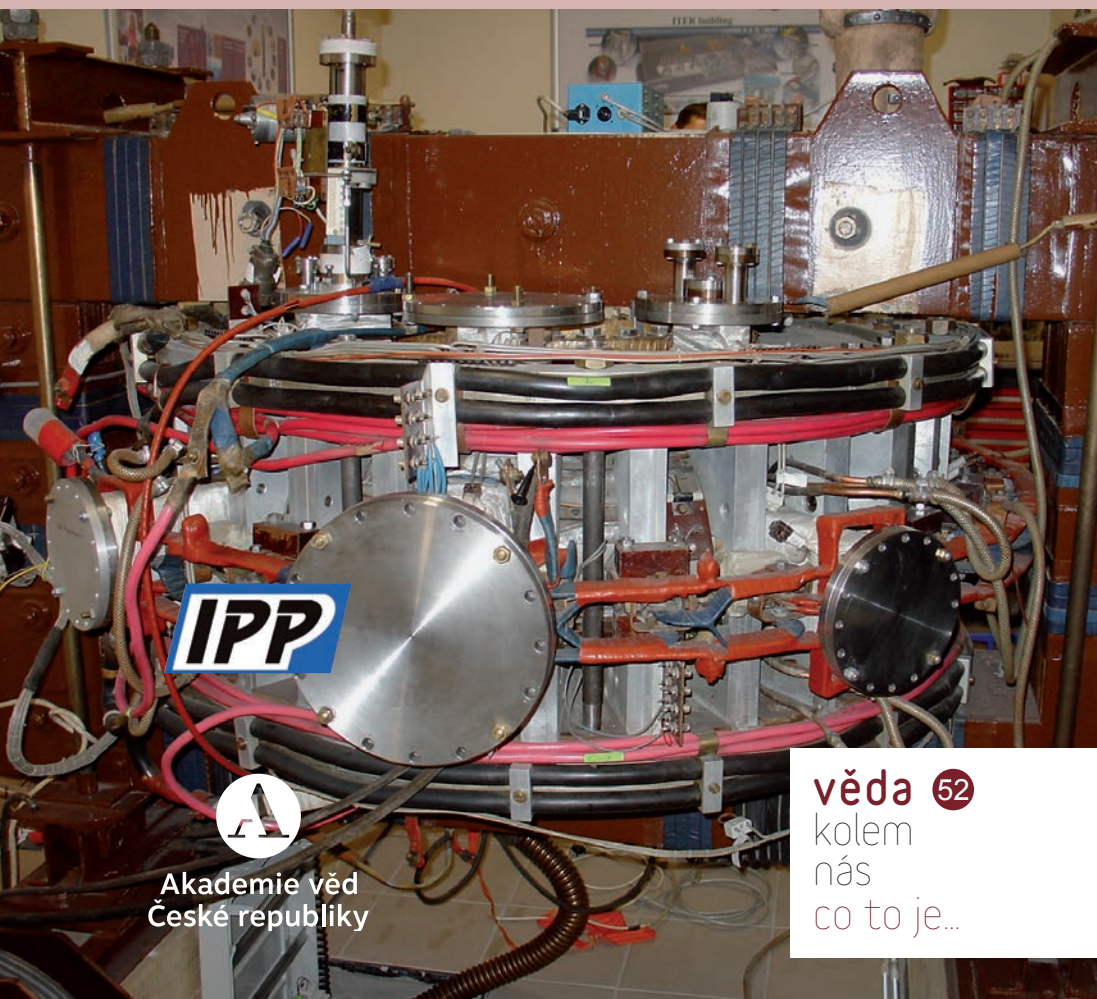


# Evropskou termojadernou fúzi rozvířil Wirbelrohr



**IPP**



Akademie věd  
České republiky

**věda 52**

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.

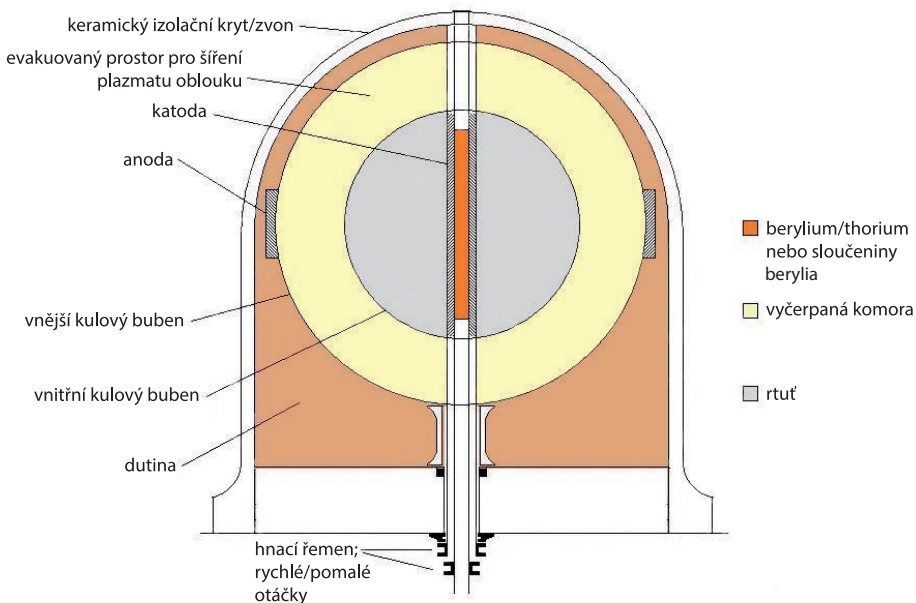
ÚFP se zabývá výzkumem v řadě oblastí:

- fyzika vysokoteplotního plazmatu a termojaderná fúze; ústav provozuje velkou výzkumnou infrastrukturu „tokamak COMPASS“; v rámci programu EUR-ATOM 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, destrukce 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 „Laserový systém 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 školicím 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.

## Nazi Bell

Druhá světová válka zahájila výzkum řízené termojaderné fúze ve Spojených státech amerických, kde finišoval projekt Manhattan. Obrátky nabral ve Velké Británii a v Sovětském svazu. Jaká byla role Německa, současného významného světového fúzního hráče?



