

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jaromír Tobiáš

Nové poznatky v oboru řízených termonukleárních reakcí [Dokončení]

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 4 (1959), No. 6, 679--687

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138384>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1959

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

FYSIKA

NOVÉ POZNATKY V OBORU ŘÍZENÝCH
TERMONUKLEÁRNÍCH REAKCÍ

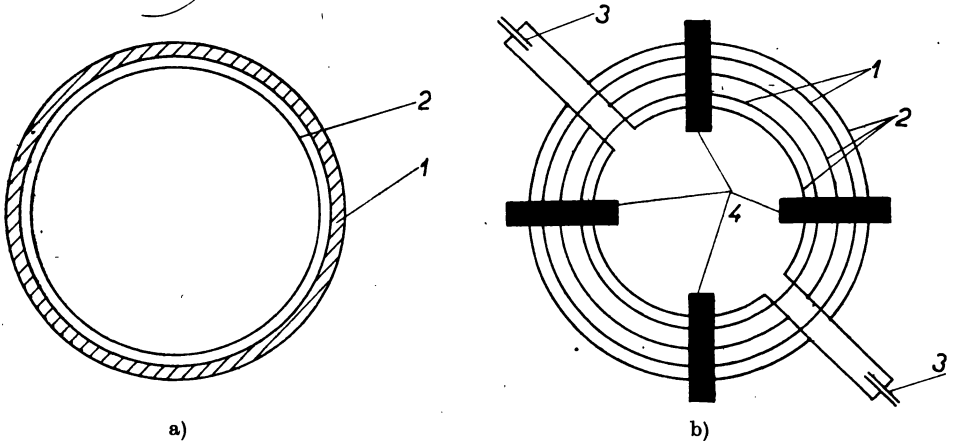
Ing. JAROMÍR TOBIÁŠ

Katedra fyziky fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze

(Dokončení)

B. Zařízení s kvasistacionárním provozem

Tuto přechodnou skupinu tvoří přístroje, pro něž je charakteristické, že jako výbojového prostoru užívají toroidu. Vhodnou konstrukcí je v nich možno výboj stabilisovat na dobu převyšující i 100 μ s. Dnes patří k nejrozšířenějšímu typu zařízení pro výzkum řízené termonukleární reakce. Tato zařízení byla podrobně popsána v řadě článků (viz např. [9], [10], [11], [4] a v tomto časopise v pátém čísle minulého ročníku).



Obr. 6. Nové uspořádání toroidálních přístrojů.

Jako přechodný typ jej označujeme, protože většinou pracují s pinchefektem, ale použitím stabilisujícího mg. pole umožní delší provoz. V novějších typech došlo k některým konstrukčním změnám proti popisu v [1]. Dělená výbojová trubice měla značnou nevýhodu. Mezi jednotlivými izolovanými díly totiž vznikal obloukový výboj, který značně znečišťoval výbojový prostor. Výboj vznikal i mezi trubicí a plasmou. Proto v novějších zařízeních (obr. 6a) vkládá se do dělené trubice 1 ještě toroid 2 z nerezavějící oceli špatně vodivé (aby se zvětšil odpor, je její stěna velmi tenká — 0,2 mm). To zamezí vznik výboje mezi jednotlivými segmenty. Aby byl zamezen výboj mezi plasmou

a trubicí, je trubice zhotovena z vlnitého materiálu. Toto zvlnění vytvoří tak zvané vlnivé mg. pole, které lépe zabraňuje proniknutí plasmy ke stěnám výbojového prostoru, jak bude uvedeno při popisu Stellatoru. Mimo to ve snaze o úsporu oceli nové konstrukce pracují většinou jako vzduchové transformátory, bez těžkého ocelového jádra (viz obr. 6b) se závity 2, rozmístěnými okolo toroidu 1 napájenými v několika bodech po obvodu 3, aby se docílilo strmějšího proudového impulsu a případně s několika malými prstencovými jádry 4, obklopujícími vinutí pro zlepšení vazby. Magnetohydrodynamické úvahy opět ukazují, že stabilisace výboje nastává, volíme-li vnější axiální mg. pole buď stejně silné jako vlastní pole vzniklého výboje nebo mnohem silnější. V prvním případě unáší stahující se plasma (vzpomeň zamrzlé siločáry v plasmě) silové linie ke středu, v druhém nenastává kontrakce plasmy. První případ má tu nevýhodu, že část výkonu, přivedeného do výboje, se spotřebuje na zvětšení energie mg. pole a tím se sníží dosažená teplota plasmy. V druhém případě je spotřeba elektrické energie na vytvoření mimořádně silného mg. pole v celém prostoru trubice velmi značná. Budoucnost těchto přístrojů pro řízenou termonukleární reakci je posuzována velmi optimisticky. V tab. 4 jsou uvedena nová zařízení, která nebyla obsažena v dřívějších zprávách a tabulce v [1].

