

Oborová exkurze

FYZIKA



Téma: TOKAMAK A NEJVĚTŠÍ LASER V EVROPĚ

Autor: Mgr. Robert Kunesch

1 ÚVOD

Termojaderná fúze je vlastně pokračováním exkurze na téma jaderného výzkumu. Oproti pojmu jaderná elektrárna je tento proces poměrně neznámým. Termojaderná fúze je proces, při kterém se slučují lehčí jádra, vznikají jádra těžší a uvolňuje se energie. Tedy vlastně „obrácená“ chemická reakce než u jaderných procesů. K jejímu dosažení je nutné, aby se reagující jádra přiblížila vzájemně natolik, že převládne jaderná síla přitažlivá nad elektrickou silou odpudivou. Aby částice překonaly odpudivé Coulombovské síly, musí se vzájemně srážet s velkou rychlostí. Nejefektivnějším způsobem, jak toho dosáhnout, je ohřátí paliva na velmi vysokou teplotu.

Je nezbytně nutné, aby měl každý student možnost získat dostatečné informace, a to formou nejen odborného výkladu, co možná nejpregnantněji podaného, ale také podpořit teoretický výklad názornou ukázkou přímo v provozu a umožnit tím studentům, aby si udělali co možná nejobjektivnější náhled na danou problematiku.

Jaderná fyzika je jedním z nejobtížnějších oborů fyziky a tento předmět sám o sobě je mezi studenty vnímán jako jedna z nejméně oblíbených věd. Formou exkurze lze snáze poukázat na fakt, že se nejedná o cosi suchopárného či odtrženého od reality.

Exkurzi bude předcházet výuka zaměřená na základní poznatky z jaderné fyziky, jaderné energetiky a termojaderné fúze. Výuka bude provedena formou dvou seminářů.

V Ústavu fyziky plazmatu v Praze-Kobylisích se účastníci exkurze budou moci seznámit se zařízeními, které slouží jako základní pilíře výzkumu termojaderné reakce nejen pro Českou republiku, ale i v rámci mezinárodní spolupráce.

Studenti uvidí v provozu výzkumný tokamak COMPASS, největší svého druhu, a experimenty související s mezinárodní spoluprací i s bádáním domácích vědeckých pracovníků, plus další tokamak, který je sice také funkční, avšak je menší kopií prvně jmenovaného, a tudíž je vhodný pro trénink a simulaci procesů před samotnou realizací fyzikálních experimentů na tokamaku COMPASS. Žáci se seznámí s jadernou fúzí. Součástí exkurze bude i přednáška na téma historie jaderné fúze a na téma rozdílu fúze od klasické jaderné reakce.

Polovina exkurze proběhne na FJFI ČVUT.

Zde se nachází tokamak Golem, což je typ školního či výukového tokamaku, který bude spuštěn právě pro účastníky exkurze, kteří následně dostanou videonahrávku se zažehnutím tokamaku. Součástí FJFI ČVUT jsou specializované laboratoře přírodních věd, které v případě zájmu mohou studenti také navštívit.

2 HISTORIE VÝZKUMU ŘÍZENÉ TERMOJADERNÉ FÚZE

2.1 Naše stopa

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.

2.2 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 věnoval studiu a možnostem k uvolňování energie jádra. Hans Bethe v *Reviews of Modern Physics* publikoval seznam známých slučovacích jaderných reakcí. Kantrowitz se okamžitě rozhodl, že zkusí vyrobit plazma o teplotě středu Slunce a uvidí, 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 zahřát mikrovlnami, od stěn vakuové nádoby oddělit magnetickým polem a jako tvar nádoby zvolil toroid. Kantrowitz odhadl rozměry toroidu a vyšla mu vakuová nádoba velikosti tokamaku, zařízení patřícího do dosti vzdálené budoucnosti. Vycházel z energie uvolněné při DD reakci, vnějšího ohřevu mikrovlnami a ztrát energie způsobených klasickou difuzí. 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 (předchůdce NASA) ve Washingtonu využil své autority objevitele a získal pro Kantrowitze 5000 amerických dolarů.

