných nečistot a clona vymezila průměr plazmového provazce a snížila možnost kontaktu plazmatu se stěnami vakuové nádoby.

Na jaře 1962 se podařilo K. A. Razumové a J. P. Gorbunovovi dosáhnout makroskopicky stabilního plazmatu po dobu dvou milisekund. Skvělé potvrzení Šafranova–Kruskalova kritéria stability, kdy silné toroidální (podélné) pole dokázalo zvýšit zásobu stability na  $q = 8$ .

Nestabilit se v tokamakovém plazmatu objevovalo tolik, že je vědci začali třídit po vzoru systematické zoologie na třídy, skupiny atd. Z těch dob se traduje výrok zahajující mezinárodní konference: „Dobrá zpráva – podařilo se nám porozumět a eliminovat nestability zmíněné na minulém setkání. Špatná zpráva – objevily se čtyři nestability nové!“ Nicméně na II. Mezinárodní konferenci o fyzice plazmatu a řízené termojaderné fúzi v anglickém Culhamu prohlásil vynikající sovětský teoretik B. B. Kadomcev: „...spatřili jsme obrysy břehu ohromného jezera nestabilit, které se ještě nedávno zdálo oceánem bez konce.“

V důsledku nepatrných nepřesností při volbě magnetických polí, nedostatečného očištění stěn vakuové komory a obecně z neznámých příčin zůstávaly ztráty energie veliké. Teplota i při velikém ohřevovém výkonu dosahovala několika miliónů stupňů, i když doba udržení energie přesahovala několikrát dobu udržení podle Davida Bohma. Bohmova difuze díky turbulencím byla rychlejší ( $\sim B^{-2}$ ) než teoreticky předpověděná, tzv. klasická ( $\sim B^{-1}$ ), kde B je intenzita izolujícího magnetického pole.

Blížil se rok 1968, rok s velkým R. Blížila se III. Mezinárodní konference o fyzice plazmatu a řízené termojaderné fúzi, která se příznačně konala na půdě Sovětského svazu v Novosibirsku.

Ještě před tragickou smrtí při havárii letadla v roce 1962 stačil v roce 1956 N. A. Javlinskij prosadit návrh tokamaku T-3. Mravenčí práce při hledání ostrůvků stability se vyplatila: plazma hustoty  $5 \times 10^{19} m^{-3}$ , teplota elektronů 8 miliónů stupňů, teplota iontů 5 miliónů stupňů a co bylo důležité – tepelné ztráty byly 50× menší než měly být podle Bohma. Tokamak T-3 vyrobil stabilní a klidné plazma, které nemělo s Bohmovým turbulentním plazmatem nic co do činění.

V roce 1956 prohlásil v Princeton Gun Club otec americké vodíkové bomby Edward Teller, že většina magnetických nádob je z principu nestabilní. Se skepsí Tellerova úzce souvisí odpověď V. S. Strelkova na jednu z otázek Oddělení tokamak ÚFP.

Jan Mlynář, ÚFP: „Souhlasíte s obecně přijímaným tvrzením, že při nečekaném úspěchu tokamaků sehrála důležitou úlohu osobnost L. A. Arcimoviče?“

V. S. Strelkov: „Především nesouhlasím s formulací nečekaný úspěch. Pracovali jsme, analyzovali výsledky a pokračovali a vůbec si nevíšali tvrzení Princetonu o univerzálnosti Bohmovy difuze. To zaprvé. Za druhé, L. A. Arcimovič sehrál bezesporu vynikající roli při rozvoji programu Tokamak. Jeho úloha se nejvíce projevila při analýze výsledků a organizaci experimentů na tokamaku T-3 a dalších zařízeních, když se stal vedoucím naší laboratoře po tragické smrti N. A. Javlinského.“

Teplota elektronů v tokamaku T-3 byla měřena nepřímo pomocí diamagnetického jevu. Zatímco Arcimovič byl přesvědčen, že jeho výpočty jsou správné, Američané nesouhlasili. V roce 1969 teplotu elektronů tokamaku T-3 změřila skupina anglických fyziků na pozvání Arcimoviče přímo novou metodou Thomsonova rozptylu. Arcimovič požádal Angličany o pomoc. To mimo jiné znamenalo dopravit Boeingem 707 Pákistánských aerolinií (jiné společnosti přímo z Londýna do Moskvy nelétaly) 26 beden o celkové hmotnosti 5 tun. Náklad obsahoval přísně embargované fotonásobiče a Faradayovu klec, která byla větší než vrata Boeingu. Na II. Mezinárodním sympoziu o udržení plazmatu v roce 1969 v sovětské Dubně člen anglické skupiny Derek Robinson potvrdil či spíše vylepšil Arcimovičovy výsledky a tokamak se rázem stal zařízením číslo jedna pro výzkum řízené fúze.

Niegel Peacock, vedoucí britské skupiny, telefonoval svému šéfovi Sebastianovi Peasemu do Londýna. Pease okamžitě volal přes Atlantik do kanceláře fúzního programu ve Washingtonu: „Arcimovič neměl pravdu! T-3 není tak dobrý, jak tvrdil, ten tokamak je lepší!“ Úžas v kanceláři vystřídal nevázané nadšení. Jeden z mužů nevydržel, vyskočil na stůl a zatančil kozáčka. Prokletý Bohm byl poražen!

„Hlavní závěr experimentů s uzavřenými nádobami spočívá v tom,“ prohlásil na konci novosibiřské konference L. A. Arcimovič, „že jsme se odtrhli od temného přízraku hromadných ztrát popisovaných Bohmovým vzorcem a našli cestu, jak zvýšit teplotu plazmatu na termojadernou úroveň!“ Největší americký Stellarator C v Princetonu je po tuhém odporu Mela Gottlieba – šéfa PPPL – přestavěn na diagnostikou obsypaný tokamak ST, tokamak staví Massachusetts Institute of Technology (Alcator – silné magnetické pole), Oak Ridge (Ormak – vyměnitelné vakuové komory s rozdílným poměrem velkého a malého poloměru), University of Texas (Texas Turbulence – ohřev plazmatu turbulencí), General Atomic (Doublet II – protáhlý průřez vakuové komory), anglický stelarátor CLEO v Culhamu se jmenuje CLEO-tokamak, francouzský v Fontenay-aux-Roses má jméno TFR, německý Max Planck Institute of Plasma Physics v Garchingu – Pulsator, Itálie ve Frascati – TTF, Japonsko – JFT-2 a další. Končí éra váhání a začíná čas tokamaků!

## Spojené království

Jako první zahájilo systematický výzkum řízené termojaderné fúze Spojené království. Druhá světová válka nemilosrdně prosela adepty na účast v „soutěži“ zvané *Výzkum řízené termojaderné fúze*. Vzadu zůstaly ve válce poražené Německo, Japonsko a Francie. Pouze vítězné mocnosti dostaly šanci: Spojené království, Spojené státy americké a Sovětský svaz. Sovětský svaz začínal prakticky od nuly – minimální tradice ve výzkumu jádra, válkou a předválečným stalinismem vydrancovaná země. Spojené státy americké – vynikající startovní pozice ekonomicky silného, válkou nedotčeného státu, avšak státu bez větší tradice ve fyzikálním výzkumu. Spojené království – dechberoucí tradice výzkumu fyziky atomového jádra a poměrně slušná ekonomika. Stručně:

Joseph John Thomson, Nobelova cena – objev elektronu, 1897

Francis Aston, Nobelova cena – objevitel izotopu a hmotnostního deficitu jádra atomu, 1919

Sir Arthur Eddington, astrofyzik – hypotéza slučovací reakce na Slunci, 1920

Robert Atkinson a Fritz Houtermans – jaderná fúze ve hvězdách ve světle kvantové mechaniky (článek bývá označován za začátek výzkumu termonukleární fúze), 1929

Sir John Cockcroft, Nobelova cena – Cockcroftův–Waltonův urychlovač, potvrzení Gamowovy tunelové hypotézy, 1932

Sir Ernest Rutherford (Novozélandčan), Nobelova cena – otec jaderné fyziky, teorie struktury atomu (jádro a elektronový obal), transmutace prvků, 1932, deuterium–deuteriová fúze, 1934

Sir Ernest Rutherford, Sir Mark Oliphant (Australan), Paul Harteck (Němec) – jaderná fúze (deuterium–deuterium) na zemi, 1934

G. P. Thomson, Nobelova cena – difrakce elektronů

Bylo otázkou času, kdo, kde a jak na britské půdě otevře téma řízené termojaderné fúze.