Tabulka 4
Zařízení pracující s toroidálním pincheffektem

Stát	Název	Průměr trubice (m)	Průměr toroidu (střední) (m)	I_{max} (kA)	Energie (MJ)	t (μ s)	Poznámka
SSSR		0,48	1,25	400	1,2	až 10^3	Pracuje řada zařízení s jádrem i bez jádra. Vybrány hodnoty dosud největšího
Francie	Ekvator TA 2000	0,08 0,26	0,78 2	50			Pracují jako vzduchové transformátory s větším počtem malých prstencových jader
Švédsko		0,08 0,28	0,6 1,3	200	10^{-4} 1	70 70	"
NSR							Jsou ve stavbě, údaje ne- uvedeny

C. Zařízení vhodná pro stacionární provoz

1. Typ Stellator:

Přístroje s toroidální výbojovou trubicí nejsou schopné stacionárního provozu, protože během krátkého času dojde k úniku plasmy z mg. pole na stěnu trubice. Důvod k tomu je tento: V toroidu vznikne nehomogenní mg. pole (viz obr. 7). V tomto nehomogenním mg. poli dojde — vyplývá to z úvah magnetohydrodynamiky — k rozdělení nábojů a vytvoření elektrické intenzity

E. Tyto prostorové náboje se nemohou vyrovnat, protože napříč mg. polem proud nemůže protékat a podélnými proudy k vyrovnání nábojů dojít nemůže. Důsledek takto vzniklé elektrické intenzity I jest, jak opět ukazují magneto-hydrodynamické úvahy, proud částic obojího znaménka ve směru proti příčnému gradientu mg. pole rychlostí v v obr. 2. Tak se plasma během krátké doby z mg. pole vytáhne (projevuje diamagnetické vlastnosti). Byla hledána taková magnetická pole, pro něž by rozdělení nábojů nenastávalo, anebo by se náboje vzniklými proudy v plasmě mohly vyrovnat. Nalezeny byly v podstatě dvě cesty.

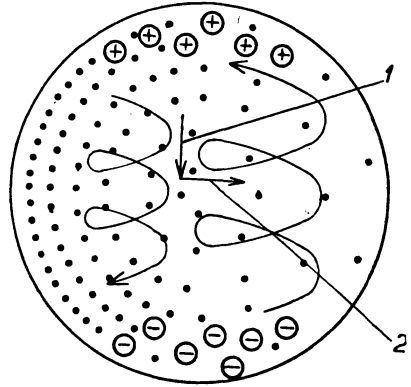
a) Spirálové magnetické pole:

V toroidech mají siločáry vnějšími cívkami vyrobeného axiálního pole tvar kružnice. Předpokládejme, že jsme vytvořili v toroidu 2 takové mg. pole, jehož každá siločára má tvar spirály 4, která má tedy určité stoupání vůči rovině 1 toroidu a teprve po mnoha obězích se uzavře, při čemž vytvoří uvnitř toroidu vlastní toroidální plochu 3 (obr. 8a). Nastane-li v tomto mg. poli nyní rozdělení nábojů, může se vzniklý prostorový náboj vyrovnat proudem podél silové čáry mg. pole, protože proud vzhledem k spirálovitému tvaru siločáry má složku i v rovině příčného průřezu toroidu. Vzniklý prostorový náboj se tedy vždy vzhledem k velké vodivosti plasmy zruší vzniklými proudy a plasma jako celek z mg. nádoby takto utvořené neuniká. Takové magnetické pole je možno vytvořit dvojím způsobem. Jednak je možno stabilisující pole v toroidu tvořit nikoli cívkami, jejichž rovina je shodná s rovinou řezu toroidu 2, nýbrž cívkami 1, svírajícími s touto rovinou určitý úhel (obr. 8b), nebo je možno zkroutit toroid do tvaru osmičky (obr. 8c). Oba tyto způsoby se používají, a přístroje takto konstruované jsou známy pod názvem Stellarator [12], [13] a [14].

