

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Jaromír Tobiáš

Nové poznatky v oboru řízených termonukleárních reakcí

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 4 (1959), No. 5, 554--562

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139402>

## 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>

rovina světla je nyní vodorovná, tzn. kolmá na nastavení polarisátoru a proto tedy světlo neprojde polarisátorem *P*.

Toto zařízení propouští tedy světlo jenom jedním směrem. Říkáme proto, že je to zařízení nereciproké.

Obdobné zařízení lze konstruovat s použitím ferritů, nikoli však pro světlo, ale pro radiofrekvenční vlny, pro které jsou ferrity průhledné. Takové zařízení, kterému se odborně říká izolátor, slouží například účinně v radarových zařízeních k elektrickému oddělení vysílače od přijímače. Takových jednosměrných anebo nereciprokých prvků existuje dnes již celá řada a v centimetrové technice mají široké použití.

Nakonec bych se chtěl ještě zmínit o jistém druhu ferritů objevených v posledních letech. Jde o ferrity s tak zvanou granátovou strukturou. Tyto granáty jsou též ferrimagnetické a některé z nich jsou průhledné pro světlo. S použitím těchto granátů byly již konstruovány modulátory pro světlo, které by mohly najít použití v řadě technických aplikací jako na příklad v zvukovém filmu, v automatisaci a jiných oborech. Bylo by v zásadě též možné s použitím těchto granátů konstruovat nereciproké prvky přijatelných rozměrů i pro světlo. To znamená, že bychom mohli zhotovit okna, která by propouštěla světlo jenom jedním směrem.

### Závěr

Vybrané příklady zdaleka nevyčerpávají celou fyziku magnetických jevů a slouží spíše jako ilustrace nových výsledků dosažených v tomto oboru.

Je třeba poznamenat, že i v Československu je věnována tomuto odvětví fyziky značná pozornost. Tak se skupina vědeckých pracovníků v Ústavu technické fyziky ČSAV zabývá fyzikou a technologií ferritů. Jiná skupina ve Fyzikálním ústavu ČSAV se věnuje základnímu fyzikálnímu výzkumu doménové struktury a magnetizační křivky ferromagnetik. Také na Vysoké škole technické v Košicích je skupina pracovníků, kteří pracují v oboru magnetizační křivky. Na všech těchto pracovištích se dosahuje dobrých výsledků, a tak lze bez nadsázky říci, že i v tomto oboru se podařilo v podstatě vyrovnat zpoždění, kterým československá fyzika před válkou trpěla.

## NOVÉ POZNATKY V OBORU ŘÍZENÝCH TERMONUKLEÁRNÍCH REAKCÍ

Ing. JAROMÍR TOBIÁŠ

*Katedra fyziky fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze*

### I. Úvod

V létě minulého roku konala se v Ženevě druhá mezinárodní konference o mírovém využití atomové energie. Účastnilo se jí více než 6000 zástupců ze 69 států. Tak jako první konference 1955 probíhala ve znamení uvolnění poznatků o mírovém využití štěpných reakcí, byl na této konferenci soustředěn mimořádný zájem na uvolnění poznatků o řízené termonukleární reakci. Na konferenci bylo o tomto oboru předneseno přibližně 100 referátů, z nichž nejzávažnější byly referáty sovětské, americké a anglické delegace. Z příspěvků

delegací Francie, Švédska, Japonska a Německé spolkové republiky je možno usuzovat, že i tam probíhá intenzivní výzkum. Součástí konference byla výstava, na níž byla instalována řada zařízení, sloužících k pokusům v oboru řízených termonukleárních reakcí. Na základě takto zpřístupněného materiálu je nyní možno stanovit hlavní směry, v kterých v současné době probíhá výzkum. Je však nutno uvážit, že v nynějším počátečním stadiu našich znalostí není ještě možno určit, který směr se ukáže úspěšným a zda vůbec použité metody jsou správné. Na konferenci bylo provedeno toto přirovnání: Před 100 lety viděl člověk létat ptáky a mohl tedy považovat možnost létání předmětu těžšího než vzduch za prokázanou. Přesto trvalo velmi dlouho, než bylo konstruováno první letadlo. Tak i pro nás je dnes termojaderná reakce probíhající na Slunci důkazem existence tohoto procesu v přírodě, ale cesta k získání energie lidmi může být velmi zdlouhavá. Pro zkrácení potřebné doby bylo velmi významné odtajnění výsledků výzkumu jednotlivých států, k němuž dal podnět známý referát o synthese jader akademika Kurčatova 1956 v Harwellu.