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 ho 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 zdroje. Oknem viděli modré doutnavé světlo sledující magnetické siločáry. Ozářili zubní rentgenový film a Jacobs, který měl doma temnou komoru, film vyvolal a volal Kantrowitzovi, že 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 nestability 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. Patent jim ale nebyl udělen. Kantrowitz později navrhoval řízené střely, Jacobs křídla o nízkém odporu pro letadla P51 a B29. Ani jeden se už k fúzi nevrátil.

2.3 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 hrozného zbraně – atomové pumy – a Sovětskému svazu nezbývalo 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 nevyzvané 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 Olega Lavrentěva začal na Dálném východě, kde očekával demobilizaci. Bez vysoké školy napsal v roce 1950 dopis ÚVKSSS, 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 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 izmeritelných priborov Akadēmiji 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.

O magnetické izolaci plazmatu ve vodíkové bombě se zmiňují materiály, které poskytl Sovětskému svazu Klaus Fuchs 19. září 1945. Obsahovaly výtah 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. Napadlo ho stočit siločáry magnetického pole do šroubovice a nechat částice během jejich cesty toroidem střídat 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.

Sacharov navrhl dvě možnosti, jak dostat do toroidální vakuové nádoby toroidální elektrický proud – generátor poloidálního pole – zavést do vakuové komory a instalovat pevný vodič elektrického proudu, nebo elektrický proud ve vakuové komoře vybudit indukci (bez přítomnosti pevného vodiče). Rovnováhu plazmového prstence hodlal zajistit měděným obalem příčnými (vstup toroidální EMS) a podélnými (vstup magnetického pole) štěrbinami.

Koncem ledna 1951 svolal Kurčatov KB11 (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 Tichomožské 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 Argentině. Vedoucím projektu „O provedení

vědeckovýzkumných prací s cílem objasnit možnost stavby magnetického termojaderného reaktoru“ byl jmenován L. A. Arcimovič.

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 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 řízení termojaderné fúze v Salcburku, kde s gustem jemu vlastním vytkl chyby v prezentacích Frederica Coensgena a Richarda Posta z Livermoru. Uražení Američané žádali omluvu, načež Arcimovič odvětil, že nejsou v ústavu pro výchovu šlechtičen, 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. I díky Ronaldu Richtrovi. Ronald Richtrovi 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).

Pro srovnání – Lyman Spitzer a James Tuck dostali v USA na stelarátor, resp. na Perhapsatron, po 50 dolarech. V dubnu 1951 Perón na tiskové konferenci prohlásil, že díky argentinskému vědci zvládla Argentina řízenou termojadernou fúzi. Zpráva nebyla pravdivá, nicméně zahájila 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 „čisté“ pinče, které se řídily Bennetovou formulí.

Sacharovovými, resp. Tammovými myšlenkami se řídila pouze malá skupina kolem I. N. Golovina a N. A. Javinského. Zda byl zájem o pinče v LIPAN iniciován zpoza železné opony, o tom se Moskva nikde nezmínila, zatímco Západ ano. Zdá se to nanejvýš pravděpodobné – časově se výbuch zájmu Moskvy o pinče shoduje s pinčovým boomem 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.

Čtvrtého července 1952 skupina vedená N. V. Filipovem na deuteriovém pinči zaregistrovala neutrony. Počáteční euforii zchladil L. A. Arcimovič: neutrony nebyly termojaderné. Výzkum se transformoval 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 magnetickém poli – byl nahrazen v roce 1957 tokamakem T1. 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 T1 měl vakuovou komoru z nerezové oceli tloušťky desetiny milimetru, takže oproti plazmovému provazci nepředstavovala žádnou vodivou konkurenci, tudíž nepotřebovala žádná přerušení. T1 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 T1 a ZETA se lišily „pouze“ silou podélného magnetického pole. Když T1 pole snížil, dosáhl stejných výsledků jako ZETA. Ovšem plazma bylo nestabilní. Potvrdilo se Šafranovo–Kruskalovo kritérium stability výboje s podélným magnetickým polem. Ani tokamak T1 teplotu plazmatu markantně nezvýšil, 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 vyhradit, co o tajném 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 T2 využil konstrukčních prvků amerického stelarátoru B2 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 $q = 8$.