V roce 1905 kovový tovární komín firmy Hartley Vale Kerosene Refinery nedaleko Lithgow v Austrálii po zásahu bleskem připomínal pomačkanou gumovou hadičku, z které někdo vysál vzduch. Blesk dokázal stlačit dutý kovový komín. Tak byl objeven jev nesmírně důležitý pro výzkum termojaderné fúze – pinč efekt. Když elektrický proud dokáže stlačit kov, tak proč by nemohl stlačit (ohřát) plazma? Na své využití si pinč efekt, považovaný za kuriozitu bez praktického významu, počkal čtyřicet let.

George Paget Thomson dostal Nobelovu cenu již v roce 1937 za důkaz vlnového charakteru elektronů, ale v roce 1939 ho, jako mnoho jeho kolegů fyziků, zaujalo atomové jádro. Thomson již v roce 1941 spočítal, že lze vyrobit atomovou bombu. Po založení Atomic Energy Research Establishment (AERE) v Harwellu se opakovaně pokoušel – v roce 1945 poprvé – u jeho ředitele Johna Cockcrofta sehnat peníze na stavbu velkého pinče, později přes lorda Portala v Associated Electrical Industries (AEI) se pokoušel o totéž, ale neuspěl.

G. P. Thomson a Peter Thonemann

(archiv autora)



V roce 1946 spolu s Mosesem Blackmanem podali patent č. 817, 681 na stavbu termojaderného reaktoru: „*Improvements in or relating to Gas Discharge Apparatus for Producing Thermonuclear Reactions*“. Specifikace neobsahovala ani jedno slovo *plazma* či *pinč* (tedy přesněji řečeno „*pinch*“!) Jednalo se o zařízení ne nepodobné betatronu, kde svazek elektronů byl v toroidální nádobě urychlován vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem a jeho prostorový náboj elektrostaticky udržoval ionty. Ionizovaný plyn byl ohříván opět vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem. Do kompletního betatronu chyběla elektronová tryska a terčík, naopak přebývaly ionty. Magnetické pole proudu elektronů bránilo úniku nabitých částic na stěnu vakuové nádoby. Stablní dráhu elektronů zajišťovalo příčné magnetické pole. Aparatura měla sloužit buď jako zdroj fúzních neutronů pro výrobu umělých radioaktivních látek nebo pro přeměnu uranu na plutonium či thoria na uran 233, nebo tepla pro výrobu elektřiny.

Se svým konceptem a se zprávou Němce Maxe Steenbecka o podobném zařízení zvaném Wirbelrohr zamířil Thomson za dvěma doktorandy Stanem Cousinem a Alanem Warenem, kteří později v roce 1948 na Imperial College v Londýně, kde profesor G. P. Thomson přednášel, postavili malý lineární „Z-pinč“. Ware seznámil se svými pokusy Jima Tucka – zkušeného fyzika – účastníka projektu Manhattan, který se o totéž pokusil v Clarendon Laboratory na Oxford University spolu s Peterem Thonemannem. Posléze se Tuck na pozvání Edwarda Tellera vrátil do Los Alamos k práci na vodíkové bombě, ale na pinč nezapomněl ani v Americe.

Peter Clive Thonemann z University of Australia, Melbourne a Sydney nastoupil do Clarendon Laboratory v Oxford University s hlavou plnou myšlenek a sešitem plným výpočtů, jak uskutečnit řízenou termojadernou fúzi. Jeho školitel Douglas Roaf mu však zadal vývoj zdroje iontů, takže mladý Thonemann se za „školné“ 750 £ ročně věnoval svému koníčku „po pracovní době“.

Thonemannovi bylo jasné, že si nemůže vzít příklad z Rutherforda, ale ze Slunce. Nebude střílet, ale zahřívát. Nebude terčík, bude plazma. Stejně jako další vědci v té době si vzpomněl na čtyřicet let starý pinč efekt. Po úspěšné obhajobě tohoto nápadu na sympoziu v Clarendonu v lednu 1947 se mu podařilo získat finance a začal stavět skleněné a později měděné uzavřené nádoby prstencového – toroidálního – tvaru, ve kterých budil elektromagnetickou indukcí elektrický proud v plazmatu potřebný k pinčování. Nejprve střídavým napětím, ale velké ztráty iontů v okamžiku nulového magnetického pole při změně polarizace ho donutily přejít na pulsní režim. Zdrojem již nebyl buďič radaru, ale kondenzátorová baterie spínaná jiskřištěm. Trpělivě se seznamoval s vlastnostmi plazmatu a nevyhýbal se ani experimentům s přímými výboji. Ředitel Clarendon Laboratory Sir Cockcroft byl úspěchy Thonemanna nadšen. Tehdy si uvědomil, že jeho rozhodnutí podpořit systematického Australana na úkor slavného nobelisty G. P. Thomsona bylo správné.

Po sérii fungujících větších a větších Z-pinčů získal Cockcroft 200 000 £ od nově založené UK Atomic Energy Authority (UKAEA) na stavbu velkého zařízení. Hangár č. 7 – Harwell stál na pozemcích bývalého letiště – se stal svědkem stavby, provozu, úspěchů, ostudy a zmrtvýchvstání největšího fúzního zařízení své doby. V Hangáru 7 postavil Thonemann toroidální Z-pinč ZETA. O důležitý doplněk se zasloužil Roy Bickerton. Po sérii úspěšných pokusů navrhl potlačit smyčkovou nestabilitu podélným magnetickým polem vytvořeným toroidálními cívkami

nasunutými na vakuovou komoru. Přes navýšení nákladů a složitosti zařízení byl Bickertonův návrh schválen.

V tu chvíli se ZETA přiblížilo tokamaku na dosah ruky. Stačilo zatočit kolečkem – zvětšit podélné pole, aby systém splňoval Šafranovo–Kruskalovo kritérium stability {2}. Konečně Arcimovičovi chlapci v Moskvě se na okamžik domnívali, že v Hangáru č. 7 stojí tokamak.

Techniku později přejali Alan Ware v Imperial College v Londýně, Američané a prý i Rusové. Klaus Fuchs, který informoval Sovětský svaz o projektu Manhattan, totiž o výzkumu fúze ve Spojeném království věděl všechno.

Z důvodu utajení byl po aféře Klause Fuchse britský fúzní program z univerzit přesunut do státních ústavů. Proto bylo zařízení ZETA – vrchol tvůrčí činnosti Petera Thonemanna – postaveno v Harwellu.

Ze stejných důvodů se výzkumy z Imperial College v Londýně přesunuly do Associated Electrical Industries (AEI) v Aldermatsonu. Pro úplnost a jako důkaz bohatého britského fúzního program vzpomeňme polovinu padesátých let v Atomic Weapons Research Establishment a také v Aldermatsonu. AWRE se zajímalo o rázové vlny a lineární pinče. V roce 1951 fungovaly tedy pinče nejméně ve čtyřech laboratořích: Cousin a Ware v Imperial College v Londýně, Thonemann v Clarendon Laboratory v Oxfordu, Tuck v Los Alamos National Laboratory (Perhapsatron a Columbus) a Kurčatov v LIPAN.

Zařízení ZETA bylo uvedeno do chodu v polovině srpna 1957. Třicátého srpna pozdě večer zaregistrovali neutrony. Příští ráno, když uklízečky sbíraly prázdné plechovky, se nahlas divily, zda to nové zařízení funguje na světlé pivo...