Na konferenci byl učiněn závěr, že základní výzkum řízené termojaderné reakce vyžádá si ještě řádově deset let. Další deset let si vyžádá hledání nejvhodnějšího způsobu výroby energie použitím termojaderné reakce pro technické využití a teprve potom bude možno přikročit ke konstrukci ekonomicky výhodných zařízení pro výrobu energie k praktickým účelům. Je proto zřejmé, že nelze zanedbat konstrukci a vývoj reaktorů pracujících na štěpném principu.

Příčinou zdánlivě pomalého vývoje našich poznatků o řízené termonukleární reakci jsou naše nedostatečné znalosti plazmy za vysokých teplot v silných magnetických a případně i elektrických polích. Hmota totiž za tak vysokých teplot, jaké doprovázejí termonukleární reakce, může existovat pouze jako plasma vysoké teploty, tj. jako plně ionisovaný plyn. Proto současně s pokusy o uskutečnění řízené termonukleární reakce probíhá teoretický i experimentální výzkum plazmy vysoké teploty a jejího chování v magnetických poli, což je předmětem magnetohydrodynamiky. Teoreticky i experimentálně jsou tyto práce mimořádně obtížné a finančně nákladné. Přesto je problém intenzivně řešen.

Důvodem k tomu je rychle vzrůstající spotřeba energie v celosvětovém měřítku, která trvale může těžko být uspokojena existujícími zdroji, počítaje v to i energetické zdroje pracující na štěpném principu. V závěru [1] byly uvedeny důvody pro tento názor.

Radioaktivní odpad, omezené a jen některým státům přístupné zásoby uranu a thoria jsou závažným argumentem v neprospěch štěpných procesů. Podrobněji se zmíníme o energetické bilanci a účinnosti termonukleárních zařízení, a možnosti přímé přeměny tepelné energie v elektrickou.

Všechna zařízení užívaná pro vyvolání řízené termonukleární reakce pracují tak, že dodáme iontům plazmy kinetickou energii, dostačující k uskutečnění synthesy jader. Při tom vzhledem k vysokým teplotám plazmy je jí nutno izolovat od stěn výbojového prostoru vhodným způsobem uspořádaným magnetickým polem. Dnes užívaná zařízení liší se vzájemně vytvářením plazmy s ionty o velké kinetické energii a geometrickým uspořádáním magnetických polí. Aby přístroj mohl trvale pracovat, musí energie vzniklá synthesou jader během pracovního cyklu být větší, než tepelná energie připadající na nejrůznější druhy ztrát (difusi částic, Jouleovo teplo v cívkách magnetů) zmenšená

o tepelnou energii proměněnou na energii elektrickou, kterou můžeme do pracovního cyklu vrátit. Pro jednoduchá zařízení pracující na principu pinch efektu je možno dokázat, že výkon vzniklý syntésou jader je úměrný  $H_0^4$ , kde  $H_0$  je intenzita magnetického pole v době, kdy syntéza probíhá [3] a pro ztráty během cyklu vyplývá, že jsou úměrné  $H_0^2$ . Tento poznatek lze zevšeobecnit i pro jiné typy zařízení. V důsledku toho je energie vzniklá syntésou jader během cyklu úměrná  $H_0^4 \tau$ , kde  $\tau$  je doba, po kterou syntéza probíhá a tepelné ztráty během cyklu jsou rovny  $AH_0^2$ , kde  $A$  je konstanta závislá především na teplotě, při níž reakce probíhají a druhu reakcí (pro DD reakci při  $kT = 50$  keV\*)  $A = 10^{10}$ , pro DT při  $kT = 15$  keV,  $A = 10^8$ ). Jestliže  $\alpha AH_0^2$  je část tepelných ztrát proměněných v elektrickou energii, může reaktor pracující na principu syntésy pracovat se ziskem energie jen tehdy, je-li splněno

$$H_0^2 \tau > A(1 - \alpha)$$

viz [4].

Kriterium ukazuje, že pro dosažitelné intensity magnetického pole by se doba  $\tau$  musila pohybovat řádově mezi 1–10 sek, což prozatím není dosažitelné vzhledem k účinkům vysokých teplot ( $10^8$  °K) na štěny výbojového prostoru. Zde vzniká tedy závažný problém, který bude možno řešit takovou konstrukcí zařízení, pro níž by  $A$  bylo menší a dobrou stabilisací plasmy, aby  $\tau$  mohlo být velké.