b) Zvlněné magnetické pole:

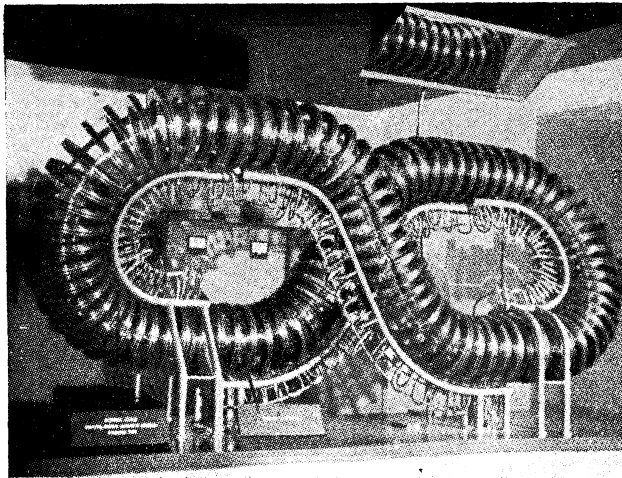
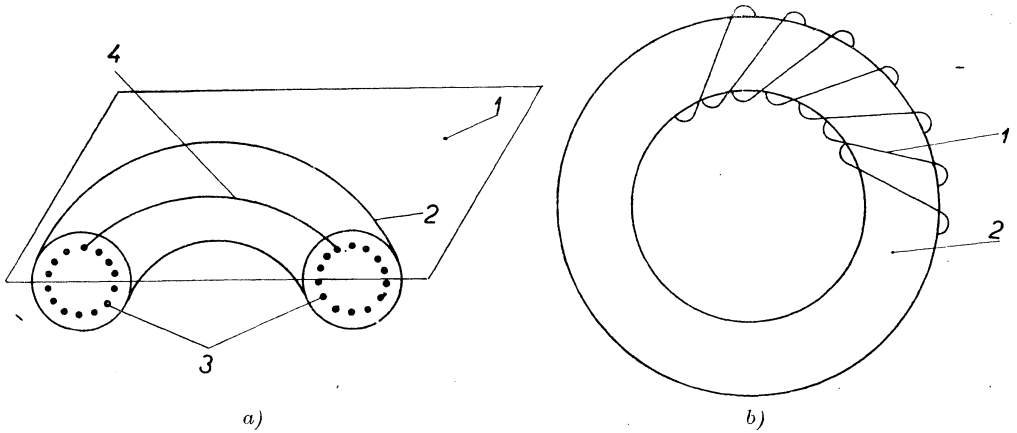
Plasma má snahu uniknout z nehomogenního mg. pole proti směru příčného gradientu mg. pole, jak jsme již uvedli. Tohoto poznatku je možno také využít. Porovnejme chování plasmy 1 v dvou případech na obrázku 2 a 9. V případě vydatého pole 2 směřuje příčný gradient mg. pole do prostoru s plasmou a tedy plasma se snaží uniknout, v případě pole vypuklého 9 směřuje příčný gradient mg. pole 2 z prostoru s plasmou 1 a plasma se tedy bude vracet zpět do prostoru ohraničeného mg. polem v případě, že by z nějakého důvodu došlo k jejímu pohybu z prostoru mg. nádoby. Těchto poznatků je možno potom využít pro konstrukce dalšího typu přístroje, hodícího se pro stacionární provoz (obr. 10). Cívky 1 pro buzení mg. pole nejsou rovnoměrně rozmístěny po obvodu výbojové trubice. Tím vznikne právě vyžadovaný tvar mg. pole (který u toroidálních přístrojů je dosahován také zvlněnými kovovými stěnami výbojové trubice).