Po kratších tahanicích mezi americkými a anglickými výzkumníky vyplývajících ze smlouvy o „termojaderném přátelství a spolupráci“ mezi USA a Spojeným královstvím publikoval 25. ledna 1958 časopis *Nature* zprávu o „záhadných“ neutronech identifikovaných na toroidálním pinči ZETA spolu s výsledky amerického projektu Sherwood. Zdůrazňují, že *Nature* o termojaderném původu neutronů nepsal! Domněnku o jejich termojaderném původu vyslovil pod silným tlakem médií na tiskové konferenci před pěti sty novináři 24. ledna 1958 ředitel Harwellu John Cockcroft: „*Neutrony jsou na 90 % termojaderného původu!*“ Také v tiskové zprávě se o termojaderném původu neutronů ZETA psalo. Novináři a politici si moc přáli když ne vymazat, tak snížit slávu sovětského Sputniku ze 4. října 1957. Navíc důvěra veřejnosti v jadernou techniku byla otřesena vážnou havárií reaktoru pro výrobu plutonia ve Windscale čtyři dny nato.

O termojaderném původu neutronů ZETA zapochybovali Arcimovič díky své intuici v Moskvě slovem „Dogshit“ a Spitzer v Princetonu po návštěvě ZETA na základě svých výpočtů. V půli roku 1958 dokázal Basil Rose změřením směrového rozložení emitovaných neutronů, že tyto nejsou termojaderné. Termojaderná komunita se z neutronové aféry ZETA dlouho vzpamatovávala.

Se zajímavým a hluboce pravdivým tvrzením přišel *Manchester Guardian*: „*Věci se mohly dít jinak, pokud by vědci obsluhující ZETA byli podrobeni každodenní kontrole svými kolegy z jiných laboratoří.*“ Zkrátka, kdyby neexistovalo nesmyslné utajování vědecké práce.

ZETA ovšem fungovalo dál a objevilo režim samoorganizovaného plazmatu – *reverse field pinch* – a byla na něm odzkoušena metoda měření teploty elektronů

*Thomsonovým rozptylem* laserového svazku, která v roce 1969 potvrdila na toka-maku T-3 rekordní teplotu. Uvažovaný následník ZETA – mnohem větší ZETA II – se ovšem neobjevil.

V průběhu šedesátých let se veškerý fúzní výzkum ve Spojeném království se-stěhoval do bývalého letiště Culhamu – dnes Culham Centre for Fusion Energy.

## Spojené státy americké

Pokud pomineme obdivuhodnou aktivitu Kantrowitze a Jacobse na konci třicátých let, pak koketovali s řízenou fúzí vědci shromáždění v Los Alamos za jiným úče-lem – probudit k životu fúzi neřízenou.

Pánové Teller, Fermi, Ulam a Tuck se nicméně nezávazně bavili řízenou fúzí na seminářích již v roce 1945. Fermi tehdy upozornil na toroidální drift v magnetické uzavřené nádobě. Teller dokonce došel k závěru, že získová fúze není možná.

Robert R. Wilson nakreslil kulový reaktor s plazmatem drženým magnetickým polem (*sic!*) a ohříváním mikrovlnami. Spolu s Robertem Cornogem se pokusili o experiment. Angličan James Tuck v zádech s plejádou „poradců“, mezi nimiž se vyskytovala jména jako Luis W. Alvarez či John von Neumann, se pokoušel do roku 1946 o „vstřícné“ deuteriové svazky.

Systematický fúzní výzkum řízené fúze ve Spojených státech začal v polovi-ně roku 1951 a byl iniciován stejně jako v Sovětském svazu Perónovou zprávou o „úspěchu“ jeho chráněnce Ronalda Richtera. Profesora astronomie univerzity v Princetonu Lymana Spitzera zastihla zpráva na lyžařské dovolené v Aspen. Jeden ze zakladatelů teoretické fyziky plazmatu, po němž byla pojmenována elektrická vodivost plazmatu (*Spitzer conductivity*) a autor myšlenky pozorovat vesmír teleskopem upevněným na satelitu (*Spitzer Space Telescope*) byl vnesen do kosmu raketou Delta z Mysu Canaveral 25. srpna 2003) se stejně jako Arcimovič v Moskvě zprávě usmál a raději „vymyslí“ stelarátor.

Stelarátor je magnetická nádoba, která ke svému životu nepotřebuje elektrický proud v plazmatu jako pinč nebo tokamak. Pokud by stelarátor byl úspěšný, pak by fúzní elektrárna nemusela být v principu pulzní. V toroidální vakuové nádobě stelarátoru je plazma od stěn izolováno magnetickým polem vytvářeným pouze vnějšími cívkami. Atomová komise (Atomic Energy Committee, AEC) poskytla Spi-tzerovi na stelarátor 50 000 amerických dolarů a stejnou sumu na pinč získal Tuck od ředitele LANL Norrise Bradburyho. Drift plazmatu v důsledku nehomogenity „krivého“ magnetického pole eliminoval Spitzer nejprve osmičkovým tvarem vakuové komory, později u stelarátoru typu „race track“ – závodní dráhy tvořené dvěma rovinkami spojenými zatáčkami – helikálním vinutím, které spolu se so-lenoidálním vinutím vytvořilo šroubovicové magnetické pole potlačující toroidální drift. Mimochodem, Spitzer jezdil do práce na kole a na „osmičkový“ tvar vakuové komory přišel během několika dnů!

Je vhodné zdůraznit, že Spitzerův nápad se stelarátorem je originální v tom, že se zásadně liší od různých variant pinče, kam patří i tokamak. Další originálních nápadů, jak se vypořádat s fúzí, byla celá řada. Některé z nich se pěstují do dnešní doby, ale žádný z nich na takové úrovni, aby byl považován za konkurenci tokama-ku. Stelarátor takovou konkurencí může být.



Ovládací místnost tokamaku Alcator C-Mod v Massachusetts Institut of Technology

(archiv autora)

Tokamak poráží stelarátor

(Ivan Havlíček)





Stelarátory sice nedosahují výsledků tokamaku, nicméně jejich zásadní přednost – možnost nepřetržité činnosti – láká a dodnes se provozují. Dvacátého května 2014 byl po osmiletém zpoždění a dvojnásobném navýšení nákladů slavnostně představen supravodivý stelarátor Wendelstein 7-X v Ústavu fyziky plazmatu Maxe Plancka v Greifswaldu. Wendelstein používá kromě 20 planárních i 50 3D cívek vskutku bizarních tvarů.

Projekt Sherwood v sobě kromě stelarátorů zahrnul řadu dalších typů magnetických nádob: lineární pinče Jamese Tucka a theta pinče v Los Alamos National Laboratory, magnetická zrcadla v Lawrence Livermore National Laboratory a Oak Ridge National Laboratory. Snaha o co nejrychlejší dosažení výsledků vedla k překotnému stavění nových zařízení, aniž by stávající byla vědecky „výzdimána“. V každém případě je třeba se zmínit o roce 1958, kdy na lineárním theta pinči Scylla I v Los Alamos byly při teplotě 15 milionů stupňů poprvé detekovány neutrony termojaderného původu.

V Lawrence Livermore National Laboratory postavili na počátku osmdesátých let pod vedením R. F. Posta 20 metrů dlouhé tandemové zrcadlo se supravodivými magnety a 20 MW ohřevu pomocí svazků neutrálních částic. Dopoledne obrovské zařízení slavnostně otevřeli a večer potichu zavřeli – gigantické zrcadlo nikdy nezařadilo. Došly peníze.

## Tokamak po roce 1968

Úhelný kámen – formule – fúzní fyziky, kterou sestavil nefyzik, inženýr John Lawson v roce 1955 a publikoval v roce 1957, spojuje tři fyzikální veličiny: hustotu plazmatu  $n$ , dobu udržení energie plazmatu  $\tau$  a teplotu plazmatu  $T$ . *Konstanta* je závislá na typu slučovací reakce:

$$n \tau \geq \text{konst. } f(T) \quad \{3\}$$

Doba udržení energie je měřítkem kvality tepelné izolace plazmatu. Tuto může zlepšit dvěma způsoby: zvýšením intenzity a zlepšením konfigurace izolujícího magnetického pole nebo zvětšením objemu plazmatu. Na první pohled se zdá, že alternativa malého tokamaku se silným magnetickým polem bude lacinější ze jmenovaných variant, na rozdíl od velkého tokamaku s menším magnetickým polem. Problém nastane, když nahradíte měděný vodič v cívkách supravodičem, abyste zlepšili energetickou bilanci zařízení. Chlazení standardního vodiče totiž spotřebuje velké množství vyrobené energie. Ovšem supravodivost funguje jen do určité horní hranice magnetického pole. Jinými slovy u malého tokamaku se silným magnetickým polem supravodič nelze použít. Většina tokamaků se vydala cestou zvětšování objemu plazmatu, tj. zvětšování rozměrů celého zařízení. Nicméně Technologický ústav v Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology, MIT) cestu silného magnetického pole a relativně malého zařízení zkouší. Výsledkem je řada tokamaků Alcator. V současné době Alcator C-mod s 9 tesly je tokamak s nejsilnějším magnetickým polem ve světě (tokamaků). Ostatní významné laboratoře stavěly tokamaky tak veliké, jak dovolily přidělené fondy. Pochopitelně i zkušenosti.