Nazi Bell - nacistický zvon ([www.armorama.com](http://www.armorama.com))

Internet je jako oheň – dobrý sluha, ale zlý pán. Jednou vám posvítí na cestu, ale jindy se můžete například dočíst, že:

- *Fašistické Německo se za druhé světové války pokoušelo vyrobit atomovou pumu. K tomu jim měl pomoci urychlovač, který díky své kupolovité podobě nazývali Die Glocke – zvon (anglicky Bell).*
- *V Norsku narozený fyzik Rolf Wideröe ve své autobiografii píše o vývoji zvonu v Hamburku ve společnosti C. H. F. Müller.*
- *Wideröe nazval toto zařízení Wirbel-Rohr neboli vírová trubice.*
- *Patent její variace přihlásil v roce 1935 jak prof. Max Steenbeck, tak jeho švýcarský rival Dr. Walter Dallenbach. Po druhé světové válce Steenbeck spolupracoval se Sověty na replikaci nacistického zvonu. Sověti ho nazvali tokamak.*
- *Další jednotlivci, kteří nebyli přímo v kontaktu se samotným zařízením zvon, přispěli také k jeho vylepšení. Dr. Ronald Richter se snažil po válce oživit projekt zvonu v Argentině a pod politickým tlakem ho musel v roce 1952 demontovat, nicméně některé jeho postřehy byly zajímavé.*

- *Pionýrskou práci ve fotochemii odvedl v roce 1936 Dr. Ronald Richter, když vyvinul uhlíkový obloukový výboj pro chemickou továrnu v Sokolově v Československu.*

Vše bylo, ale „trochu“ jinak:

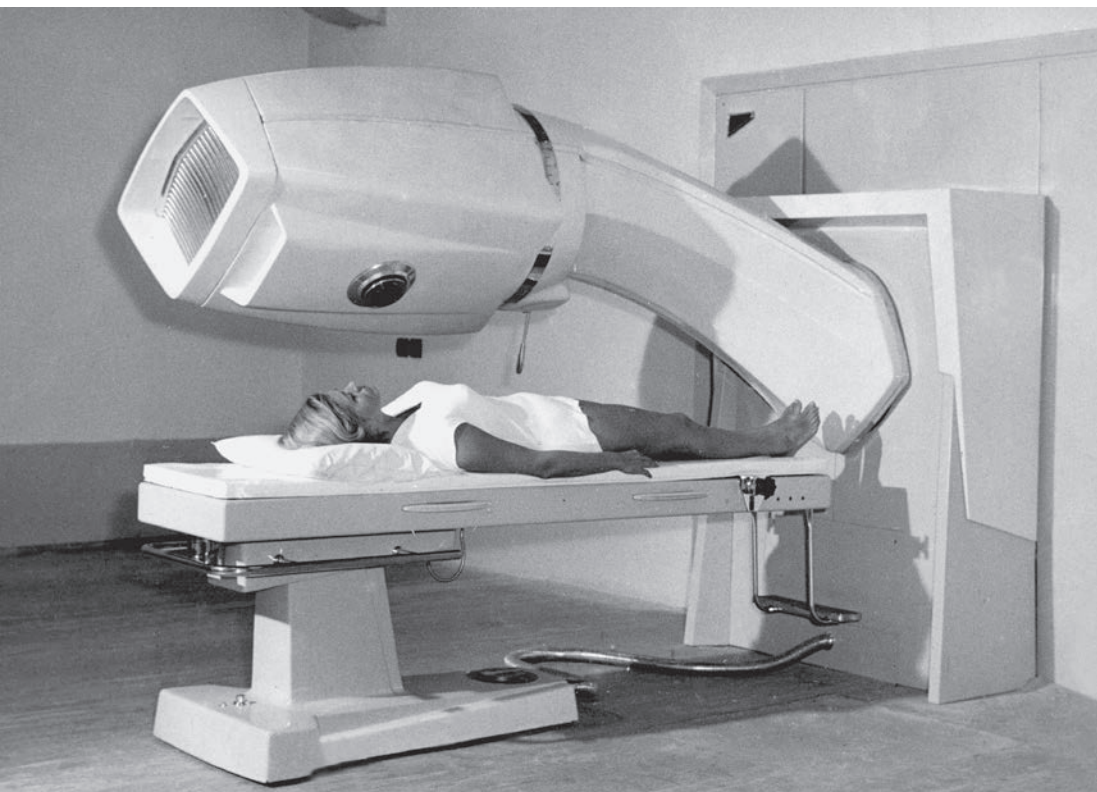
- Rolf Wideröe o společnosti C. H. F. Müller fungující na severu Hamburku ve Fuhrsbüttelu skutečně ve své autobiografii *A Pioneer of Particle Accelerators and Radiation Therapy* píše, ale nevyvíjel v ní zvon, nýbrž betatron.
- Wirbelrohrem nenazval verzi betatronu Rolf Wideröe, nýbrž Max Steenbeck, který při dvanáctiletém pobytu v Sovětském svazu nezkoumal zvon, nýbrž separaci izotopů uranu.
- Ronald Richter také v Argentině neresuscitoval zvon, ale snažil se o termojadernou fúzi pomocí obloukového výboje.

Neuvěřitelným nesmyslem je také následující tvrzení o původu tokamaku:

- *V roce 1948 oživil nacistický vědec Dr. Ronald Richter zařízení zvon v Argentině, kde svědkové později říkali, že to byl tokamak. Stojí za to to zdůraznit, poněvadž Sověti přišli s vynálezem tokamaku v padesátých letech a přitom je jasné, že pochází z nacistického Německa.*

Nebojte se, dějiny se přepisovat nebudou. Skutečnost je naprosto jiná...

Lékařský betatron vyvinutý v ÚFP ČSAV, vojenská nemocnice v Hradci Králové, rok 1961 (foto M. Řípa)