Vzhledem k tomu, že energie uvolněná při syntésě jader se rozdělí jako kinetická energie na neutrony a vzniklé nabitě částice, při čemž kinetická energie neutronů je pro nás ztracena, je možno počítat se ztrátou asi 30% energie uvolněné tímto způsobem (uvolněných neutronů je ovšem možno využít na příklad k výrobě pro reakci potřebného a v přírodě vzácného triteria). Zbytek uvolněné energie je kinetickou energií nabitých částic vzniklých při reakci. Tuto část je možno využít k přímé přeměně v elektrickou energii tím způsobem, že touto energií ohřívá plasma počne se rozpínat a působit proti silám magnetického tlaku. To se ve vnějším obvodu projeví jako vznik elektromotorické síly. Jestliže plasma na počátku rozpínání má teplotu  $T_1$  a po rozeznutí  $T_2$ , platí pro účinnost vztah

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Poměr  $\frac{T_2}{T_1}$  je možno docílit velmi malý, ale vzhledem k tomu, že pro rozeznutí jsme omezeni výbojovým prostorem a např. pro adiabatickou expansi  $T \sim V^{-2/3}$ , kde  $V$  je objem, je zřejmé, že poměr  $\frac{T_2}{T_1}$  není možno libovolně zmenšovat a zdá se, že možná hodnota účinnosti bude se pohybovat okolo 75% (4), vztaheno k té části reakcí uvolněné energie, která se projeví ohříváním plasmy.

## II. Klasifikace nynějších zařízení pro řízenou termojadernou reakci

V současné době pracuje se na celé řadě značně se od sebe lišících zařízení. Přístroje, užívající k ohřívání plasmy pinch efektu, jsou jen jednou skupinou. V důsledku toho bylo nutno provést klasifikaci existujících zařízení podle

\*) Kinetická energie částice je  $W_k = \frac{3}{2}kT$ , kde  $k$  je Boltzmannova konstanta,  $T$  je absolutní teplota plynu. Vzhledem k tomu, že pro nás je někdy výhodné znát kinetickou energii částice, budeme v těchto případech uvádět místo teploty  $T$  součin  $kT$  v jednotkách keV a nazveme jej kinetická teplota. Tak na příklad kinetické teplotě  $kT = 1$  keV odpovídá  $T = 1,16 \cdot 10^7$  °K.

různých kritérií, které spočívají jednak na způsobu ohřevu plasmy, jednak na způsobu užití magnetického pole [5]. Při tom není dosud tato klasifikace jednotná. Je vhodné uvést všechny návrhy klasifikace, protože si tak opatříme přehled metod užívaných při snaze zvládnout problém řízené termojaderné reakce.

1. Rozdělení podle způsobu vytápění plasmy:

- a) Průchodem silného proudu, tzv. Ohmovo vytápění užívané v zařízeních s pinchefektem.
- b) Účinky vř. magnetického axiálního pole v části výbojové trubice, tzv. „magnetické pumpování“, užívané v přístrojích typu Stellator.
- c) Adiabatická komprese plasmy užívaná v některých typech tak zvaných zrcadlicích přístrojů nebo „magnetických pastí“.
- d) Nárazové vlny v plasmě.
- e) Vstřík urychlených částic do výbojového prostoru, např. u sovětského zařízení Ogra.
- f) Vysokofrekventní vytápění.

2. První zařízení užívala pinchefekt jak k ohřátí plasmy, tak i k její izolaci magnetickým polem od stěn výbojového prostoru. Ve většině přístrojů užívaných dnes nedochází k současnému zahřívání a tvoření magnetické izolace plasmy. Na základě toho navrhl Alvén rozdělení do tří skupin:

- a) Nejprve je plasma zahřívána a potom uzavřena magnetickým polem (Ogra).
- b) Nejprve je plasma uzavřena magnetickým polem a potom ohřívána (Stellator).
- c) Obojí probíhá současně (zařízení s pinchefektem).

Toto rozdělení je dosti hrubé a někdy nevystihuje přesně poměry ve výbojovém prostoru. Jeho význam je především v tom, že podtrhuje možnost oddělené probíhajícího ohřevu a uzavření plasmy magnetickým polem.