Brzy bylo zřejmé, že základní ohřev toroidálním elektrickým proudem – Jouleův neboli ohmický – k dosažení potřebné teploty nebude stačit. Zvětšováním elektrického proudu v plazmatu dojde k narušení Šafranova–Kruskalova kritéria stability, což vůbec není vítaný důsledek. S růstem teploty plazmatu také klesá jeho elektrický

odpor, a tudíž i účinnost ohmického ohřevu. Z nejrůznějších metod – takzvaných dodatečných ohřevů – se ujaly dvě. Ohřev elektromagnetickými vlnami na vybrané rezonanční frekvenci plazmatu a ohřev vstříkem svazku vysokoenergetických neutrálních částic (Neutral Beam Injection, NBI).

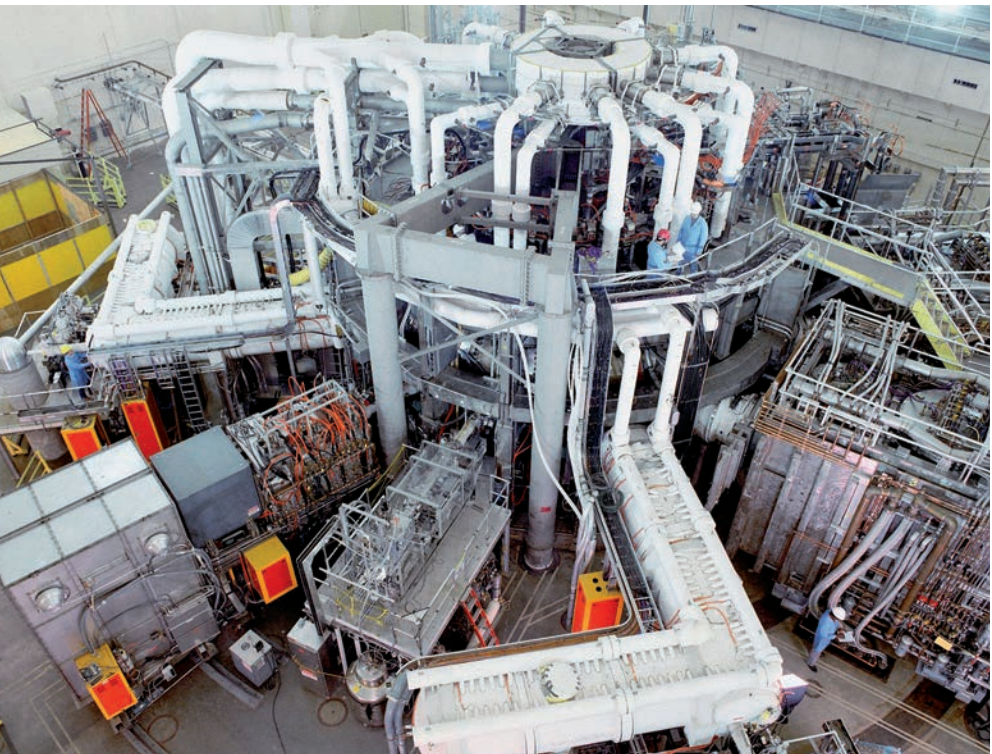
Všimněme si několika gentlemanů, kteří pohnuli tokamakovým světem.

Princeton Large Torus (PLT) spuštěný v roce 1975 byl první tokamak s elektrickým proudem v plazmatu přes 1 megaampér (milion ampérů). PLT neměl stabilizující měděný *kožuch*, ale jeho funkci zastoupilo příčné – poloidální – magnetické pole vytvářené zpětnou vazbou v reálném čase řízenými cívkami. Nicméně prvním tokamakem bez *kožuchu* byl tokamak TO-1 z Kurčatovova ústavu. Transformátor tokamaku PLT se jako první obešel bez jha a zahájil tak éru tokamaků s vzduchovými transformátory, které nebyly limitovány nasycením svého jádra.

Dodatečný ohřev PLT byl impozantní – dva svazky energetických neutrálních částic, každý o výkonu 2 MW (před ním tokamak ATC musil vystačit s 80 kW) a 10. srpna 1978 dosáhl PLT teploty plazmatu 85 milionů stupňů. Výstřel číslo 68 430, 3. srpna 1978, v 17 hodin 52 minut 12 sekund. Nikdy nebude známa jeho teplota – vrchol křivky zmizel za horním krajem obrazovky. Jeden z rozvášněných fyziků zavolal do Itálie, kde studovali podobný problém, a tak se stalo, že vedoucí laboratoře Wolfgang Stodiek se ráno přihnal rozčilený, že mu volali z Washingtonu, co se děje... Oficiálně se udává dosažená teplota 60 milionů stupňů.

Jedno ze dvou termojaderných zařízení schopných provozovat termojadernou reakci deuterium-tritium - dnes už neexistující americký tokamak TFTR

(archiv autora)



Sovětský tokamak T-7 byl prvním, který použil supravodivé cívky. Zatím pouze pro toroidální pole a z NbTi. Za pomoci vlnododové struktury vyvinuté a vyrobené v Ústavu fyziky plazmatu ČSAV dosáhl v roce 1982 rekordního neinduktivně buzeného proudu v plazmatu 200 kiloampérů po dobu 50 sekund. Rok 1982 byl vůbec plodným obdobím. Na německém tokamaku Asdex objevil 4. února profesor Fritz Wagner režim zvýšeného udržení energie plazmatu, takzvaný H-mód (*High* – vysoký). Byly rozpracovány metody dodatečného ohřevu. Byl to právě H-mód, který těmto metodám vytrhl trn z paty – plazma po jejich použití bylo jinak nestabilní a klesala doba udržení energie. Standardizoval se protažený tvar vakuové komory odpovídající písmenu D a divertor na dně vakuové komory. Protažený tvar vakuové komory zvyšuje parametr  $\beta$ , na kterém závisí ekonomické parametry tokamaku. Prvním tokamakem s průřezem vakuové komory ve tvaru písmene D byl sovětský tokamak T-8. Na tokamaku JET jeho autor Henri Rebut ocenil díky D tvaru lepší mechanické vlastnosti komory, která snadněji odolávala ohromným silám magnetického pole. Arcimovič a Šafranov v Moskvě spočítali: teče-li elektrický proud poblíž centrálního solenoidu, má proud lepší podmínky – tedy další skóre pro průřez komory tvaru písmene D. D-průřez je výhodný pro instalaci divertoru. Divertor, kromě jiného, usnadňuje nastavení režimu H-mód.

Uvedené příklady dokumentují, jak svět infikovaný tokamaky pracoval a postupoval rychle kupředu. V okamžiku, kdy bylo jasné, že extrapolace výsledků tokamaků sedmdesátých let dává za pravdu tvrzení, že čím větší objem plazmatu, tím vyšší teplota (tím lepší je udržení energie), byl vytyčen směr dalšího bádání. Ostatně, škálovací vzorce ukazující závislost parametrů plazmatu na rozměrech tokamaku byly vynikajícím výsledkem spolupráce tokamakových laboratoří. Mimo jiné potvrzují, že teplota iontů  $T_i$  a doba udržení energie v plazmatu rostou s velikostí elektrického proudu  $I_p$  v plazmatu. Nastal čas postavit obry!

