Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Pavel Schmiedberger

Laserová termojaderná reakce

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 25 (1980), No. 4, 185--189

Persistent URL: http://dml.cz/dmlcz/139754

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1980

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

které jsou publikovány v tomto čísle časopisu. Chtěl jsem proto u příležitosti čtvrtstoletého jubilea jaderné a fyzikálně inženýrské fakulty ČVUT vyvolat zamyšlení nad zkušenostmi z výchovy mladých lidí, kteří mají být současně fyziky i inženýry, iniciátory nových myšlenek a nových cest, které fyzika a matematika před moderní technikou a technologií otevírají; mají se stát nositeli hlubšího stupně porozumění mezi přírodovědci a inženýry.

Laserová termojaderná reakce

Petr Schmiedberger,
katedra fyzikální elektroniky FJFI

Problém řízené termojaderné reakce je jedním z hlavních problémů současné fyziky. Jeho přitažlivost z hlediska vědeckého i ekonomického je dána tím, že umožní využít ohromné zásoby termojaderného paliva na Zemi. Nejvhodnějším palivem jsou těžké izotopy vodíku a litium, jejichž množství ze zemských zdrojů přístupných člověku je takové, že by vystačilo pro potřeby lidstva na milióny let i při mnohokrát vyšší spotřebě energie, nežli je tomu dnes. Avšak na cestě k uskutečnění řízené termojaderné reakce leží řada překážek, které vznikají z toho faktu, že termojadernou reakci lze uskutečnit pouze v tom případě, že dvě jádra reagujících atomů se k sobě přiblíží na vzdálenost řádově 10^{-13} cm. Aby se kladně nabitá jádra k sobě přiblížila na takovou vzdálenost je nutné, aby překonala vzájemné elektrostatické odpuzující síly. Uskutečnit tento proces je možné tím, že látka je zahřáta na vysokou teplotu a tím se kinetická energie jader stane dostatečně vysokou, aby překonala elektrostatické odpuzující síly při srážkách jader. Pro těžké izotopy vodíku, deuterium a tritium je požadovaná teplota pro překonání elektrostatického valu nejmenší a je $\approx 10^8$ °C, což představuje kinetickou energii jádra ≈ 10 keV.

Aby se při termojaderné reakci dosáhlo energetického zisku, nestačí reagující atomy pouze zahřát na požadovanou teplotu, ale je potřeba udržet tuto teplotu po dostatečně dlouhou dobu, aby se uvolněnou energií reakce nahradila energie spotřebovaná na zahřátí látky. Tato zjednodušená úvaha vede k další podmínce pro uskutečnění termojaderné reakce, kde energie uvolněná bude větší než energie dodaná: součin hustoty reagující látky (plazmatu) a doby jejího udržení, tj. $n \,.\, \tau$, musí být větší než $2 \,.\, 10^{14}$ s/cm^3 pro směs deuteria a tritia (D + T), které mají nejmenší požadavky z hlediska teploty i minimální $n \,.\, \tau$ proti jiným látkám.

Práce na řízené termojaderné reakci byly zahájeny téměř před třiceti lety. Za tuto dobu se fyzika plazmatu a řízené termojaderné reakce rozvíjela, stala se pevnou součástí fyziky,

prošla několika obdobími bouřlivého rozvoje a nadějí, jakož i útlumem a skepsí tak, jak se dařilo řešit problémy, které stojí na cestě k uskutečnění řízené reakce. Počátkem sedmdesátých let byla řada základních fyzikálních problémů vyřešena, celkový pohled na tento obor po fyzikální stránce byl objasněn a současně se začátkem světové energetické krize i společenský pohled na tento obor umožnil, aby se v celosvětovém měřítku rozvíjel systematicky a dynamicky.

V současné době jsou charakteristické tyto dva přístupy k řešení řízené termojaderné reakce:

a) *Magnetické udržení* předpokládá, že plazma, ve kterém má dojít k reakci, bude udržováno magnetickým polem vytvořeným vnějším zdrojem s nejrůznější konfigurací. Nejnadějnější a nejpropracovanější je udržení plazmatu toroidálním magnetickým polem v zařízeních typu Tokamak. Pro udržení plazmatu v těchto nádobách se předpokládá doba udržení $\tau \approx 10$ s a hustota plazmatu $n \approx 10^{14}$ atomů/cm^3 (odpovídá jedné stotisícině hustoty vzduchu). V roce 1978 bylo na Tokamaku PLT v Princetonu dosaženo teploty 6 keV při $n \,.\, \tau = 10^{13}$ s/cm^3.

b) *Inerciální udržení* nevyužívá k udržení plazmatu vnějších polí a snaží se uskutečnit reakci ve velmi krátkém okamžiku dříve než se vzniklé plazma samo rozpadne. To předpokládá čas udržení $\tau = 3 \,.\, 10^{-11}$ s a hustotu plazmatu $n = 3 \,.\, 10^{25}$ atomů/cm^3 (odpovídá dvanáctinásobné hustotě olova).