Nestability se v tokamakovém plazmatu objevovalo tolik, že je vědci začali třídit po vzoru systematické zoologie na třídy, skupiny atd. Nicméně na II. mezinárodní konferenci o fyzice plazmatu a řízené termojaderné fúzi v anglickém Culhamu ohlásil vynikající sovětský

teoretik B. B. Kadomcev, že se spolupracovníky spatřil 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 velkém 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 T3. Mravenčí práce při hledání ostrůvků stability se vyplatila: plazma hustoty $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, teplota elektronů 8 miliónů stupňů, teplota iontů 5 miliónů stupňů a co bylo důležité – tepelné ztráty byly 50krát menší, než měly být podle Bohma. Tokamak T3 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. Oponentem mu byl L. A. Arcimovič, který sehrál bezesporu vynikající roli při rozvoji programu Tokamak. Jeho úloha se nejvíce projevila při analýze výsledků organizace při experimentech na tokamaku T3 a dalších zařízeních, když se stal vedoucím naší laboratoře po tragické smrti N. A. Javlinského. Teplota elektronů v tokamaku T3 byla měřena nepřímo pomocí diamagnetického jevu. Zatímco Arcimovič byl přesvědčen, že jeho výpočty jsou správné, Američané nesouhlasili. V roce 1969 teplotu elektronů tokamaku T3 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 26 beden ocelkové 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.

2.4 Spojené státy americké

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

Systematický fúzní výzkum řízené fúze ve Spojených státech začal v polovině roku 1951 a byl iniciován stejně jako v Sovětském svazu Perónovou zprávou o “úspěchu” jeho chráněnce Ronalda Richtera. Profesor astronomie univerzity v Princetonu Lyman Spitzer,

jeden ze zakladatelů teoretické fyziky plazmatu, po němž byla pojmenována elektrická vodivost, a autor myšlenky pozorovat vesmír teleskopem upevněným na satelitu se stejně jako Arcimovič v Moskvě zprávě usmál a raději „vymyslí“ stelarátor.

Stelarátor je magnetická nádoba, která ke svému životu nepotřebuje elektrický proud 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 poskytla Spitzerovi na stelarátor 50 000 amerických dolarů a stejnou sumu na pinče získal Tuck od ředitele LANL Norrise Bradburyho. Drift plazmatu v důsledku nehomogenity „křivého“ 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 solenoidálním vinutím vytvořilo šroubovicové magnetické pole potlačující toroidální drift.

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 tokamaku. Stelarátor takovou konkurencí může být.

3 SOUČASNÝ STAV FÚZNÍHO VÝZKUMU

V 90. letech byla do plného provozu uvedena velká zařízení, tedy evropský tokamak JET a americký tokamak TFTR. Tyto tokamaky již dokázaly produkovat značné množství termojaderné energie. Např. JET produkoval fúzní výkon 16 MW po dobu 1 s. Jsou však stále příliš malé na to, aby vyráběly elektřinu ve velkém měřítku a navíc u obou těchto zařízení byla energie potřebná na vytvoření magnetického pole a ohřev plazmatu mnohem větší než vyprodukovaná fúzní energie. Nicméně i tak je z výsledků dosažených na těchto zařízeních zřejmé, že je z fyzikálního hlediska možné postavit fúzní elektrárnu právě na principu tokamaku. Otázkou zůstává, zda je lidstvo již na dostatečné technologické úrovni k tomu, aby tuto elektrárnu dokázalo spolehlivě provozovat. Jedná se o vývoj materiálů pro vnitřní stěnu vakuové komory, která se bude v průběhu výboje občas dostávat do kontaktu s horkým plazmatem a bude také silně ozářena fúzními neutrony. V reaktoru budou muset být cívky vytvářející magnetické pole supravodivé. Proto bude nutné vyvinout supravodivé systémy zatím nevídané velikosti. Demonstrátorem, který by měl skloubit všechny technologické a fyzikální požadavky na budoucí elektrárnu, bude právě budovaný tokamak ITER. Ten by měl být uveden do provozu v roce 2020. Pokud bude úspěšný, měla by být v roce 2040 až 2050 postavena první fúzní elektrárna.