Na počátku sedmdesátých let byly nejvýkonnějšími tokamaky francouzský Tokamak Fontenay aux Roses (TFR) a sovětský T-4, které dosahovaly 400 kiloampérů elektrického proudu v plazmatu. Již zmiňovaný americký PLT, spolu s tokamakem T-10 a dalšími, se staly odrazovým můstkem pro stavbu dosud největšího tokamaku na světě – evropského tokamaku Joint European Torus, dobře známého pod zkratkou JET. (Pozor, neplést si s jadernou elektrárnou Temelín – ETE!)

Mezi „obry“ patří evropský tokamak JET, japonský tokamak JT-60U, sovětský tokamak T-15 a patřil k nim i dnes již rozebraný americký tokamak TFTR. Vzhledem k tomu, že tokamak T-15 je zakonzervovaný, tak dnes je rozměrově největším tokamakem JET. Jemu sekundují americký DIII-D, francouzský ToreSupra s nejdelším pulsem horkého plazmatu 6:30 minuty a rozptýlenou energií 1000 MJ, ruský T-10 a německý ASDEX Upgrade. Pochopitelně i jediné dva celosupravodivé tokamaky na světě – čínský EAST a jihokorejský KSTAR.

JET je výjimečný stroj. Články o historii jeho výzkumů jsou skutečně vzrušujícím čtením. O prestižní volbu místa stavby tehdy ve finále soutěže šesti míst tvrdě bojovaly Anglie a Německo. Zdánlivě neřešitelný spor zakončila nepřijemná historie s více méně šťastným koncem, kdy dopravní letadlo Lufthansy Flight 181 unesla Organizace pro osvobození Palestiny a cestující byli s britskou pomocí

osvobození. Německý kancléř Helmut Schmidt se slavnostně vzdal kandidatury na stavbu JET ve „prospěch“ britského premiéra Jamese Callaghana.

Svého úkolu vedoucího projektu se obdivuhodným způsobem zhostil Paul-Henri Rebut. Tokamak JET byl postaven podle časového programu, nepřekročil odsouhlasené náklady a naopak byl překročen téměř dvakrát plánovaný proud plazmatem 3,7 MA na 7 MA! D-tvar průřezu komory nejen že splnil Rebutovy předpoklady, ale ukázal se jako nesmírně šťastná volba. D-tvar totiž umožnil dodatečnou instalaci divertoru, což byla nutná podmínka vybuzení H-módu. H-mód byl totiž objeven a ověřen až po dokončení tokamaku. JET běžně pracoval s pulsy mnohem většími, než na jaké byli vědci dosud zvyklí – 10 až 20 sekund, stejně tak doba udržení energie vzrostla tisíckrát a měřila se v sekundách. Konečně 9. listopadu 1991: 10 % tritia stačilo uvolnit 1,7 MW fúzního výkonu, celkem 2 MJ fúzní energie. Poprvé na světě bylo na Zemi uvolněno řízeným způsobem významné množství energie fúzí.

Optimální poměr směsi deuteria a tritia D : T je 50 : 50. Proč tedy JET použil poměr deuteria a tritia 90 : 10? Rebut chtěl instalovat divortor, neboť se ukázalo, že to je lék na pokles doby udržení energie v důsledku růstu teploty plazmatu díky dodatečnému ohřevu. Ten lék, jak už víme, se jmenoval H-mód. Rada tokamaku JET chtěla co nejdříve výsledky, chtěla konečně termojadernou reakci, chtěla napustit tritium. Ovšem instalovat divortor v aktivované vakuové komoře bez dálkového ovládní, které ještě nefungovalo, bylo více méně nemožné. Strany se dohodly na kompromisu. Zapálí se termojaderná reakce, ale při malém množství tritia, takže se neaktivují stěny komory a bude se moci instalovat divortor ručně i po tom, co v komoře proběhne reakce D–T.

Obnažená cívka toroidálního magnetického pole tokamaku ITER

(ITER organization)



Tritiové experimenty ukázaly, že ohřev  $\alpha$ -částicemi – produkty reakce deuterium–tritium – funguje. Tato skutečnost nebyla předem vůbec zřejmá. Dodnes rekordního výkonu a rekordní uvolněné energie dosáhl JET v roce 1997 již s divertorem – 16,1 MW a 22 MJ. To už bylo jasné, že plazma je ohříváno produktem fúzní reakce –  $\alpha$ -částicemi (jádry helia). Dodatečný ohřev vysokoenergetickými svazky neutrálních částic dodával plazmatu tokamaku JET 20 MW a  $\alpha$ -částice cca 3 MW. Výkonové zesílení plazmatu  $Q = 0,65$ . O rok později JET úspěšně předvedl důležitou technologickou akci, když vyměnil postupně celý divertor pomocí dálkově ovládané techniky.

Posledním významným příspěvkem tokamaku JET k fúznímu světu, to je k provozu ITER, bylo úspěšné spuštění inovovaného zařízení v roce 2013 – s první stěnou ze stejných materiálů, jaké bude používat ITER (ITER like wall). Vakuová komora byla obložena beryliem a divertor wolframem.

JET přinesl zásadní pokrok ve schopnostech řídit vysokoteplotní plazma, protože umožňuje automaticky reagovat v reálném čase na chování plazmatu pomocí prakticky všech výkonových systémů, včetně systémů ohřevu. Byl vyzkoušen kvazistacionární režim ELMy H-mód.

Velkým soupeřem tokamaku JET byl americký tokamak TFTR v Princeton Plasma Physics Laboratory. Zatímco v Evropě se Němcům nelíbilo ruské slovo tokamak a proto JET použil „torus“, Američanům ruština nevadila a TFTR začíná „tokamakem“. Bylo jasné, že obě zařízení soupeří o fúzní prvenství. Američané začali projektovat později než JET, ale ztrátu dohnali rychlou volbou místa – Princetonu. TFTR byl spuštěn na Štědrý den roku 1982. JET byl do provozu uveden o půl roku později. Na rozdíl od JET měl TFTR kruhový průřez vakuové komory, který nedovoloval instalaci divertoru a tudíž nastavení režimu H-mód. Princeton věren své zásadě – stavět tak jednoduše, jak jen možno – na něco takového, jako je protáhly tvar vakuové komory, ani nepomyslel. Vyřešit problém poklesu udržení energie při použití dodatečného ohřevu pomohl svérázný experimentátor Jim Strachanan, který objevil tak zvané supershots – supervýstřely. Stěny komory obložil uhlíkem, komoru pečlivě vyčistil několika výstřely do helia a pak do relativně řídkého plazmatu vstřelil energetický svazek tritiových atomů. Výsledkem byla lavina fúzních neutronů.

Jak JET, tak TFTR byly od počátku vybaveny pro práci s tritiem. Silná betonová zeď chránila obsluhu před neutronovým zářením. Tokamak TFTR napustil tritium poprvé v roce 1993, dva roky pro tokamaku JET. Zvolil od počátku optimální poměr 50 : 50 a výsledkem bylo 10 MW fúzního výkonu v roce 1994. Centrální teplota plazmatu v TFTR byla 510 miliónů stupňů.

Japonsko postavilo v roce 1985 jako třetí stát velký tokamak JT-60. Japonské zařízení nebylo navrženo pro práci s tritiem, ovšem i jeho výsledky s deuteriovým plazmatem byly velmi dobré a cenné. Zajímavé bylo, že úspěšný byl až druhý divertor v roce 1987 – JT60U, neboť první „překážel“ elektrickému proudu v plazmatu. Japonci údajně odmítli radioaktivní tritium, neboť jeho přítomnost nebyla po zkušenosti s Hirošimou politicky průchodná. Zajímavé bylo, že atomové elektrárny Japoncům nevadily.

Do projektu ITER dnes patří tzv. *širší přístup* (*Broader Approach*). Ten zahrnuje modernizaci, či spíše stavbu zcela nového japonského tokamaku. JT-60SA bude

celosupravodivý tokamak s bohatým ohřevovým systémem – kupříkladu 14 svazků neutrálních atomů s objemem plazmatu větším než má JET. Japonská termojaderná godzila se staví za finanční a personální pomoci Evropské unie. Budoucí druhý největší tokamak na světě, na rozdíl od JET a ITER, nebude opět pracovat s tritiem.