U těchto přístrojů vzhledem k dlouhodobému provozu nevystačíme s vytápěním plasmy Ohmovým teplem, získaným průchodem indukovaného proudu



Obr. 7. Rozpad plasmy v toroidálních přístrojích.

plasmou. K tomuto vytápění slouží opět, podobně jako u Zety, ocelové jádro 2 (obr. 10) s primárním vinutím, jímž vybíjíme kondensátor. Tím přehřejeme plasmu. Další ohřev provádíme přivedením vysokofrekvenčního proudu na cívku 3 k magnetickému vytápění (v literatuře „magnetické pumpování“). Podle užití frekvence je někdy užito soustavy dutinových rezonátorů. Zesilo-



c)

Obr. 8. Ke stabilisaci plasmu v toroidech vytvořením spirálovitého mg. pole.

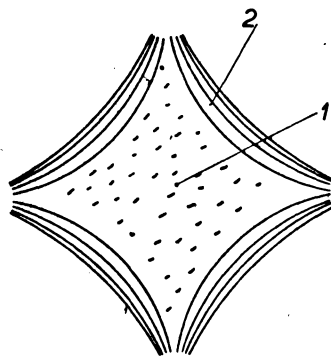
vání a zeslabování mg. pole ve výbojové trubici se projeví střídavou expanzí a kompresí úseku mg. pole v okolí cívky a tím i plasmu. Volíme-li frekvenci tak, aby odpovídala rezonanční frekvenci iontů v mg. poli ($\omega_c = \frac{ZeB}{m}$, kde Z je stupeň ionisace iontu, e náboj elektronu, m hmota iontu) nebo frekvenci rovné $\frac{1}{T}$, kde T je čas, který iont potřebuje k průletu rezonátorem nebo cív-

kou, dochází k předávání energie plasmě a tím k dalšímu dodatečnému ohřevu. Na obr. 10 je zakreslen ještě divertor 4. Vzhledem k dlouhé době, po kterou se plasma nachází ve výbojové trubici, dochází i při volbě mg. polí tvořících mg. nádobu podle předchozích úvah přece ke styku ohřáté plasmy se stěnami výbojového prostoru a jejich odpařením ke znečištění náplně výbojového prostoru. Divertor nutí zvláštním uspořádáním mg. pole povrchové části plasmy k opuštění výbojového prostoru a k adsorpci na stěny divertoru. Tím se během práce přístroje nepřetržitě náplň očišťuje.

Zařízení využívající obou uvedených tvarů mg. pole jsou ve zkušebním provozu. Podle literatury pracují přístroje především v USA. Zkušební zařízení má tvar osmičky, mg. pole 27 000 G, průměr trubice 5 cm. Připravuje se stavba většího typu tvaru protaženého toroidu pro rok 1960 o délce 15 m a průměru trubice 12,5 cm a pro případ úspěchu zařízení o délce 150 m s průměrem trubice 45 cm. O nákladnosti provozu podobného zařízení svědčí, že je na vytvoření potřebného mg. pole o indukci $7,5 \cdot 10^3$ G nutno přivádět výkon $5 \cdot 10^6$ kW.