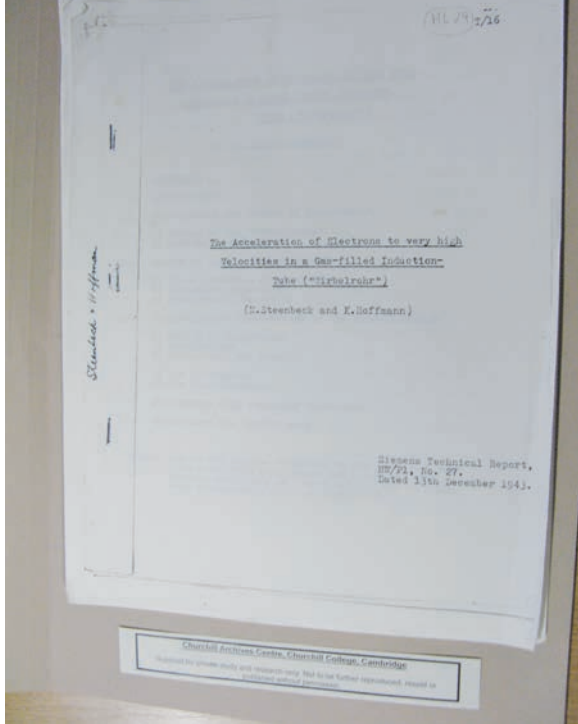
## Betatron

Počátkem dvacátého století se začal prosazovat nový směr poznání struktury hmoty, známý pod názvem srážkové experimenty. Průkopníkem nebyl nikdo jiný než nositel Nobelovy ceny Ernest Rutherford. Pozorování produktů srážek atomů odhalovalo zákony, kterými se řídily subatomární částice. Čím energetičtější srážky byly, tím více informací jejich pozorování poskytovalo. Brzy přestala stačit energie a intenzita spontánně vyzařovaných částic radioaktivních prvků a objevily se urychlovače částic. Nejprve to byly urychlovače lineární, kde částice urychlovalo elektrostatické pole, ale mnohem výhodnější se ukázaly urychlovače kruhové. V současné době je špičkovým zařízením velký hadronový urychlovač (Large Hadron Collider, LHC), který v evropském středisku atomového výzkumu CERN využívá ke zdvojnásobení srážkové rychlosti dvou vstříčných svazků. Prapředkem urychlovače LHC s vakuovou komorou o průměru 27 kilometrů procházející Francií a Švýcarskem je i betatron, oproti LHC spíše kapesní kruhový indukční urychlovač elektronů s průměrem vakuové komory několik málo desítek centimetrů, u jehož zrodu stál Nor Rolf Wideröe. Jeho idea betatronu pochází z roku 1922, kdy v Karlsruhe pracoval na své disertaci. Betatron se nejmenoval betatron, ale Wideröe ho nazval transformátorem paprsků nebo raději transformátorem záření (ray transformer). Sloužil jako zdroj tvrdého záření. K dnešnímu názvu betatron podle Američana Donalda Kersta 1940 se urychlovač dopracoval přes Slepianův X-ray tube (1922), Steenneck-Gundův Electron centrifuge, Schmellenmeier-Gansův Rheotron a konečně Kerstův a Serberův Induction-accelerator.

Myšlenka, která vedla Wideröea k návrhu betatronu, spočívala ve snaze urychlit částice na vysokou energii bez použití nebezpečného vysokého napětí. Místo přímé urychlovací dráhy tak přišel ke slovu kruh, místo elektrostatického pole dynamické pole magnetické. Původně k výzkumu určený betatron brzy našel uplatnění



Zkušební komora betatronu z Ústavu fyziky plazmatu ČSAV. Od největšího „výstupku“ po směru hodinových ručiček: elektronová tryska, sonda měření svazku, vakuová měřka, čerpání, terčik, sonda, sonda (foto M. Řípa)



The acceleration of electrons to very high velocities in a gas filled induction tube (wirbelrohr).

Zřejmě jediná zpráva o Wirbelrohu od M. Steenbecka a K. Hoffmana napsaná ve společnosti Siemens-Schucker r. 1943 a přeložená do angličtiny r. 1946. Do Churchill Archive Center ji z pozůstalosti G. P. Thomsona v srpnu 1993 věnoval J. D. Lawson (foto archiv Siemens CZ)

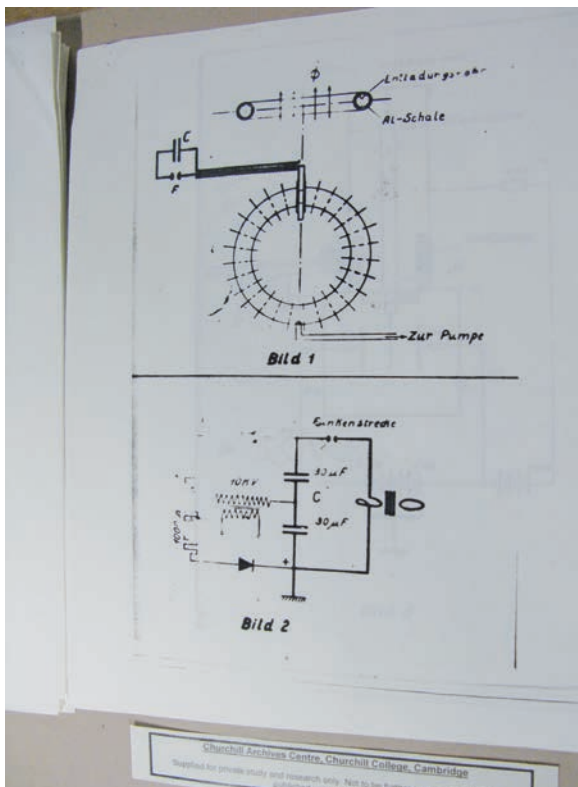


Schéma elektrického zapojení Wirbelrohu podle zprávy Steenbeck & Hoffman (foto archiv Siemens CZ)

v lékařství jako zdroj tvrdého zářeni pro onkologii a v průmyslové defektoskopii tlustostěnných kovových výrobků. Němci si za druhé světové války pohrávali s myšlenkou ničít pomocí betatronového zářeni nepřátelská letadla (death rays).

Betatron urychlující elektrony není nic jiného než transformátor elektrického napětí/proudu. Stejně jako běžný transformátor má primární a sekundární vinutí namotané na transformátorovém jádru. Nicméně jistý rozdíl tu přece jenom je. Sekundární vinutí není vodivý drát, ale elektronový svazek v kruhové (toroidální) vyčerpané trubici, obvykle skleněné. Proměnný tok magnetického pole procházející toroidální trubicí indukuje v trubicí elektrické pole, které urychluje elektrony. Elektrony do trubice vstříkne elektronová tryska. Díky vhodnému průběhu magnetického pole se pohybují elektrony po kružnici s konstantním poloměrem, v daný okamžik jsou vyvedeny mimo rovnovážnou kružnici a po nárazu do terčíku z tvrdokovu (například z wolframu) se jejich kinetická energie přemění na energii tvrdého zářeni. Velkým problémem je zavedení elektronového svazku emitovaného tryskou na rovnovážnou kružnici s co nejmenšími ztrátami. Není obtížné si představit, že při prvních obězích může svazek narazit na trysku a pro další použití je ztracen, stejně tak nestabilita kmitů elektronů svazku po vstřiku může být příčinou nárazu svazku na stěnu komory, což opět znamená ztrátu urychlovaných elektronů.

Stabilizace tzv. betatronových kmitů elektronů vstřikovaného svazku byla příčinou téměř dvacetiletého zpoždění od ideje betatronu Rolfa Wideröa v roce 1922 do jeho realizace Donaldem Kerstem v roce 1940. Snaha o stabilizaci betatronových kmitů stála u zrodu Wirbelrohru Maxe Steebecka v roce 1943.