3. Ke klasifikaci může být užito i rozdílu uzavíracího magnetického pole. Teller navrhl rozdělení:

- a) Přístroje s pulsním provozem s využitím pinchefektu.
- b) Přístroje s kvasistacionárním režimem práce s uzavřeným vnějším magnetickým polem (Stellator).
- c) Magnetické pasti s otevřeným magnetickým polem.
- d) Přečhodné typy na způsob iontového magnetronu.

4. Je možno užít ještě další kritérium (Arcimovič [4]), které nevychází z uspořádání magnetického pole, nebo prostředků k vytápění plasmy. Za kritérium je možno volit, zda plasma je ohřívána tím, že nejprve byla uvedena do makroskopického pohybu, třeba pinchefektem a tento potom nějakým způsobem je převeden na termický pohyb částic, anebo zda ohřátí plasmy bylo provedeno způsobem, při kterém makroskopický pohyb plasmy neměl významnou úlohu. Do této druhé kategorie by potom připadala zařízení b, podle odstavce 3).

Pohybová rovnice jednotkového objemu plasmy o specifické hmotě  $\rho$  s rychlostí  $v$  v nejjednodušším tvaru je

$$\rho \frac{dv}{dt} = j \times B - \text{grad } p,$$

kde  $j$  je hustota proudová,  $B$  indukce mg. pole,  $p$  kinetický tlak plynu.

a) První případ nastává tehdy, když magnetodynamické síly jsou mnohem větší než tlak plynu, tedy

$$e \frac{dv}{dt} = j \times B.$$

V první skupině budou tedy zařízení, při nichž nenastává rovnováha mezi kinetickým tlakem plynu a magnetodynamickými silami. Protože rychlosti, kterými se plasma pohybuje, jsou velmi značné, a rozměr výbojového prostoru je omezen, musí doba cyklu, po kterou magnetodynamické síly působí, být (vzhledem k  $t = \frac{a}{v}$  při  $v > a$ ) velmi krátké, řádově mikrosekundy. Do této kategorie patří všechna impulsová zařízení pracující s mimořádně velkými impulsními proudy, tj. zařízení typu nestabilisovaný pincheffekt, mg. zrcadlíci přístroje pracující na principu adiabatické komprese, nárazové vlny případně jiného pochodu explosivního charakteru.

b) Druhý případ nastává tehdy, když volíme tlak plynu a magnetodynamické síly stejné, tedy

$$\text{grad } p = j \times B.$$

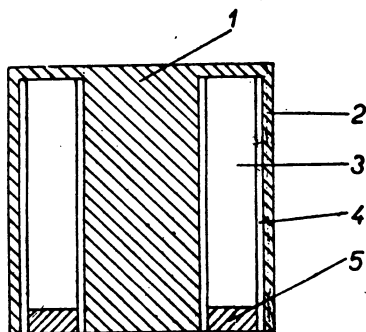
V tomto případě je možno, aby proces trval delší dobu, protože makroskopický pohyb plasmy nemusí nastat a není rozhodující pro ohřev plasmy. Na tomto principu pracují přístroje typu toroidálního pincheffektu na způsob Zety, přístroje typu Stellarator (podle odstavce 3 bod b) a zrcadlíci přístroje s vřhanými urychlenými částicemi typu Ogry (odst. 3 bod c) anebo konečně i většina zařízení pod bodem d). V dalším se budeme držeti této klasifikace.

### III. Princip, popis a zhodnocení nynějších zařízení

#### A. Zařízení pro impulsní krátkodobý provoz.

##### 1. Lineární pincheffekt:

Prvá zařízení k ohřátí plasmy na teplotu umožňující vznik termonukleární reakce byla konstruována na tomto principu: Velmi strmý a vysoký proudový impuls přímou výbojovou trubicí způsobil kontrakci plasmy výboje a přeměněním kinetické energie plasmy v energii tepelnou dostatečně ohřál plasmu. Procházející proud vzbudil mg. pole, které jednak ohřálo kontrakci plasmu, jednak i stabilisovalo po



Obr. 1. Uspořádání výbojové trubice pro pincheffekt tvaru cylindrické plochy. 1 — vnitřní válec, 2 — vnější válcová plocha (slouží jako přívodce el. energie), 3 — výbojový prostor, 4 — stěna výbojového prostoru z izolantní hmoty, 5 — prstenec sloužící jako druhá elektroda.