2. Přístroje s plasmou vyhřívanou urychlovacími částicemi:

Tato kategorie přístrojů vzbudila mimořádný zájem odborníků vzhledem k tomu, že v SSSR bylo postaveno velmi výkonné zařízení, nazvané Ogra [15], o jehož rozměrech si můžeme učinit představu z obr. 11, a které je největším dosud postaveným zařízením pro účely termionukleární reakce. Tyto přístroje (v anglosaské literatuře jsou označovány jako tato zařízení DC-stejnosměrná) sestávají z výbojového prostoru s podélným mg. polem, tvořícím mg. nádobu tvaru z obr. 4. Z boku je do tohoto prostoru vhněn svazek urychlených částic (až 600 kV), které v mg. poli jsou zachyceny, obíhají nejprve po kruhových drahách a postupně vzájemnými srážkami přejde jejich pohyb v neuspořádaný tepelný. Tak vznikne velmi teplá plasma. Bylo nutno však překonat obtíž zřejmou z obr. 12. Jestliže totiž do nádoby 1 (bývá z nerezavějící oceli) bychom do mg. pole vhněli z trysky 2 ionty D_1^+ , potom by tyto ionty opsaly kruhovou dráhu 4 a dopadly opět na trysku nebo při jiné orientaci trysky na stěnu nádoby. Tomu je možno odpomoci tím, že tryskou vhnáme urychlené molekulární ionty D_2^+ (H_2^+). Tyto se pohybují po kruhové dráze 6 o dvojnásobném poloměru a během průletu nádobou se disociují na D_1^+ , to znamená na atomární ionty o poloviční hmotě a tím i o kruhové dráze s polovičním poloměrem 5. Tím je zaručeno, že urychlené ionty nedopadnou zpět na trysku. Tato disociace může probíhat buď samovolně při průchodu iontu plasmou o velké koncentraci, jak tomu je v popsané variantě Ogru, anebo je možno do cesty letícím iontům postavit elektrický oblouk 3 [16], který hoří rovnoběžně s osou trubice. Při průletu iontů tímto obloukem nastává intenzivní disociace. Oblouk hoří za nízkého tlaku a v podélném mg. poli velmi stabilně a může být udržován řádově při metrových vzdálenostech elektrod. Oblouk se uplatní i velmi vydatnými čerpacími účinky. Protože při nynějším stavu techniky lze urychlovat ionty v běžných urychlovačích na energie velmi vysoké (pro Ogru 200 keV) a svazek iontů dosahuje značných proudových intenzit (opět pro Ogru až

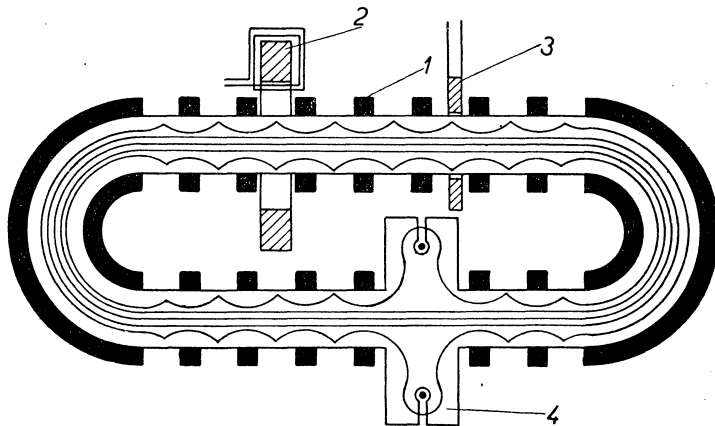


Obr. 9. K stabilisaci plasmý magnetickým polem.

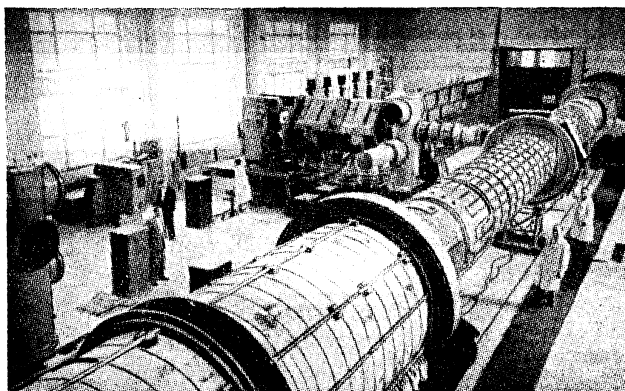
200 mA), je tato cesta k získání mimořádně teplé plasmu velmi vhodná. Plasmu je možno dodatečně ohřát ještě kombinací s adiabatickou kompresí anebo jinými pochody.

Údaje o experimentálních zařízeních:

Ogra v SSSR, rozměry trubice: 12 m délka, 1,4 m průměr, $B = 5 - 8 \cdot 10^3$ G, proud iontů D_2^+ urychlen na 200 keV, příkon $4 \cdot 10^3$ kW; DC X v USA, proud D_2^+ má intenzitu 0,5 mA a urychlen je na 600 keV, podle zkušeností je ve stavbě velké zařízení Orion, které má být dohotoveno příští rok.