## Wirbelrohr v Poznani

Pokud budete hledat význam slova „wirbelrohr“ ve vševědoucích vyhledávačích, neuspějete. Vortex tube – vírová trubice –, která se vám pod jmény G. Ranque a R. Hilsch nabídne, není ani zdaleka to pravé ořechové. Wirbelrohr nazval modifikaci kruhového urychlovače elektronů Max Steenbeck v roce 1943 (viz obr. na s. 4). Měl v úmyslu vyřešit dlouhodobý problém vstřiku elektronů do vakuové komory betatronu a jejich zachycení na rovnovážné orbitě. Poradil si vskutku originálně. Vstřikování elektronů jednoduše odstranil. Ovšem kde vzít potřebné elektrony? Z plazmatu! To chtěl vytvořit výbojem ve zředěném plynu, který zapálí napětí z kondenzátorové baterie přivedené na napájecí svorky přes jiskřiště. Takto popsali Wirbelrohr ve své knize *Fusion research in the UK 1945–1960* Hendry and Lawson (viz obr. na str. 6):

*Toroidální trubice byla zevně pokovená, s výjimkou malé azimutální mezery, jejíž obě strany byly připojeny k nabitému kondenzátoru. Po vybití kondenzátoru do pokoveného toroidu oscilující elektrické pole podél osy trubice prorazilo zředěný plyn. Byl zapálen oscilující výboj. Steenbeck předpokládal, že se při dostatečně nízkém tlaku plynu některé elektrony dostanou do režimu „run away“ což se projeví jako usměrněný elektrický proud torem, coby důsledek rychlého poklesu srážkového průřezu spojeného s rostoucí rychlostí elektronů s dostatečnou počáteční energií. Tyto elektrony jsou tak spojitě urychlovány, spíše než by byly termalizovány srážkami. Očekával, že tyto elektrony skutečně mnoho oběhů toroidální komorou, přičemž budou udržovány na ose vlastním magnetickým polem elektrického proudu tekoucího výbojem.*

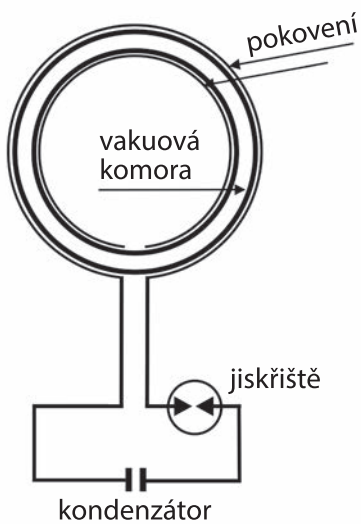


Schéma elektrického zapojení  
Wirbelrohru – toroidálního z-pinče  
Maxe Steenbecka  
(kresba M. Řípa)

Max Steenbeck (foto Deutsche Digitale Bibliothek)





Sám autor Wirbelrohu Max Steenbeck na svůj nápad vzpomíná v autobiografii *Impulse und Wirkungen – Schritte auf meinem Lebensweg* takto:

*Chtěl jsem najít magnetické pole, které dráhu částic ještě lépe stabilizuje. Takové ale existuje jen v oblastech, kterými protéká silný proud. Mohou-li tam být také urychlovány „volně“ letící elektrony, může být vytvořen v silně zředěném plynu do sebe uzavřený výboj kruhového tvaru. Tak vznikla moje představa nové impulsně provozované výbojové formy; toto uspořádání jsem nazval „Wirbelrohr“, protože princip provozu a stabilizace spočíval v příčinné posloupnosti vzájemně se ovlivňujících indukovaných vířivých proudů. Ale ani k prvním pokusům jsem se nedostal, přišla válka se svými zcela jinými požadavky; zmiňuji tady tuto myšlenku jenom proto, že později měla pro mne hrát velkou roli, i když zcela jiného druhu, než bylo původní snažení. (Viz prstýnky cigaretového dýmu nebo fúzní zařízení – sféromaky.)*

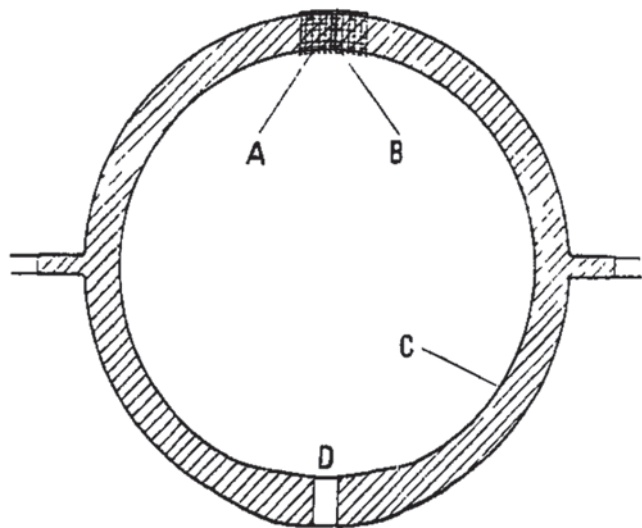
Porážka Němců určila další osud Steenbecka i jeho Wirbelrohu. Nákrešy Wirbelrohu si z laboratoří Siemens Schuckert odvezla Control Commission do Velké Británie a Maxe Steenbecka samotného „ukořistili“ Sověti. Sovětský Wirbelrohr se rodil v internačním táboře v Poznani. Tam se totiž stala neuvěřitelná věc. Jako autora Wirbelrohu Steenbecka poznal jeden z velitelů tábora a požádal ho, aby informace o Wirbelrohu sepsal. Steenbeck se domníval, že je chtěť odeslat do Moskvy, nejspíše do Akademie věd. Rekonvalescenci po prodělané nemoci v poznaňském lágru trávil Steenbeck v moskevském sanatoriu. Tam ho vyhledal Lev A. Arcimovič – pozdější celým světem uznávaný fúzní odborník –, který zřejmě četl Steenbeckovy poznaňské poznámky o Wirbelrohu, a požádal ho o přednášku. A tak vyprávěl o Wirbelrohu před zhruba třicetiletým auditoriem tvořeným fyziky, akademiky a několika ministry. Arcimoviče zaujal bezelektrodový (toroidální) výboj bez nečistot a možnost generace velké hustoty energie. Steenbeck sice strávil v Sovětském svazu jedenáct roků, nechal si z Berlína poslat porcelánovou komoru Wirbelrohu, ale přesto v práci na něm v Sovětském svazu nepokračoval. Steenbeck vzpomínal:

*Navzdory tomu hrála stejná výbojová konfigurace o několik let později dlouhou dobu významnou roli při velkém úsilí Sovětského svazu, USA a Velké Británie v prvních pokusech s fúzí vodíku. Přitom však bylo cílem nikoliv urychlení elektronů, ale ohřev plynu v očekávaných podmínkách vysoké čistoty výboje a dosažení extrémně vysoké koncentrace energie, na kterou mě Arcimovič upozornil již při našem prvním setkání. Arcimovič, který se pak také stal ve světě vedoucí osobností na tomto poli, mnohokrát na mé předcházející práce poukazyval, třebaže k tomu neměl žádné jiné podklady než můj poznaňský rukopis.*