krátkou dobu stažený sloupec plasmy v ose trubice. Stabilisace je však poměrně nedokonalá, sloupec se během několika mikro-sekund rozpadá a dotykem se stěnami trubice se ochladí. Pro získání energie je tento způsob málo výhodný. Přesto se i v tomto výzkumu pokračuje a to jednak protože

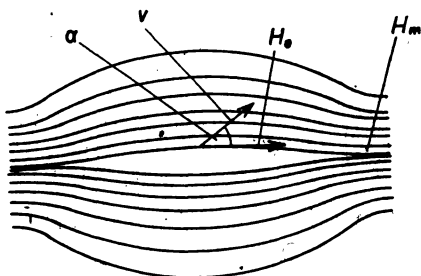
umožňuje poměrně jednoduchým zařízením studovat plasmu vysokých teplot, jednak se hledají různé cesty ke stabilisaci plasmy vnějšími mg. poli a uspořádáním výbojového prostoru. (Např. provádíme výboj v prostoru mezi dvěma válci, viz obr. 1, nebo trubici nezhotovujeme z izolační hmoty jako je křemen nebo porcelán, ale z vodivého nemagnetického materiálu složeného ze vzájemně izolovaných částí, podobně jako u Zety, viz [1].) Vzhledem k tomu, že teplota ohřáté plasmy  $T \sim J^2$ ,  $J$  je proud výbojem, koncentrace částic  $n \sim \frac{1}{V}$  a počet uskutečněných reakcí je úměrný teplotě, koncentraci a době  $\tau$  trvání pinche, je možno jako směrodatnou veličinu pro energii takového zařízení, získanou během jednoho cyklu, užití součinu  $J^2 \frac{\tau}{a^2}$ , kde  $a$  je průměr staženého sloupce plasmy. Ukazuje se, má-li být tato energie rovna energii vložené, že musíme při nejmenším vybit trubici  $10^{11}$  J (při DT reakci) a tuto energii tedy opět během několika mikrosekund odebrat. Při tom tato energie je rovna energii uvolněné výbuchem asi 10 t trolitu. Je zřejmé, že prozatím nejsme schopni takovou energii během časového intervalu řádově mikrosekundy zvládnout. Je připojena tabulka zařízení, o nichž bylo referováno jednak v literatuře, jednak na ženevské konferenci s výjimkou těch, která byla uvedena již v [1].

Tabulka 1  
Zařízení pracující s lineárním pinchefektem

Stát	Název	Délka (m)	Průměr (m)	$I_{max}$ (kA)	$\left(\frac{d}{dt}\right)$ (kA/s)	Energie (MJ)	$t$ ( $\mu$ s)	Poznámka
SSSR		0,17 až 2	0,05 až 0,6	$10^2$ až $10^3$	$10^3$	0,5	mikrosekundy	
USA	Columbus T 2	3,6	0,9	—	—	—	„	Do trubice vháněna plasma, výboj nastane po vytvoření vodivého kanálu mezi elektrodami
Anglie	AWRE „	— —	— —	$10^2$ $4 \cdot 10^2$	$10^2$ $6 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^{-3}$ $4,5 \cdot 10^{-2}$	„ „	
USA	Triax	—	—	$5 \cdot 10^2$	—	$10^{-2}$	$10^3$	Viz obr. 1
NSR								Existují, údaje nepublikovány

## 2. Přístroje pracující na principu adiabatické komprese:

Tento typ přístrojů je popsán v [4], [5], [6], [7], někdy je nazýván zrcadlicí přístroj. Magnétohydrodynamické úvahy ukazují, že z nehomogenního mg. pole zvláštního typu, viz obr. 2, nemohou uniknouti ty nabitě částice, jejichž rychlost svírá v místě nejmenší intenzity pole  $H_0$  s touto úhel  $\alpha$  dostatečně velký. Uniknou jen ty částice, pro které platí

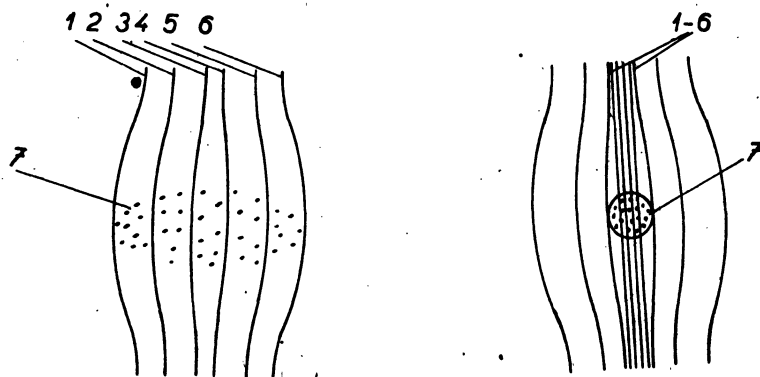


Obr. 2. Princip magnetické nádoby.