Obr. 10. Celkové schéma zařízení typu Stellarator.



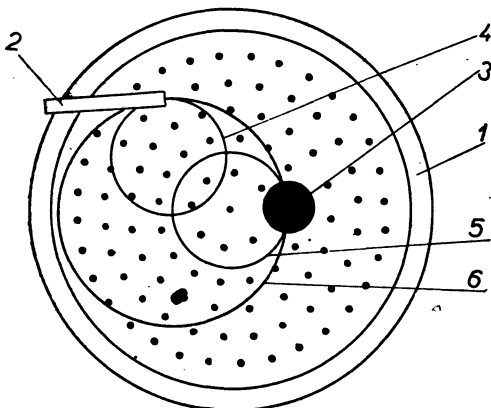
Obr. 11. Sovětské zařízení Ogra.

3. Zařízení s rotující plasmou:

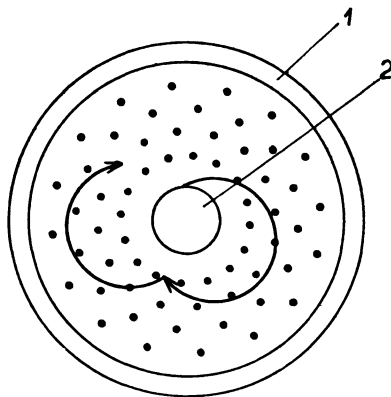
Na tomto principu pracuje řada experimentálních zařízení v SSSR a USA. Princip např. iontového magnetronu je zřejmý z obr. 13. Je použito výbojového prostoru, vytvořeného opět jako mg. nádoba. Vnější válcová plocha 1 slouží jako katoda, válcová anoda 2 je umístěna koncentricky. Účinkem elektrického a mg. pole jsou vháněné ionty nuceny v prostoru obíhat a srážkami

vyhřívají plasmu. Je při tom opět nutno dbát toho, aby plasma nepřicházela ve styk s elektrodami. Je možno užít i modifikací připomínajících betatron, kde relativisticky urychlené elektrony jsou nuceny vnějším mg. polem obíhat po cylindrické ploše a vyhřívát uvnitř uzavřenou plasmu. Různá zařízení těchto typů jsou používána v SSSR, v USA pod označením Ixion, Astron, i v Japonsku — Homopolar. Prozatím nejsou známy podrobnosti o těchto zařízeních a jsou jen důkazem intenzivního hledání nejvhodnějšího způsobu stabilisace a ohřevu plasmy.

Otázka udržení plasmy ve výbojovém prostoru po dostatečně dlouhou dobu je stále prvořadým problémem. Velmi zajímavým řešením je pokus o stabilisaci plasmy vytvořením mg. nádoby vysokofrekvenčním mg. polem. Všechny,



Obr. 12. Princip vstřiku rychlých iontů do magnetické nádoby.



Obr. 13. K popisu přístrojů typu iontového magnetronu.

dosud užívané mg. nádoby umožňovaly únik částic podél mg. siločar. Abychom se vyhnuli této potíži, byla vypracována metoda, užívající kulový rezonátor, v němž je buzeno fázově pošinuté časově proměnlivé mg. vysokofrekvenční pole soustavou dvakrát čtyř výkonných vysokofrekvenčních generátorů. Tímto způsobem [17] lze docílit toho, že mg. nádoba má kulový tvar ve středu rezonátoru. Plasma nemá možnost výtoku a tím ani styku se stěnami, který vždy vede k ochlazení plasmy. Takto uzavřenou plasmu bude potom možno některým z uvedených způsobů, nejspíše vf. polem, ohřát na zápalnou teplotu termojaderné reakce. Dosud byly však publikovány pouze výsledky prací směřujících k stabilisaci plasmy touto metodou. Navrhované zařízení používá kulového rezonátoru o průměru 0,6 m, frekvence 800 Mc/s, osm tetrod s úhrnným pulsním výkonem 1 MW po dobu 10 ms.