4 TOKAMAK

Tokamak je zařízení, které zabraňuje dotyku plazmatu a stěny komory pomocí magnetického pole. Jeho základní částí je vakuová reakční komora ve tvaru prstence, která je obklopena cívkami toroidálního magnetického pole. Tyto cívky vytvoří v komoře velmi silné magnetické pole, které udržuje plazma. Prstencová komora tokamaku je sekundárním závitem transformátoru, který v komoře generuje proud v toroidálním směru. Tento proud vytváří kolem sebe poloidální magnetické pole. Pokud složíme magnetické pole toroidální a poloidální, dostáváme výslednou konfiguraci magnetického pole ve tvaru šroubovice. Siločáry takto vytvářeného magnetického pole se do sebe uzavírají v reakční komoře. Připomeňme, že se elektricky nabitá částice pohybuje podél magnetické siločáry. Právě proto by měly částice plazmatu zůstat v komoře izolované od stěny. Různé nestability a difúze částic napříč magnetickým polem výrazným způsobem zhoršují udržení plazmatu.

Plazma v tokamacích je ohříváno třemi základními způsoby - proudovým ohřevem, mikrovlnami a svazky neutrálních částic.

Vzhledem k tomu, že má plazma nenulový elektrický odpor, je ohříváno procházejícím elektrickým proudem. Vzhledem k tomu, že elektrický odpor plazmatu s rostoucí teplotou klesá, a vzhledem k existenci fyzikálního limitu omezujícího maximální možný proud procházející plazmatem, lze tímto způsobem dosáhnout teplot maximálně v řádu desítek miliónů K. Z tohoto důvodu je třeba použít ještě další metody ohřevu plazmatu. Tento druh ohřevu spočívá v tom, že jsou do plazmatu vysílány mikrovlny o vhodné vlnové délce. Ty s plazmatem interagují a předávají mu svou energii, čímž ho ohřívají.