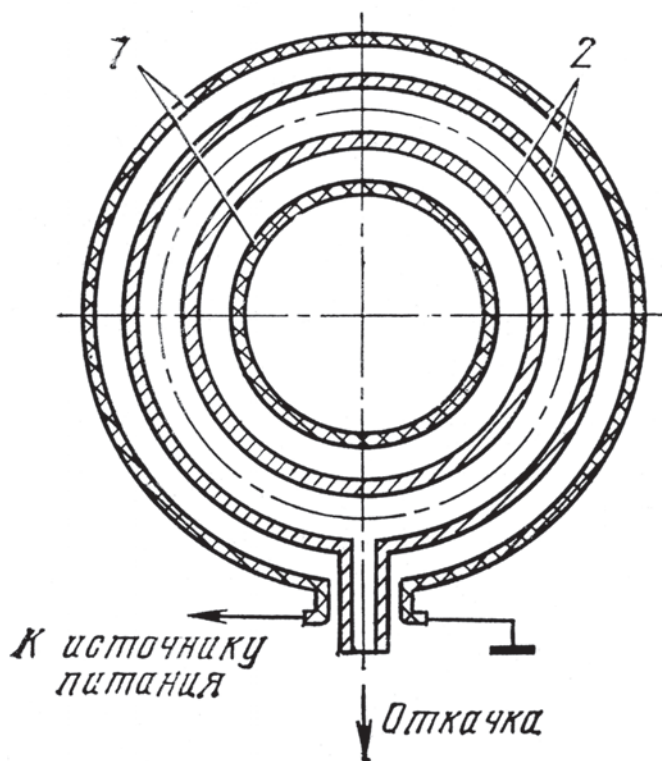
Arcimovič s velkou pravděpodobností využil seznámení se s Wirbelrohrem ve své pozdější funkci vedoucího projektu magnetického fúzního reaktoru v ústavu LIPAN.

## Wirbelrohr v Londýně

Po skončení hrozně války se výzkumem řízené termojaderné fúze zabývaly ve Velké Británii zejména dvě laboratoře: Clarendon Laboratory v Oxfordu a Imperial College v Londýně. Imperial College byla spojena se jménem laureáta Nobelovy ceny G. P. Thomsona a v Clarendon Laboratory začínal ambiciózní Australan P. C. Thonemann. Thomson byl zřejmě první ve Velké Británii a možná i v Evropě,



Nákres britského Wirbelrohu Cousince a Wareho v Imperial College, Londýn, 1951. A - válec z vodivé síťky, B - štěrbinové pozorovací okénko, C - měděné pokrytí, D - přerušená vodivá vrstva pro přívod napětí (S. W. Cousins, A. A. Ware: Pinch Effect Oscillations in a High Current Toroidal Ring Discharge. *Proc. Phys. Soc. LXIV*2-B, s. 160)



Nákres sovětského Wirbelrohu z ústavu LIPAN v Moskvě 1951. 1 - vodivý „kožuch“, 2 - vakuová komora, šipka vlevo ukazuje ke zdroji napětí, šipka dolů čerpání (E. I. Kuzněcov. *На пути к магнитному термоядерному реактору*. Moskva: Energoatomizdat 1982, s. 32)

kdo se začal „horkou“ řízenou fúzí zabývat. Spolu s matematikem E. Mosesem sepsali přihlášku patentu zařazení, které mělo fúzi vodíku uvolňovat energii v měřítku použitelném pro průmyslovou výrobu elektřiny. Thomson požádal ředitele Atomic Energy Research Establishment Johna Crockrofta o peníze na stavbu zařízení podle svého patentu. Na naléhání Thomsona svolal John Crockroft v lednu 1947 schůzku všech, kdo se o nové téma v Británii zajímali. Schůzka měla být více méně oponenturou Thomsonova návrhu. Na této reprezentační schůzce (G. P. Thomson a M. Blackman z Imperial College, R. Peierls, P. B. Moon a Sayers z Birmingham University, J. Tuck z Clarendon Laboratory v Oxfordu a H. W. B. Skinner, O. R. Frisch, K. Fuchs, A. P. French a E. Bertscher z AERE Harwell) vzbudilo pozornost zařízení, které navrhl a postavil M. Steenbeck v Německu. Ve Spojeném království se dostalo do hledáčku společnosti English Electric. Nejednalo se o fúzní zařízení, ale mělo urychlovat elektrony v toroidálním výboji při nízké hustotě plynu. Jednalo se o betatron napuštěný plynem. Zařízení se nazývalo „Wirbelrohr“.

G. P. Thomsonovi Wirbelrohr doslova učaroval a rozhodl se ho vyzkoušet v Imperial College. Pověřil dva studenty Alana Wareho a Stanley Cousinse, kteří se v roce 1947 právě vrátili z vojenské služby a chtěli pracovat na svých Ph.D., stavbou Wirbelrohu. Ware stavěl a Cousins počítal difuzi plazmatu napříč magnetickým polem.

Během tří let Ware postavil Wirbelrohr a brzy dosáhl 13 kA proudu. Diagnostiky zaznamenaly pinčování proudu, ale přímo vidět smáčknutí nebylo. O málo větším toroidem o průměru 40 cm Ware a Cousins dosáhli 27 kA a patrně jako první na světě viděli pinčující se plazma. Mezitím byly práce na Wirbelrohu v English Electric zastaveny.

Nedaleko Londýna, v Clarendon Laboratory, se systematicky blížil k největšímu fúznímu zařízení v té době – k toroidálnímu z-pinči ZETA – mladý Australan Peter C. Thonemann. V zimě 1949–1950 byl jako ruský špión odhalen vedoucí teoretického oddělení AERE, Klaus Fuchs. Alan Ware tehdy prohlásil: „*Bezpochyby Fuchs své chlebodárce v Rusku o naší fúzi informoval.*“ Krátce po Fuchsovi byl odhalen další ruský špión Bruno Pontecorvo.

## Wirbelrohr v Moskvě

Začátky výzkumu řízené termojaderné fúze v Sovětském svazu nemají daleko k sci-fi. Do Moskvy dorazily v krátkém sledu začátkem a v polovině roku 1950 dva dopisy. Razítko odesílací pošty pocházelo ze Sachalinu. Oba dopisy téhož obsahu obsahovaly návrh vodíkové pumpy a návrh termojaderného reaktoru. Autorem byl seržant Rudé armády, Oleg Alexandrovič Lavrentěv. Recenzent druhého dopisu Andrej Dmitrijevič Sacharov i jeho učitel Igor Jevgenij Tamm byli myšlenkou čtyřřadvacetiletého samouka nadšeni. Ač zaneprázdnění prací na vodíkové bombě, navrhli magnetický termojaderný reaktor, předchůdce tokamaku. Igora Vasilijeviče Kurčatova, jejich nadřízeného, myšlenka civilního využití termojaderné energie zaujala a po oponentuře předních odborníků zabývajících se vývojem vodíkové bomby předal zprávu pro Radu ministrů (vládu) se žádostí o zahájení výzkumu MTR L. P. Berijovi. Po dubnové argentinské komedii (25. března 1951 oznámil prezident Argentiny Juan Peron, že díky Ronaldu Richterovi, sudetskému



Ústav fyziky plazmatu ČSAV v roce 1964: Lev Andrejevič Arcimovič, vedoucí fúzního programu Sovětského svazu, a Pavel Šunka, pozdější vedoucí Oddělení interakce elektronových svazků s plazmatem a v letech 1990 až 1997 ředitel Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR (archiv M. Řípy)

Němci ze Sokolova nad Ohří, Argentina vyřešila řízenou termojadernou fúzi; kachna zamávala křídly a odletěla) dostaly události potřebný spád, zpráva rychle prošla příslušnými kanceláři a 5. dubna 1951 připojil J. V. Stalin svůj podpis pod nařazení Rady ministrů postavit laboratorní model MTR-L. Již 5. května 1951 podepsal J. V. Stalin dokument o organizaci projektu „Posouzení možnosti stavby magnetického termojaderného reaktoru“, první dokument o státním výzkumu řízené termojaderné fúze na světě.