V současné době existuje několik způsobů, jak v krátkém intervalu dodat do termojaderného materiálu dostatek energie pro jeho zahřátí na reakční teplotu. Je to fokusace laserových svazků, fokusace svazků relativistických elektronů nebo svazků těžkých či lehkých iontů získávaných výkonnými urychlovači. Ve všech případech je energie fotonů nebo nabitých částic fokusována na terč, kterým je dutá koule o průměru několika set μm až 3 mm naplněná směsí deuteria a tritia a pokrytá několika vrstvami materiálu s různým atomovým číslem (z lehkých nebo těžkých atomů). Konfigurace terče je dána především druhem svazku, kterým bude terč zahříván a dále jeho energií a požadovaným energetickým ziskem z reakce. Obecně lze zdroj pro zahřátí terče charakterizovat takto:

energie ve svazku 0,3 – 3 MJ
výkon svazku 100 – 400 TW
hustota energie v terči $10^7 - 10^8$ J/g.

Doposud nejpropracovanější a také nejperspektivnější z hlediska technologie je inerciální udržení plazmatu pro uskutečnění termojaderné reakce laserovými svazky – laserová termojaderná reakce nebo také laserová fúze.

Ústřední myšlenkou laserové termojaderné reakce je využít fokusovaných laserových svazků k vyvolání velice silných tlaků v prostředí terče tak, jak byl popsán výše, což v něm způsobí hydrodynamické toky vedoucí ke vzniku vysokých hustot. Termojaderná směs není zahřívána přímo, ale efekty souvisejícími s kompresí materiálu, tedy adiabatickým ohřevem. Komprese materiálu má ještě další významný důvod. Jednoduchý výpočet ukazuje, že energie, kterou je třeba dodat, je nepřímo úměrná čtverci hustoty.

Dále pak alfa-částice vznikající v termojaderné reakci v dostatečně hustém plazmatu zahřívají prostředí a přispívají ke zvýšení reakčních aktů, tj. ke zvýšení vyhoření paliva.

Schéma laserové termojaderné reakce je tedy toto: Laserový systém vytváří na svém výstupu několik svazků, jejichž celková výstupní energie a výstupní výkon (tedy i délka impulsu) splňují výše popsané podmínky. Laserové svazky jsou optickou soustavou fokusovány tak, že ozařují téměř rovnoměrně termojaderný terčík. Terčíkem je dutá skleněná kulička o průměru asi 300 – 500 μm s tloušťkou stěny 5 μm. Uvnitř je tato koule pokryta vrstvou deuterium-tritiového ledu a centrální část je prakticky prázdná. Z vnějšku je koule pokryta tenkou vrstvou látky s vysokým atomovým číslem a na ni je nanesena vrstva látky s nízkým atomovým číslem.

Když fokusované laserové svazky dopadnou na terč, začne se povrch terče odpařovat a kolem terče se vytvoří plazmová korona, ve které se další část laserového impulsu absorbuje a způsobuje expanzi části korony. Tím je zbytek terče zpětným rázem stlačován do středu. V koroně vznikají při absorpci rychlé elektrony, které by mohly zahřívat střed terče, tj. termojaderné palivo. Proto je na povrchu skleněné slupky vrstva materiálu s vysokým Z, aby byly tyto elektrony absorbovány. Snahou je až do konce komprese terče udržet palivo ve stavu D + T ledu a teprve při kompresi uprostřed terče na hodnotu hustoty stokrát větší než je hustota D + T ledu jej adiabaticky ohřát na požadovanou teplotu. Toto schéma vyžaduje, aby laserové záření působilo na terč v průběhu celého procesu komprese, aby tak tento proces byl v průběhu času urychlován.