IV. Závěr

1. Hlavní problém, který musí být vyřešen před tím, než bude moci být konstruován reaktor pracující na principu syntézy jader, zůstává stabilisace velmi teplé plasmy. Vzhledem k uvedenému značnému počtu možných řešení je možno pochopit, proč vedoucí delegací se shodovali na lhůtě 10 let pro do-

končení základního výzkumu [2], [4], [18]. Aby bylo možno určit nejvýhodnější způsob stabilisace plasmy, je nutno především věnovat pozornost teoretickému i experimentálnímu výzkumu velmi teplé plasmy a rozvoji magneto-hydrodynamiky, aby bylo možno stanovit chování této plasmy v mg. polích. Výzkum je mimořádně nákladný a náročný. Na teoretickém poli vyžadují výpočty užití elektronkových počítačích strojů, na poli experimentálním mimořádně komplikovaná a nákladná experimentální zařízení a spolupráci velkého kolektivu specialistů různých oborů. Vyskytují se technologické a technické problémy, spojené s vysokými teplotami a mohutnými potřebnými výkony pro získání silných mg. případně vf. polí. Je nutno vypracovávat vzhledem ke krátkým dobám a vysokým teplotám nové měřicí metody. Proto je všeobecně zdůrazňován velký význam mezinárodní spolupráce právě v tomto oboru pro urychlení výzkumu.

2. Na rozdíl od úspěšných prvních pokusů, při kterých byly získány neutrony, svědčící o uskutečnění syntesy jader, neklade se dnes velký důraz na to, zda neutrony vznikly v důsledku termojaderné reakce nebo jiným způsobem uskutečněné syntesy. Arcimovič konstatuje, že je zbytečné úporně trvat na otázce, zda při pokusech skutečně proběhla termojaderná reakce. Doslovně říká: *Otázka, zda určitý neutron náleží k vznešené rase potomků termojaderné reakce nebo je-li pochybným dítětem temného urychlovacího procesu, může vzrušovat srdce představitel širokého tisku, avšak v dané etapě výzkumu nemusí vzrušovat odborníka.* Když během impulsu vznikne 10^{12} neutronů, zmizí všechny pochybnosti o jejich původu. Je ovšem pravděpodobné, že v budoucnosti právě ony dosud nejasné urychlovací procesy se stanou zdrojem zájmu, byť i ne pro termojadernou reakci. Vzpomeňme v poslední době nově vyvinutého sovětského urychlovacího zařízení. Tyto procesy souvisí zřejmě s oněmi vlastnostmi velmi teplé plasmy, které dosud dostatečně neznáme a mohou tedy být i vodítkem při zkoumání těchto vlastností.

3. V dosavadních zařízeních uvažuje se o plasmě deuteria nebo směsi deuteria s triteriem. V [18] je uvažováno o tom, že je možné, že bude nutno během času zkoumat možnosti užití i jiných náplní. Prozatím však za nejvhodnější náplň je možno považovat směs DT [4]. Reakce zde probíhá již od kinetických teplot 15 keV a i vzhledem k tomu, že 80% energie obdrží neutrony, za téže teploty plasmy je uvolňovaná energie o dva řády větší než při užití čistého deuteria. Zatím co deuterium se v přírodě vyskytuje poměrně v značném množství, je triterium velmi vzácné. Potíž se získáním triteria je možno snadno překonat. Kdybychom výbojový prostor obklopili vrstvou berilia nebo vizmutu, docházelo by v důsledku reakcí způsobených rychlým neutronem získaným z reakce DT k vzniku dvou neutronů a tím bychom získali značný neutronový proud. Tyto neutrony je možno využít pro uskutečnění reakce $\text{Li}^6(n, T) \text{He}^4$. Reaktor by během pracovního cyklu vyráběl i potřebné množství triteria pro svůj další provoz. Je možno očekávat, že i při vyčerpání zásob lithia vzhledem k reakci $\text{D}(d, p) \text{T}$ i v reaktoru naplněném původně čistým deuteriem, bude v průběhu pracovního cyklu hlavní roli hrát reakce $\text{T}(d, n) \text{He}^4$. Otázka paliva pro tento typ reaktorů by proto byla celkem snadno řešitelná.