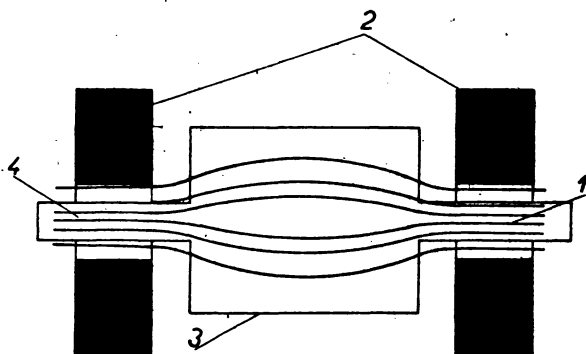
$$\sin \alpha < \frac{H_0}{H_m},$$

kde  $H_m$  je maximální mg. intenzita. Ostatní se odrazí zpět do prostoru mg. pole. Tato konfigurace pole může tedy sloužit jako magnetická nádoba, ze které nemá plasma možnost (nebo alespoň silně omezenou) uniknout. Plasmu můžeme do tohoto prostoru dostat např. tak, že ji tam vženeme z jiného prostoru, kde ji získáme vhodným způsobem. Plasmu můžeme vyrobit i přímo v mg. nádobě, jestliže vznik pole probíhá dostatečně rychle, aby inten-

sita indukovaného elektrického pole byla dostatečně veliká k vzniku výboje. Tato plasma nemá teplotu dostatečnou k vzniku termonukleární reakce a je ji



Obr. 3. Ohřev plasmu adiabatickou kompresí a) před zesílením mg. pole, b) po zesílení mg. pole.



nutno ohřát. Ohřev provedeme adiabatickou kompresí. K tomu je nutno zmínit se však ještě o dalších výsledcích magnetohydrodynamických úvah. Vzájemný vztah

Obr. 4. Princip přístroje pracujícího na principu adiabatické komprese a nárazové vlny. 1 - k vývěvě, 2 - cívky, 3 - stěny výboj. prostoru, 4 - přívod plasmu.

plasmu k mg. poli je takový, že mg. siločáry jsou pevně s plasmou spojeny, říká se, že jsou v plasmě zamrzlé. Jestliže měníme tedy tvar mg. pole, v němž se plasma nachází, mění se i tvar plasmu. Této vlastnosti, která je v magnetohydrodynamice známa jako Cowlingův zákon, je možno nyní využít



i pro ohřev plazmy. Jestliže, viz obr. 3a) a b), kde 7 je plasma a siločáry procházející plasmou jsou označeny 1—6, zvětšíme původně slabé mg. pole, v němž jest obláček plazmy, dostatečně rychle, strhnou mg. siločáry plazmu s sebou. Nastane tak velmi značná komprese plazmy doprovázená ohřevem. V SSSR byly tímto způsobem získány plasmoidy o kinetické teplotě 200 eV a koncentraci  $10^{18}$ . Celkové uspořádání přístroje viz na obr. 4. Zařízení umožňují poměrně dlouhou dobu zachování stlačené horké plazmy vlivem stabilizujícího účinku magnetického pole po provedené kompresi. V tabulce 2 jsou uvedeny některé modifikace provedení.