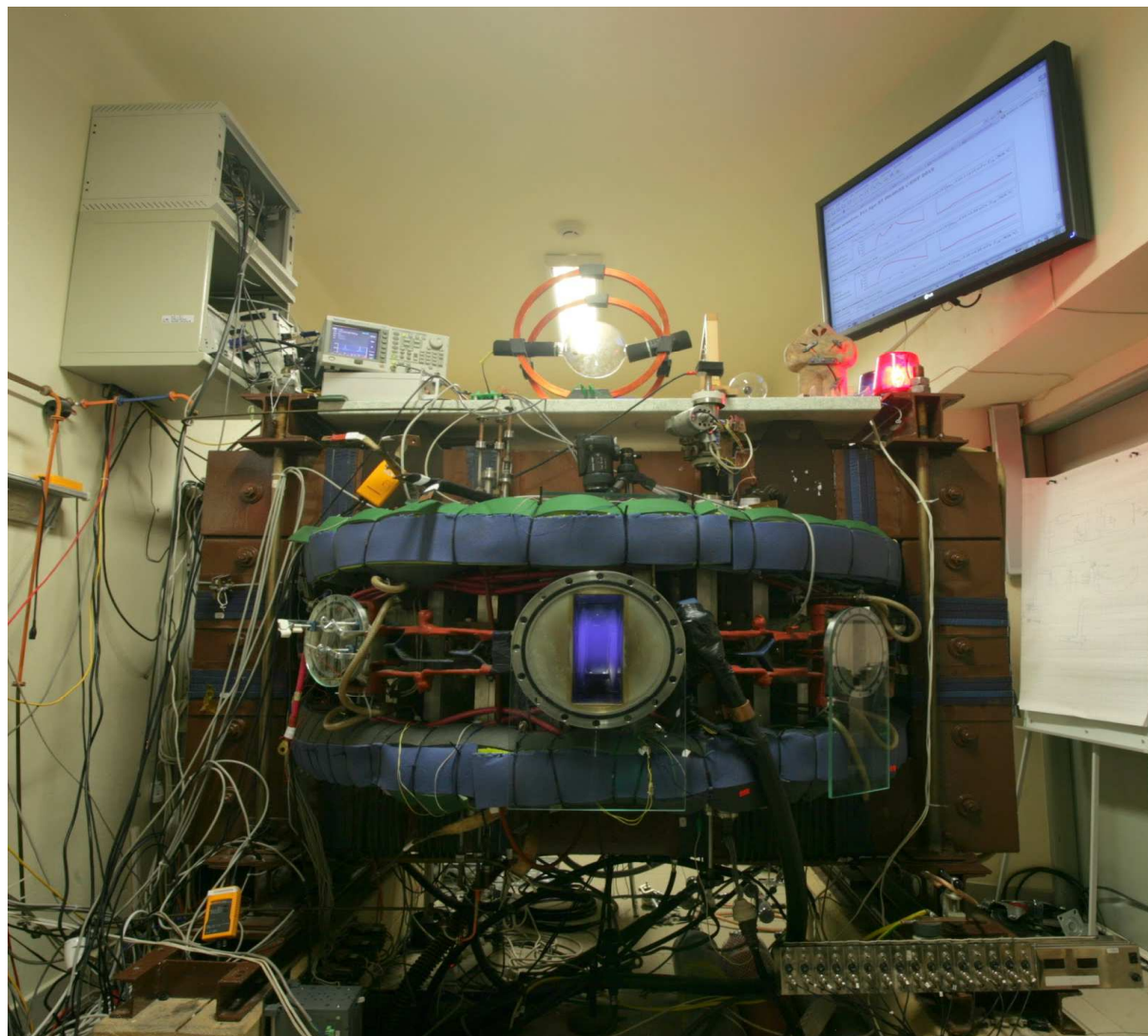
Plazma je možné ohřívát také vstřikem urychlených neutrálních částic. Vzhledem k tomu, že neexistuje efektivní způsob urychlení neutrálních částic na požadovanou energii, musí být částice urychlovány jako nabitě a před vletem do tokamaku musí být zpětně neutralizovány. Neutrální částice neinteragují s magnetickým polem tokamaku, a proto se snadno dostanou až do středu komory tokamaku, kde jsou v důsledku srážek s částicemi plazmatu opět ionizovány, začnou se tedy pohybovat podél magnetické siločáry a svou energii předávají srážkami částicím plazmatu.

5 FJFI ČVUT A TOKAMAK GOLEM

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, netradičním svým profilem i metodami výuky, se zrodila v roce 1955. Bylo to období nástupu mírového využívání jaderné energie v mezinárodním měřítku. Když první jaderné exploze v závěru 2. světové války demonstrovaly reálnou možnost uvolnění jaderné energie a lidstvo začalo brát Einsteinův vztah mezi energií a hmotností vážně, ukázala se nutnost jaderný výzkum mezinárodně koordinovat. První mezinárodní konference o jaderné energii byla svolána OSN do Ženevy

v roce 1955 a českoslovenští odborníci se jí aktivně účastnili. Využívat jadernou energii v naší zemi se jevílo jako velmi lákavé, zejména pro nedostatek a nevýhody jiných energetických zdrojů, a to z hledisek ekonomických i ekologických, a také pro naše značné zásoby uranových rud. Vždyť přece radioaktivita byla poprvé zjištěna u jáchymovského smolince.