Rodiště tokamaku v Moskvě se snažilo nezůstat pozadu, ale značné náklady obrovských tokamaků se ukázaly nad aktuální síly ruského výzkumu. Proto se původně ohlášená konstrukce tokamaku T-20 uskrovnila na tokamak T-15 spuštěný v roce 1988 – a nakonec i ten byl příliš drahý, po sto výstřelech byl zakonzervován a dodnes nefunguje. Sice se objevily zprávy, že jeho činnost bude obnovena, dokonce bude instalován modifikovaný divertor, ale zůstává jen u zpráv. T-15 byl největší tokamak na světě se supravodivými cívkami toroidálního pole z  $\text{Sn}_3\text{Nb}$ . T-15 měl kruhový průřez vakuové komory a cívky poloidálního pole nebyly supravodivé.

JET poprvé vyzkoušel dodávku a zpracování tritia v uzavřeném okruhu.

Všechny zde jmenované a nejmenované tokamaky pracují ve prospěch mezinárodního tokamaku ITER, který od roku 2007 staví Evropská unie, Rusko, Spojené státy, Čína, Jižní Korea a Indie v jihofrancouzském regionu Cadarache. Na úspěchu či neúspěchu do značné míry závisí pokračování výzkumu řízené termojaderné fúze.

Mezi komerční fúzní elektrárnou a tokamakem ITER by měla vyrůst demonstrační fúzní elektrárna DEMO. Zřejmě na principu tokamaku. Již dnes DEMO začínají navrhovat Čína, Jižní Korea a Evropa.

## ITER

To, že se již během stavby velkých tokamaků v sedmdesátých letech minulého stoletím začalo uvažovat co dál, je logické, ale pravděpodobnost úspěchu zásadního rozhodnutí nebyla veliká. „Majitelé“ velkých tokamaků každý zvlášť uvažovali o *dalším kroku* (Next Step), jehož lákavým cílem mělo být zapálení fúze (ignition), to je stav, kdy fúze hoří sama a není třeba přitápět zvenčí. Na návrh ředitele Kurčatovova ústavu Jevgenije P. Velichova se protagonisté dalšího kroku spojili v rámci Mezinárodního tokamaku – reaktoru (International tokamak reactor, INTOR). Studie počátkem osmdesátých let pod hlavičkou IAEA pojmenovala řadu technických problémů konstrukce fúzní elektrárny a odstartovala výzkumné programy, které je měly řešit. Co se týče fúzní fyziky, projekt INTOR významné výsledky nepředvedl. Zůstalo jen u několika setkání a sborníků z nich. Příčiny byly nejméně dvě – stavěly se už velké národní tokamaky a velké tokamaky se teprve stavěly. Nebyl čas ani peníze, nebyly zkušenosti – jinými slovy skok od stávajících tokamaků k dalšímu kroku byl nad síly zúčastněných. Přesto nelze říci, že projekt INTOR byl neúspěšný. INTOR připravil půdu pro skvělý projekt ITER.

První zmínka o tokamaku ITER, který měl být do jisté míry opravou do ztracena ukončeného projektu INTOR, vyšla (jak jinak) od bývalého Sovětského svazu. Generální tajemník Michail Gorbačov na popud svého přítele a spolužáka z univerzity, vědeckého poradce Jevgenije P. Velichova sondoval půdu při rozhovoru s Mitterandem, francouzským prezidentem, aby posléze navrhl v roce 1985 stavbu mezinárodního tokamaku ITER na summitu v Ženevě americkému prezidentovi Ronaldu Reaganovi. ITER jako demonstrace spolupráce Východ–Západ byla lákavá

a stvrdil ji podpis dohody mezi Ruskem, Spojenými státy, Japonskem a Evropskou unií, v jejímž rámci se zapojila i Kanada. Cílem bylo zapálení fúze. Odhady hovořily o elektrickém proudu v plazmatu 20 MA, době udržení 6 sekund a rozměrech třikrát větších než rozměry tokamaku JET. Pochopitelně protáhlý průřez vakuové komory ve tvaru písmene D, divertor a možnost práce s tritiem. A všechny cívkové magnetického pole ze supravodivého materiálu.

V roce 1998 byla hotova Závěrečná zpráva, kde se mimo jiné objevil i příspěvek České republiky reprezentované Ústavem fyziky plazmatu ČSAV. Současně se USA představily jako krajně nespolehlivý partner a pro nedostatek financí vzdaly účast. Nebyla to první Jobova zpráva. Rozpadl se Sovětský svaz a nástupnické Rusko mělo z počátku jiné priority než řízenou termojadernou fúzi. Japonsko, pilíř světové ekonomiky, mělo problémy. Nicméně Evropská unie, Rusko a Japonsko vyjádřily vůli v projektu pokračovat. Ambiciózní cíl ITER byl ale redukován a výsledkem už nebyl autonomní zdroj, ale zesilovač výkonu. Zesílení  $Q = 10$  ohřevového výkonu plazmatu uvolněným fúzním výkonem mělo uskutečnit 15 MA proudu a dvakrát větší rozměr oproti tokamaku JET.

Lacinější ITER v roce 2003 přilákal Čínu, na kterou se nalepily Spojené státy, a ještě téhož roku se přihlásila Jižní Korea. Indie v roce 2006 uzavřela počet partnerů číslem sedm a završila „účasti“ více jak poloviny obyvatel zeměkoule.

Stejně jako v případě stavby tokamaku JET nastalo období tvrdých jednání, kde bude nejdražší vědecko-technický (pozemský) projekt postaven. První se přihlásila Kanada. Nabídla Clarington v sousedství jaderné elektrárny Darlington Nuclear Generation Station – zdroje tritia. Evropa zpočátku vstoupila do konkurzu se dvěma kandidáty – španělským Vandelos a francouzským Cadarache. Japonsko kontrovalo s rybářskou vesničkou Rokkasho-Mura. Jednání byla neuvěřitelně tvrdá, až se nakonec počet kandidátů redukoval na Cadarache a Rokkasho. Po dvou letech jásala Evropa. Oficiálně se tak stalo 28. června 2005 v Moskvě.

Poslední tři kroky ke komerční termojaderné elektrárně jsou následující:

- Velké tokamaky (JET, JT-60U, TFTR, T-15) – důkaz vědecké proveditelnosti řízené fúze
- Tokamak ITER – důkaz technické proveditelnosti fúze jako zdroje energie
- Demonstrační elektrárna DEMO – odhad ekonomické konkurenceschopnosti fúze.

První bod je splněn, druhý se staví a třetí projektuje.

Stavba tokamaku ITER je po všech stránkách úžasné dílo. Vedle špičkové technologie, způsobu zadání a koordinace výroby a dopravy komponent (až 800 tun převážených po moři a především posledních 100 km po souši) tu jsou technologie zcela neznámé: materiál první stěny vakuové komory a jeho tepelná a neutronová zátěž, spojování odlišných materiálů, instalace komponent uvnitř vakuové komory, plození tritia v testovacích modulech obalu (Test Blanket Modules), supravodivý materiál v dosud nevídaném množství, zdroje svazků vysokoenergetických neutrálních částic a zdroje, antény vysokých frekvencí dosud neprovozaných výkonů, dálková vysoce přesná manipulace s hmotnými komponentami vnitřku vakuové komory. Ve hře je nejenom věda a technika, ale i soužití a zázemí personálu původem z celého světa a komunikace s obyvateli okolí stavby. ITER je první fúzní zařízení s jadernou licenci vůbec. Premiér, se kterými se musí vedení ITER organization vypořádat, je mnoho. Až se chce říci, čeho je hodně, toho je příliš!