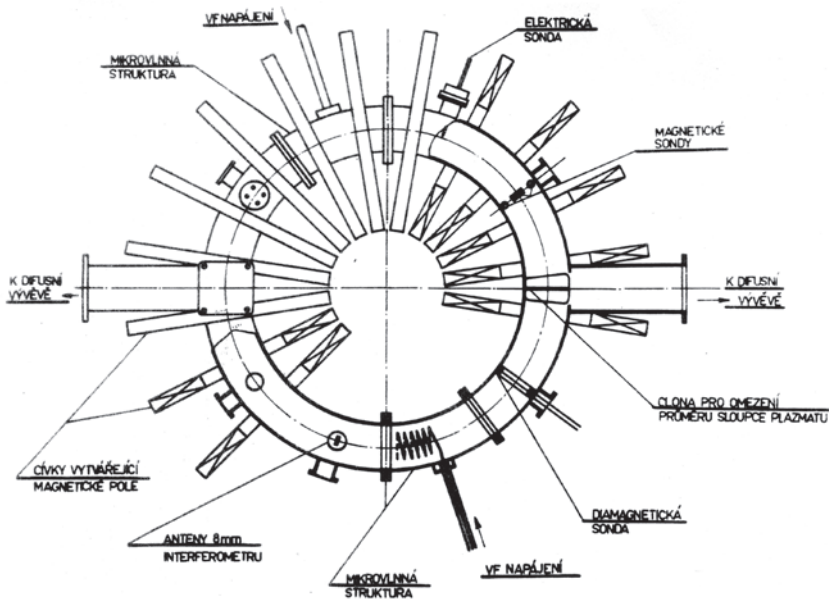
Vedoucím projektu byl jmenován A. L. Arcimovič a A. D. Sacharov spolu s I. J. Tammem se stali konzultanty. Termín dokončení byl stanoven na 1. říjen 1952.

Demobilizovaný O. A. Lavrentěv byl přijat v roce 1950 na Fyzikální fakultu Moskevské státní univerzity a v Moskvě se díky sachalinským dopisům seznámil s řadou politických i vědeckých kapacit, k nimž patřili: L. P. Berija – vedoucí zvláštní komise pro atomovou energii, I. D. Sebrin – po linii ústředního výboru KSSS vedoucí nejdůležitější části obranného průmyslu včetně atomové a kosmické techniky, generál B. L. Vanikov – vedoucí hlavní správy, generál N. I. Pavlov – vedoucí oddělení hlavní správy a zástupce vedoucího hlavní správy, vedoucí prací spojených s výrobou atomové a vodíkové zbraně, I. V. Kurčatov – hlavní vedoucí všech prací spojených s výrobou atomové a vodíkové bomby a ředitel ústavu LIPAN, I. N. Golovin – zástupce ředitele (Kurčatova) ústavu LIPAN, vedoucí plazmatické skupiny, L. A. Arcimovič – hlavní vedoucí prací na MTR, M. A. Leontovič – vedoucí teoretických prací na MTR, A. D. Sacharov – spoluautor tokamaku a sovětské vodíkové pumy, G. N. Budker – ředitel Ústavu jaderné fyziky SO AN SSSR v Novosibirsku, spoluautor magnetického zrcadla, D. I. Blochincev – ředitel první atomové elektrárny v Obninsku. Kromě jiných studijních výhod mohl po jistou dobu navštěvovat Oddělení výzkumu plazmatu v LIPAN. Při první návštěvě ho Golovin seznámil s experimentálními zařízeními, která v oddělení provozovali. Nechme vyprávět samotného Lavrentěva:

*Jedno z nich představovalo skleněnou toroidální komoru relativně nevelikých rozměrů. Na komoru byl navlečen měděný „kožuch“ se šterbinou spojený přes vzduchové jiskřiště s kondenzátorovou baterií. Při připojení napětí na kondenzátorovou baterii se prorazilo jiskřiště a kondenzátorová baterie se vybila přes měděný kožeš a indukovala v něm střídavý proud a vířivé elektrické pole, které zapálilo bezelektrodový výboj ve vodíku. Cíl pokusu spočíval v určení parametrů plazmatu při jeho smáčknutí – „pinčování“ proudu. Podle návrhu A. D. Sacharova se proud vznikající při výboji v plynu působením elektrodynamických sil stahuje do tenkého vlákna a při tom ionizuje a hrne před sebou plyn do centra. Protože děj probíhá během krátké doby, plyn se adiabaticky ohřívá na vysoké teploty. Podle odhadů Sacharova je teplota plynu úměrná kvadrátu elektrického proudu.*

Ponechme stranou zajímavou (ale mylnou) Lavrentěvovu domněnku, že (moskevský) pinč včetně závislosti teploty pinčovaného plazmatu na velikosti pinčujícího elektrického proudu navrhl A. D. Sacharov.

To, co Lavrentěv popisuje, není nic jiného než náš starý známý Wirbelrohr. Lavrentěvovi ukázali betatron sice s plynem, ale bez elektronové trysky – Wirbelrohr a torzo toroidálního solenoidu opuštěného v koutě laboratoře – podle Golovina první ideu Sacharova (zřejmě model MTR-L), kterou opustili kvůli „novým nápadům“. S tím vším se seznámil v oddělení výzkumu plazmatu ústavu LIPAN, jak sám



Intermezzo - toroidální magnetická nádoba pro studium vysokofrekvenčního ohřevu plazmatu; první plazma v roce 1974 (archiv ÚFP AV ČR)

Tokamak Compass v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., rok 2010 (foto M. Řípa)



uvádí, v první polovině května 1951. Jakmile později dostal propustku všech propustek, mohl Lavrentěv otevřít další dveře – a tam uviděl kromě jiného toroidální pinč buzený transformátorem. Možnost Lavrentěvova omylu – záměny pozdějšího letopočtu za rok 1951 – vylučuje jeho poznámka, kdy dokonce letopočet 1951 verifikuje další události: „V polovině května 1951 jsem získal stálou propustku do LIPAN a docházel jsem tam pravidelně. K dvojitě studijní zátěži [na žádost Kurčatova studoval na Fyzikální fakultě Moskevské státní univerzity první a druhý ročník současně] se přidala ještě jedna, nicméně velmi důležitá. Experimentální práce byla ale moje doména.“ Dokážete si představit, že by všechny experimenty, se kterými se Lavrentěv setkal, byly postaveny zcela novým, nesehraným kolektivem během první poloviny roku 1951? A přece!