Fakulta založená původně v rámci čs. jaderného programu postupně rozšířila svou působnost na široké spektrum matematických, fyzikálních a chemických oborů. Poskytuje vysokoškolské vzdělání tradičně vysoké úrovně s hlubokým matematicko-fyzikálním základem a individuálním přístupem k jednotlivým studentům.

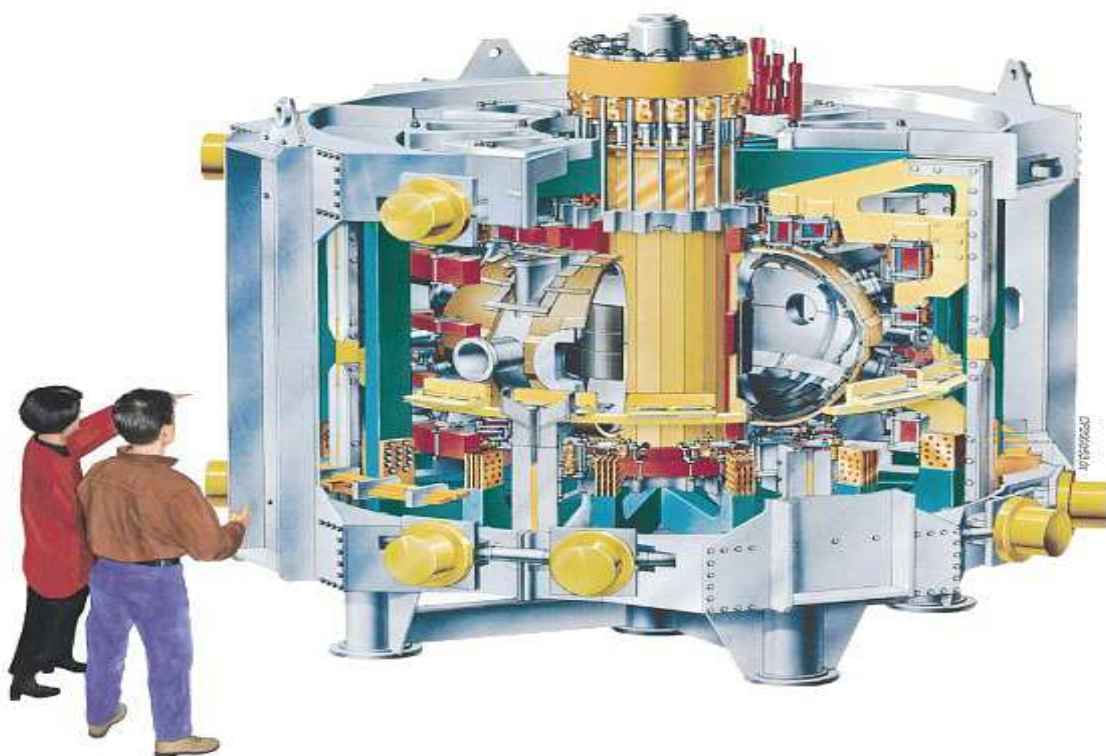


Obr.1 Tokamak Golem

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze získala roku 2007 unikátní pokusné zařízení pro zvládnutí řízené termojaderné fúze: tokamak jménem GOLEM. Na tomto zařízení bude vedle vědecké činnosti provozována i činnost vzdělávací. Na fakultě se v současné době věnují velice intenzivně a fundovaně popularizaci vědy u středoškolských studentů. „DEN NA JADERCE“ či „DEN S JÁDREM ANEB JADERNÁ FYZIKA PŘEVÁŽNĚ VÁŽNĚ“ jsou fakultou pořádané akce, které zahrnují sérii přednášek, besed, filmů, workshopů, ale také exkurzí na zajímavá místa.