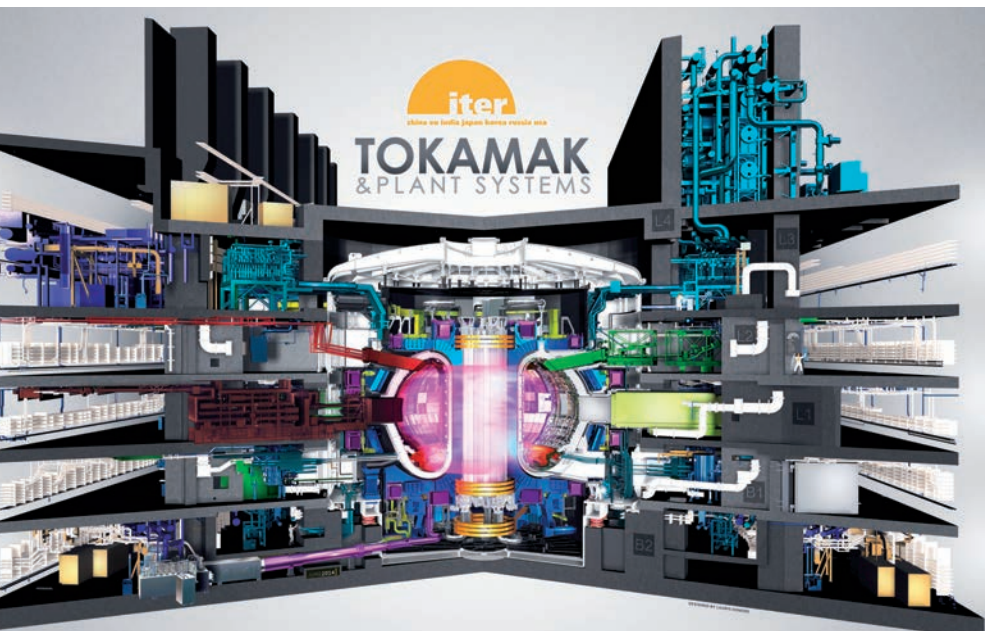
Fungování ITER organization je následující. V čele organizace je ředitel se čtyřletým mandátem. V rámci širšího přístupu jím je Japonec. Dnes to je prof. Osamu Motojima. ITER organization má tři oddělení: Bezpečnosti a kvality, Výstavby a Administrativy. Své požadavky tlumočí sedmi domácím agenturám – každý partner má svoji. Evropská agentura ITER sídlí pod názvem Fusion for Energy (F4E) v Barceloně. Agentury vypisují výběrová řízení na výrobu komponent a práce podle smluv s ITER organization (Procurement Arrangements). Evropská unie platí cca polovinu nákladů na stavbu ITER a zbývajících šest partnerů si rozdělilo zbytek rovným dílem. Přidělené náklady se hradí v cenách výrobků. Z toho důvodu má ITER organization vlastní měnu.

Stavět se začalo poblíž největšího francouzského výzkumného ústavu pro atomovou energii CEA Cadarache v roce 2007 a v roce 2014 se staveniště dočkalo prvního transportu. Koncem roku 2013 a počátkem roku 2014 projely trasu z přístavu Étang de Berre do Saint Paul-lez-Durance zkušební konvoje. V polovině roku 2014 byla na čtyřicetidvouhektarovém pozemku postavena větší část administrativní budovy a 257 m dlouhá hala pro montáž největších cívek poloidálního pole. Jsou betonovány základy tokamakového komplexu, který zahrnuje halu pro vlastní tokamak, halu pro tritiové hospodářství a halu pro diagnostiku. Nedávno byla dokončena dočasná hala pro montáž centrálního solenoidu.

Po roce 2020 by měl ITER zapálit první plazma. Pak bude deset let odlaďovat reaktor napuštěný pouze deuteriem, aby vnitřek vakuové komory nebyl radioaktivní a byl přístupný pro obsluhu, a konečně po roce 2027 se počítá s tritiem. O projektu DEMO – demonstrační elektrárně – vážně uvažuje Čína, Jižní Korea a Evropská unie. Spouštěcím impulsem pro zahájení projektů DEMO by mohla být úspěšná činnost ITER.

Základy tokamakového komplexu: reaktor, tritiové hospodářství, diagnostika

(ITER organization)





## Ze vzpomínek fúzisty

*Bylo to dost kuriózní období, kdy v USA nebyl žádný funkční stelarátor (byť to byl výmysl Lymana Spitzera z Princetonu) a v SSSR žádný funkční tokamak. Tehdy stavěli T-10. Ostatně, podobný rozdíl mentalit se projevil i v kosmickém výzkumu. Není pochyb o tom, že v padesátých letech byli Sověti o několik let před Američany. Teprve, když JFK založil NASA, tak se situace razantně změnila.*

*Už na další konferenci IAEA v Madisonu (stát Wisconsin) přišli Američané s výsledky z tokamaku ST (předělaný stelarátor C), které, až na drobné rozdíly (měli horší vakuum), potvrdily výsledky z T3. Na tuto konferenci jsem propadl „tunelovým efektem“. Poslali jsme tam jakýsi příspěvek o nelineární interakci e-svazku s plazmatem, který byl zařazen do „rapporteur presentation“ s Ukrajinci z Charkova. Bohužel stalo se, že nedlouho před touto konferencí v Madisonu byl Aerosalon v Paříži, odkud emigroval šéfkonstruktér sovětských palubních systémů. To mělo za následek, že řadě lidí, kteří měli jet do Madisonu, nevydali pas. Akademik Zavojskij čekal s kufrem na letišti a pas mu nedali, pak už skoro nikdy do Kurčatova nepřišel a zanedlouho zemřel.*

*Po tomto zemětřesení mě požádal prof. Šafranov, který koordinoval Sovětskou účast na IAEA a už o tom věděl, abych ukrajinské články v Madisonu prezentoval já. Psal se rok 1971 a o cestách do USA jsme si mohli jenom nechat zdát. Z Vídně mě bombardovali, jestli to беру, a já jsem nemohl nic pořádného odpovědět. Nakonec to Vaňa (ředitel Ústavu fyziky plazmatu ČSAV) vytáhl na Národní (Prezidium ČSAV), tam vzali sovětskou žádost velmi vážně a během 14 dnů mi dali 25 tisíc Kčs a žádost o výjezdní doložku. A tak jsem Vídni odpověděl, že to беру. Stalo se, bohužel, že se ty ukrajinské papíry někde ztratily. A tak jsem v sobotu před půlnocí čekal na Vindobonu (vlak z Vídně), kterou tehdy přijela paní inženýrka Výborná, která obstarávala kontakt naši Atomovky s Vídní. Předala mi obálku s více než 50stránkovými dokumenty o výzkumech v Charkově. Byly, samozřejmě, v azbuce a já měl v úterý odletět. Bylo to dost šilené i proto, že jsem anglicky uměl velmi špatně. Nakonec jsem cosi sesmolil a jel na letiště. Město Madison je na severu USA ve státě Wisconsin. Letadlo z Prahy letělo, samozřejmě, do New Yorku na J. F. K. airport. Tam jsem musel přesehnout na La Guardia airport a byla to detektivka. Bylo horko a já měl dost těžký kufř, který jsem musel pořád s sebou vláčet. Nakonec jsem letiště našel a odlétl do Madisonu. Tam jsem už potkal známé lidi. Před vystoupením jsem byl pěkně podělaný, ale nějak mi to odpustili. Vzpomínám si, že jedním z diskutujících byl prof. Kaw z Indie (tehdy z USA).*

*Během konference mi Harry Dreicer nabídl, abych jel na další konferenci, kdesi v Andoveru NH, že mi vše zaplatí. Zbyly jim peníze na pozvané sovětské účastníky, kteří nemohli přijet. Já jsem mu tehdy říkal, že mám americké vízum na 14 dnů a že bych chtěl vidět ještě některé americké univerzity. Na to on mi odpověděl: „No problem, zavoláme State Department a oni ti to vízum prodlouží.“ Pak jsem musel přiznat, že mám také výjezdní doložku na 14 dní. A on mi řekl: „No problem, zavoláme do Prahy, a oni ti to prodlouží.“ Tehdy jsem mu řekl: „Harry, moc ti děkuji, ale já bych se ještě někdy do Ameriky rád podíval.“ A trvalo to 21 let.*

*Podle vyprávění Pavla Šunky, bývalého ředitele Ústavu fyziky plazmatu AVČR, laureáta Medaile Ernsta Macha za zásluhy ve fyzikálních vědách.*

## Závěr

Pozorným čtenářům neuniklo, že brožurce se nepodařilo odpovědět přinejmenším na tři otázky. Myšlenka magnetické izolace plazmatu v zařízení TMP z roku 1950 je originální myšlenkou A. D. Sacharova, nebo nositel Nobelovy ceny znal úvahy americké skupiny Teller, Ulam, Tuck a Fermi z roku 1946?