Zvládnutí problémů spojených s termojadernou reakcí, tj. zvládnutí a využití uvolněné energie a ovládnutí velmi teplé plasmy magnetickým polem, je dnes pokládáno za prvořadý úkol vědy. Termonukleární reakce by znamenala tak výkonný zdroj energie, že by lidstvu mohla do určité míry nahradit i energii sluneční a to především tam, kde se jí nedostává. Je oprávněné do-

mnívat se, že urychlená plasma tryskající z magnetických trysek bude sloužit k pohonu budoucích kosmických raket. O významu pro přímou výrobu elektrické energie bylo již hovořeno. Proto dnešní úsilí velkého vědeckého kolektivu o vyřešení uvedených problémů jest plně oprávněné.

Literatura

- [1] J. Tobiáš, Pokroky III, 560, 1958.
- [2] W. Kliefoth, Atomkernenergie 3, 415, 1958.
- [3] R. Post, Rev. Mod. Phys. 28, 338, 1956.
- [4] L. A. Arcimovič, Atom. en. 5, 501, 1958.
- [5] H. Grümm, Atomkernenergie 3, 419, 1958.
- [6] Atomics 9, 336, 1958.
- [7] Nuclear Engennering 3, 423, 1958.
- [8] M. A. Cook, W. S. McEwan, Journal of Appl. Phys. 29, 1612, 1958.
- [9] Nuclear Engennering 3, 95, 1958.
- [10] Nucleonics 16, 66, 1958.
- [11] Nuclear Power 3, 486, 1958.
- [12] L. Spitzer, Atom en. Expres inf. 3, č. 11, 1959.
- [13] L. Spitzer, Phys. of Fluids 1, 253, 1958.
- [14] Atomn. en. Expres inf. 1, č. 1 a 2, 1959.
- [15] I. V. Kurčatov, Atom. en. 3, 105, 1958.
- [16] J. S. Luce, Atom. techn. č. 11, 10, 1958.
- [17] J. W. Butler a další, Atom. techn. č. 12, 3, 1958.
- [18] P. C. Thoneman, Atom. techn. č. 11, 3, 1958.

VÝZNAM POJMU REZONANČNÍ FREKVENCE PIEZOELEKTRICKÉHO VÝBRUSU

KARLA KRATOCHVÍLOVÁ a JAN TICHÝ, *Katedra matematiky a fyziky Vysoké školy strojní v Liberci*, JIŘÍ ZELENKA, *Výzkumný ústav elektrotechnické keramiky v Hradci Králové*

(Dokončení)

4. Ovlivnění rezonanční a antirezonanční frekvence sériově nebo paralelně připojenou impedancí

Vzhledem k významu rezonanční a antirezonanční frekvence pro funkci piezoelektrických výbrusů v oscilátorech bude užitečné si povšimnout, jak se tyto frekvence ovlivní, připojíme-li sériově nebo paralelně k výbrusu známou reaktanci (obr. 6a) a b)).

Nejprve věnujeme pozornost paralelní reaktanci a pro zjednodušení našich úvah zanedbejme tlumení. Neuvažujeme-li tlumení, splynou pojmy rezonanční a antirezonanční frekvence a pojmy sériové a paralelní resonance. Snadno zjistíme, že paralelně připojenou kapacitou sériová rezonanční frekvence nebude ovlivněna, kdežto hodnota paralelní rezonanční frekvence poklesne, a tudíž se zmenší i interval mezi sériovou a paralelní rezonanční frekvencí. Čím větší bude paralelně připojená kapacita, tím se tedy bude paralelní resonance přibližovat sériové, až, za uvedeného předpokladu zanedbatelného tlumení, pro nekonečně velikou paralelně připojenou kapacitu obě resonance splynou. Paralelně připojená indukčnost má na paralelní rezonanční frekvenci účinek opačný. Zatím co sériová rezonanční frekvence zůstane opět neovlivněna, frekvence paralelní resonance se zvýší, a to tím více, čím bude připojená indukčnost menší. V tomto smyslu paralelně připojená indukčnost kompensuje