6 ÚFP A TOKAMAK COMPASS

Ústav fyziky plazmatu byl založen v roce 1959. Je jedním z 53 vědeckých ústavů Akademie věd České republiky. Zabývá se vědeckým výzkumem fyziky plazmatu a jeho aplikacemi. Podílí se na výzkumu a vývoji řízeného termojaderného slučování, využití elektrických výbojů, generátorů plazmatu, interakce plazmatu s jinými skupenstvími hmoty, likvidace odpadů v proudu plazmatu, procesů plazmového stříkání a řešení dalších problémů souvisejících s plazmatem.



Obr. 2 Tokamak Compass - schéma

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



Obr. 3 Tokamak Compass

Tokamak COMPASS se řadí svými rozměry (hlavní poloměr 0,6 m a výška komory přibližně 0,7 m) k menším tokamakům, umožňujícím operaci s H-módem, který představuje standardní referenční režim tokamaku ITER. Důležité je, že díky své velikosti a tvaru odpovídá plazma COMPASSU jedné desetíně (v lineárním měřítku) plazmatu v ITERU. Právě kvůli své relevantnosti byl na podzim roku 2004 COMPASS nabídnut Evropskou komisí a UKAEA Ústavu fyziky plazmatu. Instalace a provoz tokamaku COMPASS řadí Českou republiku mezi země s pokročilým výzkumem vysokoteplotního plazmatu a termojaderné

fúze. V současnosti existují v Evropě kromě COMPASSU pouze dva tokamaky s konfigurací podobnou ITERU a H-mód režimem. Jedná se o JET (Joint European Torus) a německý tokamak ASDEX-U (Institut für Plasmaphysik, Garching). JET je momentálně největším experimentálním zařízením tohoto typu na světě.

V současné době jsou na tokamaku provozovány následující projekty: rychlé měření tepelného toku v divertorové oblasti na tokamaku COMPASS pomocí ball-pen sond se sub-mikrosekundovým časovým rozlišením, studium dynamiky okrajové transportní bariéry na tokamaku COMPASS, tréninkový program WP12-GOT-GOT4TSI "Tokamak System Integration" a výzkum okraje plazmatu tokamaku COMPASS pomocí dvojice hluboko zasunutých sond, interpretován počítačovými modely.

7 ZÁVĚR

Absolvování této exkurze by mělo přiblížit studentům praktický náhled na termojadernou fúzi jakožto na další oblast jaderného výzkumu a na problematiku energie, její budoucnosti a různých jejích alternativ.

Nedílnou součástí studia fyziky je pozorování probíhajících procesů za účelem komplexního chápání podstaty přírodních dějů. Názornější představu o jaderném výzkumu, nukleárních experimentech, termojaderné fúzi a budoucnosti energie účastníci nemají možnost získat jinde než právě v Ústavu výzkumu plazmatu, jelikož zde se nachází naprosto unikátní zařízení Tokamak Compass, které je zcela ojedinělé (nejen) v rámci Evropy.

LITERATURA

1. RAUNER, Karel, Václav HAVEL a Miroslav RANDA. NAKLADATELSTVÍ FRAUS. *Fyzika 9: učebnice pro základní školy a víceletá gymnázia*. 1. vydání. Plzeň: Fraus, 2007. ISBN 978-80-7238-617-8.
2. <http://www.fjfi.cvut.cz/DesktopDefault.aspx?ModuleId=1379&ItemId=325>
3. <http://www.fjfi.cvut.cz/DesktopDefault.aspx?ModuleId=517&ItemId=336>
4. <http://jaderka.fjfi.cvut.cz/aktuality/2013/1440-den-s-jadrem-aneb-jaderna-fyzika-prevazne-vazne>
5. <http://dennajaderce.fjfi.cvut.cz/>
6. <http://golem.fjfi.cvut.cz/?chapter=Theory/Tokamaks>
7. <http://golem.fjfi.cvut.cz/?article=excursions>
8. http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/index?m=comp&exp_menu=1
9. <http://en.wikipedia.org/wiki/Tokamak>
10. http://www.vedakolemnas.cz/miranda2/m2/sys/galerie-download/vkn_14_web.pdf