Zprávy sovětských špiónů dostávalo jako první politické vedení, které rozhodovalo, kdo z vědců co dostane. Je jistá pravděpodobnost, že Sacharov, který se účastnil prací na vodíkové bombě, znal obsah Fermiho přednášek, které obsahovaly část „Použití magnetického pole ke snížení tepelné vodivosti“ (ve vodíkové bombě, poznámka autora). Na druhé straně ovlivnění pohybu nabitých částic magnetickým polem není až tak převratná myšlenka, která vyžaduje opisování. Spíše se Sacharov přiklonil k magnetické izolaci po přečtení Lavrentěvovy práce.

Druhou otázkou je zdroj inspirace nositele Nobelovy ceny G. P. Thomsona pinčem. Prý o něm přemýšlel již roku 1945 na Imperial College v Londýně, ale jeho patent fúzního reaktoru z roku 1946, zdá se, na principu pinče není.

Třetí otázka: Jak by se rozvíjel výzkum, kdyby se ho Sacharov aktivně neúčastnil pouhý rok, ale podstatně déle, zůstane nezodpovězena.

### Doporučená a odkazovaná literatura:

Garry McCracken, Peter Stott. *Fúze: Energie vesmíru*. Praha: Mladá fronta 2006. Z anglického originálu *Fusion: The Energy of the Universe* přeložili Milan Řípa a Jan Mlynář; Conellis M. Braams, Peter Stott. *Nuclear Fusion – Half a Century of Magnetic Confinement Fusion Research*. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing 2002; Gennadij Stěpanovič Voronov. *Šturm termojadernoj kreposti*. Moskva: „Nauka“ 1985; David Holloway. *Stalin a bomba – Sovětský svaz a jaderná energie 1939–1956*. Praha: Academia 2008, z anglického originálu *Stalin and the Bomb – The Soviet Union and Atomic Energy* přeložil Šimon Pellar; Oleg Alexandrovič Lavrentěv. *K istorii termojadernovo sintěza v SSSR*. IOF RAN No8 (M: IOF RAN 1993); Vitalij. S. Muchovatov. *Tokamaki, Itogi nauki i techniki, Fizika plazmy*. Část 1, Moskva 1980; Milan Řípa, Jan Mlynář, František Žáček, Vladimír Weinzettl, Petr Kulhánek, Karel Koláček, Jiří Matějčík. *Řízená termojaderná fúze pro každého*. Praha: ÚFP AV ČR, v. v. i. 2013; Daniel Clery. *A Piece of the Sun*. New York: The Overlook Press 2013.

Fotografie: ITER organization, archiv autora

Autor kreseb: Ivan Havlíček

Za cenné připomínky děkuji doc. RNDr. Janu Mlynářovi, Ph.D., a ing. Slavomíru Entlerovi.

Ve všech níže uvedených hlavních okruzích výzkumu ústav spolupracuje také s řadou mezinárodních institucí zabývajících se obdobnou problematikou.

**Oddělení Tokamak (TOK)** se zabývá experimentálním a teoretickým výzkumem fyziky horkého plazmatu, které je drženo magnetickým polem. K hlavním cílům výzkumu patří studium procesů v okrajovém plazmatu a studium interakce elektromagnetických vln s plazmatem. Oddělení provozuje od roku 2009 nový tokamak COMPASS a provádí optimalizaci plazmatu a podpůrných systémů, přičemž již bylo dosaženo plně kontrolovaného, stabilního a reprodukovatelného výboje plazmatu po dobu 300 milisekund. Do provozu bylo uvedeno také několik pokročilých diagnostických systémů, zejména k měření profilu hustoty a teploty plazmatu pomocí Thomsonova rozptylu. Tokamak COMPASS je zařazen mezi velké výzkumné infrastruktury vysoké priority v ČR. Vláda ČR schválila usnesením č. 207 ze dne 15. března 2010 tzv. Cestovní mapu velkých výzkumných, vývojových a inovačních infrastruktur v České republice jako strategický dokument. V této cestovní mapě je do kapitoly Energie zařazen i tokamak COMPASS.

Partnerskými organizacemi pro ÚFP v oblasti vysokoteplotního plazmatu jsou v České republice především MFF UK, FJFI ČVUT, FZÚ AV ČR, v. v. i., a Centrum výzkumu Řež, s. r. o. Na mezinárodní úrovni je výzkumná práce oddělení *Tokamak* plně integrována do programu EURATOM. V jeho rámci existuje intenzivní výzkumná spolupráce s pracovišti ve Francii, Rakousku, Belgii, Itálii, Velké Británii, Švýcarsku, Německu, Maďarsku, Portugalsku, Bulharsku a mimo rámec EURATOM i např. s Gruzíí a Ruskem.

Zástupci ÚFP coby členové evropské skupiny pro popularizaci fúze *Public Information Net* v rámci EFDA dlouhodobě spolupracují na popularizaci fúze v Evropě a především v České republice. Bohatá popularizační činnost (knížky, plakáty, skládačky, překlady, videa, výstavy, rozhlas a televize, dny otevřených dveří, kulaté stoly, internet, přednášky) je zaměřena na středoškolské studenty, ale i na širokou veřejnost.

ÚFP byl partnerem dvouletého (2012–2014) projektu *Materiály pro nové tisíciletí*, v němž byl garantem fúzní části projektu směřujícího k popularizaci technických oborů mezi žáky základních škol, studenty středních škol a bakaláře. Nositelem projektu byly Vítkovice – výzkum a vývoj – technické aplikace, a. s.

Úspěchem popularizace fúze v ÚFP je mnohaletá spolupráce s bývalým poslancem Evropského parlamentu Vladimírem Remkem, který coby člen výboru ITER prosazoval zájmy ITER v Evropském parlamentu. Zcela ojedinělým, světově unikátním počinem je didaktická pomůcka – stavebnice tokamaku (ÚFP AV ČR, Pro Model Průhonice, foto na obálce autor).

Mezi nejvýznamnější výsledky vědecké činnosti ústavu patří např:

- možnosti technologických aplikací laserem vytvářených plazmových jetů;
- vliv umístění vstříku plynu na vazbu dolně hybridní vlny v tokamaku JET;
- modelování pinčujícího kapilárního výboje pro návrh XUV zdroje záření;
- synchronizace 1kHz Ti-Sa laserového systému Legend s jodovým laserem.

Motto:

*K dosažení termojaderných teplot je třeba z 20 % kvalitní ohřev  
a z 80 % kvalitní politici.*

*Milan Řípa*

*„Jak ten člověk dokázal překonat všechny překážky?“ Einstein: „Nevěděl o nich!“*

*„Když slézáte horu, tak pokud nejste na samém vrcholku, nemůžete říci,  
že jste v cíli!“*

*Lyman Spitzer*

*„Termojaderná energie bude, až ji společnost bude potřebovat!“*

*Lev Andrejevič Arcimovič*

#### **V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:**

Václav Cílek: **Nové počasí**

Jan Bartáček: **Akademie věd ČR pro mladou generaci**

Adam Doležal: **Bioetika**

K. Balík, T. Suchý: **Biokompozitní náhrady kostní tkáně**

#### **DOSUD VYŠLO:**

Pavel Peterka: **Vláknové lasery**

František Kaštánek: **Biorafinace**

Ondřej Kučera: **Elektromagnetická pole živých buněk**

Edice Věda kolem nás | Co to je...

*Historie výzkumu řízené termojaderné fúze | Milan Řípa*

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., pro Ústav fyziky plazmatu Akademie věd ČR, v. v. i., Za Slovankou 3, 182 00 Praha 8.

Grafickou úpravu a obálku navrhl Jakub Krč, studio Lacerta.

Technická redaktorka Monika Chomiaková. Odpovědná redaktorka

Petra Královcová. Vydání 1., 2014. Ediční číslo 11759.

Sazba a tisk **SERIFA**<sup>®</sup>, s. r. o., Jínonická 80, 158 00 Praha 5.

Další svazky získáte na:

[www.vedakolemnas.cz](http://www.vedakolemnas.cz) | [www.academiaknihy.cz](http://www.academiaknihy.cz) | [www.eknihy.academia.cz](http://www.eknihy.academia.cz)