Tabulka 2  
Zařízení pracující s adiabatickou kompresí

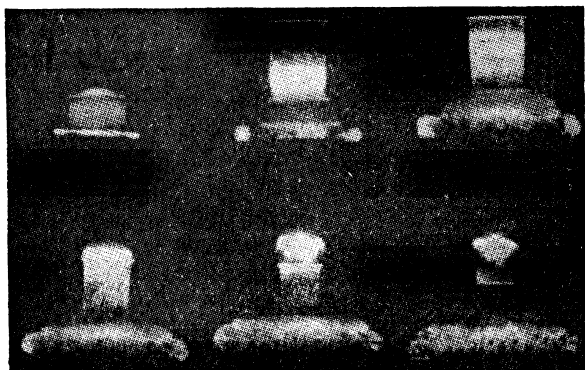
Stát	Název	Popis
SSSR		Zařízení poskytovalo plasmu o koncentraci $10^{18}$ (v $\text{cm}^3$ ) s kinetickou teplotou prozatím 100—200 eV
USA	Table Top	Doba komprese 500 $\mu\text{s}$ , doba života plazmy 20 ms, energie užitá k vytvoření mg. pole 0,5 MJ
	Toy Top	Tři spojené trubice o délkách 3 m, 1,5 m, 0,3 m a průměrech 20 cm, 15 cm, 7,5 cm; plasma nejprve stlačena v první trubici a vehnána do druhé, zde znovu stlačena a vehnána do poslední, kde opět stlačena
	Felix	Bez údajů

### 3. Přístroje pracující na principu nárazové vlny:

Ukázalo se, že velmi účinným způsobem ohřevu je vytvoření nárazové vlny v plasmě. I v zařízeních pracujících s pinchefektem může dosáhnout plasma při kontrakci tak velké rychlosti, že vznikne nárazová vlna. Pro ohřev plazmy je tento způsob proto tak výhodný, protože přeměna kinetické energie uspořádaného pohybu plazmy v neuspořádaný termický pohyb nevyžaduje v tomto případě značný počet vzájemných srážek nabitých částic a k ohřevu dochází velmi rychle.

Nárazová vlna v plasmě může vzniknout různým způsobem. Pro úplnost zmiňme se o sovětských pokusech vyvolat termonukleární reakci neelektrickými pochody. Nádoba s deuteriem byla obklopena trinitrotoluem a tento přiveden k explozi. Vzniklá tlaková vlna způsobila ionisaci deuteria a ohřátí vzniklé plazmy na potřebnou teplotu. Při tom byly měřicí aparaturou zaznamenány rychlé neutrony, které svědčí o tom, že proběhla termonukleární reakce. Aparatura je během pokusu zničena. V pozdější době byly podobné pokusy uskutečněny i v USA a vznik nárazové vlny a její šíření plasmou zachyceno fotograficky speciální kamerou, při čemž jednotlivé obrázky následují v intervalech 4  $\mu\text{s}$  ([8], obr. 5). Světla zvětšující se skvrna v horní části je plasma vzniklá postupem čela rovinné nárazové vlny vytvořené výbuchem určitého množství explozivní látky (šedá část obrázku a potom zvětšující se šedý obláček).

Nárazovou vlnu v plasmě je možno získat také účinkem dostatečně velkých a nárazově působících magnetodynamických sil. Použijeme přístroje z obr. 4 k vytvoření magnetické nádoby. Ke každé cívce na obou koncích přidáme ještě další cívku jen o jednom nebo dvou závitech, kterými vybijeme velmi



Obr. 5. Vznik plasmy vytvořením nárazové vlny.

silný a strmý proudový impuls. Tím vznikne na obou koncích výbojového prostoru prudká komprese plasmy, která vytvoří nárazovou vlnu. Tato nárazová vlna postupuje od obou konců ke středu mg. nádoby a způsobí při vhodně volených podmínkách mimořádně silné oteplení plasmy, které by případně mohlo umožnit vznik termonukleární reakce. Zákonitosti šíření nárazových vln v plasmě v silném mg. poli jsou taktéž jedním z velmi intensivně řešených problému magnetohydrodynamiky.

V tabulce jsou opět uvedena data některých zařízení, která dosud nejsou do té míry propracována, aby v nich vznikala termonukleární reakce.

Tabulka 3

Zařízení pracující s nárazovou vlnou

Stát	Název	Popis
SSSR		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Použito výbuchu konvenčních trřaskavin</li> <li>2. Zkoumány účinky nárazové vlny při vzniku pinchefektu</li> <li>3. Účinky nárazové vlny v přístrojích s adiabatickou kompresí</li> </ol>
USA	Scylla	Hliníková výbojová trubice má délku 2,68 m; při vzniku nárazové vlny vznikají tlumené oscilace 200 kc/s
	PAM	Na trubici řada cívek, které provádějí kompresi plasmy vždy v okamžiku, kdy k nim dospěje nárazová vlna (putující vlna), dosažená rychlost plasmy $6 \cdot 10^9$ cm/s

(Dokončení)