Dva nezávislé zdroje tvrdí, že před rokem 1950 se řízená termojaderná fúze v Sovětském svazu nestudovala. První zařízení se objevila až v roce 1951. Jedním z prvních byl Wirbelrohr (obr. na str. 8 dole). Stejně jako Cousins & Ware v Londýně, ani v Moskvě Wirbelrohr nikdo explicitně nejmenoval. Na počátku roku 1951 postavil A. M. Andrianov skleněné toroidální zařízení s cívkou navinutou na komoře (MTR-L?) a N. A. Javlinskij na podzim dokončil toroidální zařízení bez podélného magnetického pole s výbojem buzeným transformátorem – komorou podél hlavní osy rotace procházelo jeho transformátoru a do primárního obvodu se vybíjela kondenzátorová baterie. A máme všechny experimenty, s kterými se Lavrentěv setkal. Seznámení Lavrentěva s Javlinského toroidálním pinčem se mohlo klidně konat až na podzim 1951.

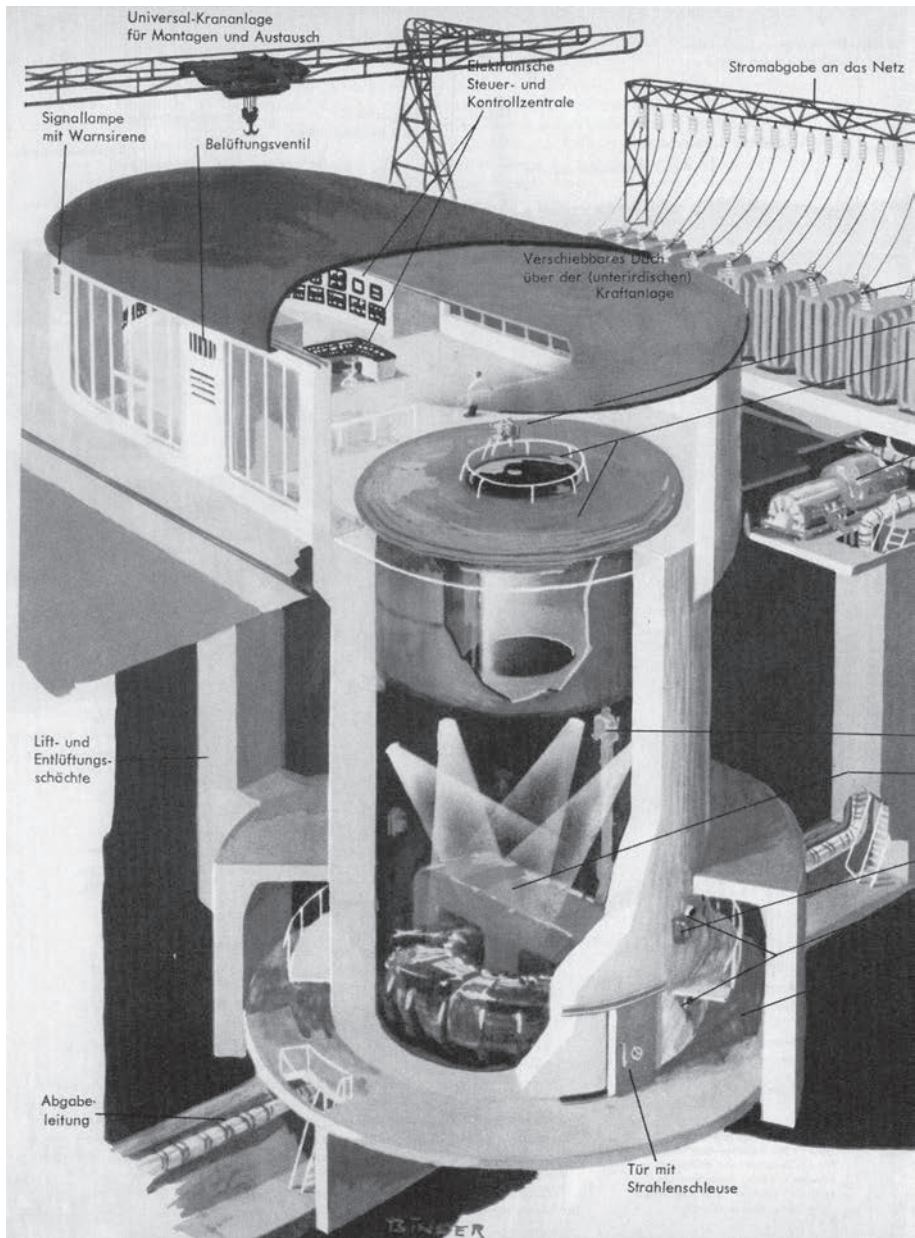
Ukazuje se, že Sacharovův a Tammův MTR měl hned od počátku zdatného soupeře – Steenbeckův Wirbelrohr – toroidální z-pinč. Vedoucí projektu MTR L. A. Arcimovič dokonce neváhal výzkum MTR utlumit právě na úkor pinče. Teprve nepřekonatelné nestability pinče vynesly do popředí MTR – předka tokamaku – a jeho systematický výzkum vyvrcholil horkým a stabilním plazmatem na tokamaku T3. Od roku 1968 nastoupil tokamak svoji vítěznou cestu fúzním světem, která dnes kulminuje na jihu Francie stavbou mezinárodního tokamaku ITER – prvního fúzního zařízení s kladným výkonovým ziskem.

## Wirbelrohr v Praze

Ačkoliv v pravém slova smyslu v Praze Wirbelrohr nebyl, stál stejně jako ve Velké Británii a v Sovětském svazu u počátku výzkumu řízené termojaderné fúze v Československu betatron.

V roce 1959 byla skupina padesáti zaměstnanců Výzkumného ústavu vakuové elektroniky převedena do zcela nového Ústavu vakuové elektroniky Československé akademie věd. Ve VÚVETu se zabývali kruhovým urychlovačem elektronů – betatronem. Betatron, ať lékařský (obr. na str. 2), nebo průmyslový, byl do devadesátých let minulého století jedním z výzkumných témat Ústavu fyziky plazmatu.

Při svém založení dostal Ústav vakuové elektroniky, od roku 1963 Ústav fyziky plazmatu, od svého zakladatele Československé akademie věd do vínku úlohu koordinátora výzkumu řízené fúze na půdě Československa. Vedle zakladatele ústavu a jeho prvního ředitele Ing. Jana Váni to byla osobnost Dr. Miloše Seidla, která hledala cestu, po níž se nový přírůstek Československé akademie věd měl vydat.



Zařízení s toroidálním containmentem či tokamak podle publikace *Weltall, Erde, Mensch* [Vesmír, Země, lidé] (Eulenspiegel Verlagsgruppe, Dolores L. Augustine. *Red Prometheus*, MIT 2007, s. 222)



A byla to víceméně neznámá oblast fyziky – fyzika plazmatu. V ní vybral Dr. Miloš Seidl dvě „O“ – ohraničení plazmatu a ohřev plazmatu. Zatímco k ohraničení plazmatu měl blíž betatron, k moderním termojaderným zařazením dospěl později ohřev plazmatu.

Wirbelrohr byl toroidální pinč. Nicméně zapalování výboje připomínalo vzduchový transformátor „1 : 1“ dnešních moderních tokamaků. Velká Británie zdůraznila ve svém výzkumu pinčové udržení a ohřev plazmatu a s velkou mírou nadsázky můžeme říci, že Sovětský svaz si vybral to málo, co Wirbelrohr nabízel tokamakům: induktivní buzení elektrického proudu v plazmatu.

Jak ale souvisí Wirbelrohr s Prahou? V září 1966 pořádal Ústav fyziky plazmatu v dejvickém hotelu International 4. mezinárodní sympozium o betatronu. Max Steenbeck se po dvanácti letech práce pro Sovětský svaz (začínal v internačním táboře v Poznani a později spolupracoval s Lvem A. Arcimovičem v Moskvě na separaci izotopů uranu pro atomovou bombu) vrátil do východní části Německa – do Německé demokratické republiky. Vyjmenovat všechny posty včetně prezidenta Akademie věd, kterými profesor fyziky plazmatu v NDR prošel, by zabralo hodně místa. V době konání sympozia nebyla na Východě větší autorita než autor teorie stabilizace betatronových kmitů. Bohužel jsem nenašel seznam účastníků sympozia, ale pamatuji si, že krátce před svou smrtí vzpomínal Ing. Karel Rytina, vedoucí oddělení betatronu ÚFP, na významnou osobnost, která se sympozia zúčastnila. Byl to Max Steenbeck? Pak by alespoň symbolicky byl Wirbelrohr i v Praze. Pokud Steenbeck v Praze nebyl, tak jeho betatron tu byl zcela určitě!

Standardní pinč Ústav fyziky plazmatu zažil také. RNDr. Aleš Krejčí, CSc., svoji disertaci obhájil na impulzně plynem napouštěném z-pinči v roce 1988. Od roku 1966 se studuje z-pinč na Fakultě elektrotechnické Českého vysokého učení technického v Praze.

Betatron rozhodně nebyl jediným zařazením s toroidální vakuovou komorou v ústavu. V roce 1974 byla na zařazení Intermezzo experimentálně potvrzena teorie Richarda Klímy a Václava Petržilký o možnosti neinduktivní generace elektrického proudu v plazmatu pomocí vlečení mikrovlňami. Intermezzo byl odrazový můstek k prvnímu tokamaku na půdě nejen Československa, ale celého východního bloku (pochopitelně mimo Sovětský svaz). Tokamak TM-1 MH, po rekonstrukci tokamak CASTOR, fungoval do roku 2007. Od roku 2009 v nové budově sídlí největší oddělení Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., provozující moderní tokamak COMPASS. Tokamak CASTOR pod názvem Golem (viz obr. na obálce) provozuje Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze jako výukové zařazení.

## Závěr

V dostupné literatuře o řízené fúzi jsem neobjevil žádnou relevantní zmínku o tom, jak se v moskevském ústavu LIPAN dostali na počátku padesátých let k výzkumu pinče. Dokonce ani v době, kdy pracovali na státním úkolu „Posouzení možnosti stavby magnetického termojaderného reaktoru (MTR)“. Útlum MTR a posílení pinče odůvodnil Gončarov v článku pro UFN následovně:

*V Kurčatovově ústavu nutnost zavedení toroidálního elektrického proudu [eliminace toroidálního driftu] vedla k rozhodnutí zcela vynechat toroidální magnetické*

*pole. Hlavní úsilí se zpočátku koncentrovalo na pinče, jelikož podle Bennetova vztahu  $J^2 = 4c^2NT$  měla teplota plazmatu růst úměrně kvadrátu proudu,  $T \sim J^2$ . Pouze neveliká skupina v čele s I. N. Golovinem pokračovala podle návrhu Sacharova a Tamma.*

Nad pinčem držel zpočátku ochrannou ruku i vedoucí projektu MTR L. A. Arcimovič. Arcimovičovi se zalíbil Wirbelrohr, s kterým se seznámil po přečtení Steenbeckových poznámek sepsaných v internačním táboře v Poznani. Odborníci a politici se s Wirbelrohrem seznámili na přednášce Maxe Steenbecka za asistence Lva A. Arcimoviče v Moskvě. Protekce pinče u Arcimoviče byla zřejmě hlavním důvodem, proč se na určitou dobu stal pinč v ústavu LIPAN zařízením číslo jedna.

Propojení trojice Steenbeck – pinč Wirbelrohr – Arcimovič se nyní objevuje v česky psané literatuře poprvé a nesetkal jsem se s ním ani v žádném anglicky či rusky psaném textu. Alfred Kosing et al. píše v knize propagující úspěchy vědy a techniky v Německé demokratické republice (část Německa obsazená po II. světové válce Sovětským svazem) *Weltall, Erde, Mensch* [Vesmír, Země, lidé] o fúzní elektrárně, jejímž reaktorem je tokamak, nicméně sovětský původ tokamaku není v knize zmíněn.

#### Poděkování:

Je milou povinností poděkovat za připomínky RNDr. Radomíru Pánkovi, Ph.D., řediteli Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i., a Ing. Slavomíru Entlereovi z Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR, v. v. i. Zvláštní poděkování věnuji milému kolegovi Ing. Františku Žáčkovi, CSc., za ochotu při překladu německého textu.

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

**Oddělení Tokamak** 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 Gruzii a Ruskem.

Zástupci ÚFP coby členové evropské skupiny pro popularizaci fúze FusionCOM v rámci EFDA dlouhodobě spolupracují na popularizaci fúze v Evropě a především v České republice. Bohatě 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 tisíceletí*, 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.

Mezi nejvýznamnější výsledky vědecké činnosti ústavu patří např:

- Možnosti technologických aplikací laserem vytvářených plazmových jetů;
- Vliv umístění vstřiku 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.

## V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:

Michal Koblížek: **Stanislaus von Prowazek**

Libuše Čižmárová: **Česko/Czechia**

Jan Vít: **Jan Patočka**

## DOSUD VYŠLO:

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

Slavomír Entler: **Spoutání slunce**

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

Edice Věda kolem nás | Co to je...

*Evropskou termojadernou fúzi rozvířil Wirbelrohr* | Milan Řípa

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

Grafická úprava dle osnovy Jakuba Krče a sazba Serifa.

Odpovědná redaktorka Petra Královcová.

Vydání 1., 2016. Ediční číslo 12043.

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