Ještě než se podaří laserovou fúzi uskutečnit stojí před fyzikou řada problémů, které směřují k lepšímu teoretickému porozumění a ke zjemnění experimentálních metod, které by dovolily zvýšit účinnost konverze laserové energie pro kompresi a ohřev terče a na druhé strně by zabránily ztrátám energie. Aby bylo možné udělat si představu o nárocích na experimentální techniku, stačí uvést požadavky na prostorové a časové rozlišení: je to 1 μm v prostoru a 10 ps v čase. Experimentální diagnostika plazmatu je velice delikátní a spočívá ve využití mnoha různých diagnostických metod, např. rychlé fotografie v rentgenovské oblasti, rentgenovské spektroskopie, rentgenového mikroskopu, detekce nabitých částic, detekce a spektrometrie neutronů, metody radiochemie, interferometrie atd. Experimentální údaje můžeme porovnávat s numetrickými modely a tím stále zpřesňovat představu o dějích probíhajících v reálném experimentu. Nepřímá technika je velmi náročná na experimentální zařízení, na pečlivé zpracování dat a na výpočetní techniku.

V současné době je prvořadým cílem výzkumu laserové fúze její uskutečnění s kladným energetickým ziskem. To znamená, že energie uvolněná termojadernou reakcí musí být větší než energie laserového svazku, kterým byl terč komprimován a ohříván. To vyžaduje další pochopení fyziky procesů při interakci laserového záření s hmotou a chování terče při adiabatickém ohřevu a kompresi. Dále dosažení tohoto postupného cíle vyžaduje další rozvoj fyziky a technologie laserů vysokých výkonů. Podle stavu řešení této problematiky v celosvětovém měřítku se očekává provedení ověřovacího experimentu laserové fúze v letech 1982 – 1984.

Dnešní největší existující nebo dokončované laserové systémy nestačí pro provedení ověřovacího experimentu. Poskytují kolem 10% požadované energie a výkonu. Tyto

systémy využívají jako aktivního média skla dopovaného neodymem nebo směsi plynů s CO_2 nebo směsi plynů s atomárním jodem. Výkon těchto systémů udává tato tabulka:

Název systému	země	aktivní medium	výkon	energie
Shiva	USA	Nd : sklo	30 TW	10 kJ
Helios	USA	CO_2	20 TW	10 kJ
Delfín	SSSR	Nd : sklo	20 TW	10 kJ
UMI-35	SSSR	Nd : sklo	20 TW	10 kJ
Asterix-III	NSR	I	1 TW	300 J

Dále existují v SSSR, USA, Veké Británii, Francii a Japonsku systémy s výstupní energií okolo 1 kJ a s výstupním výkonem do 3 TW. Na těchto středních systémech se provádí řada jemných experimentů, které studují fyziku interakce laserového záření s hmotou. K tomuto studiu se využívají také malé systémy s výkonem desítek GW a s výstupní energií do 100 J. Mimo uvedené státy jsou práce spojené se studiem laserového plazmatu prováděny právě na malých systémech v Itálii, Švýcarsku, Polsku a Československu. U nás jsou tyto práce rozvíjeny na fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT. Na tomto pracovišti se ve spolupráci s ČSAV připravuje stavba systému, jehož výstupní výkon a energie by jej zařadily do střední kategorie; jako aktivní materiál bude sloužit atomární jód.

Má-li být laserové fúze využito pro energetické účely bude třeba po uskutečnění ověřovacího experimentu soustředit pozornost na tyto dvě otázky:

1. Výzkum a vývoj vhodného laserového systému,
2. Výzkum a vývoj reaktorové soustavy.

Laserový systém, který bude použit v termojaderném energetickém komplexu musí splňovat mimo uvedené požadavky ještě další podmínky, a to zejména požadavek na vysokou opakovací frekvenci laserových impulsů minimálně jedenkrát za sekundu. Dalším důležitým požadavkem je vysoká účinnost – alespoň 1 %, ale lépe 5 %. Dnešní laserové systémy z těchto hledisek naprosto nevyhovují, poněvadž jejich účinnost se pohybuje v desetinách procenta a maximální opakovací frekvence je jeden impuls za 30 min. Proto se již dnes začínají rozvíjet práce v tomto směru a hledají se cesty ke zvýšení účinnosti a opakovací frekvence na laserech s dnes používanými aktivními médii. Současně s tím se zkoumají i nová média. V tomto oboru čeká laserovou techniku a optiku ještě velká výzkumná vývojová práce a osvojení si nových technologií a postupů.

Problematika reaktorů pro laserovou fúzi je ještě o řád složitější, než jsou dnešní otázky štěpných jaderných reaktorů. Materiály reaktorů budou v případě termojaderné reakce namáhány podstatně více radiací a neutronovým tokem. Situace pro vnitřní stěnu reaktorové nádoby bude taková, že v průběhu životnosti reaktoru bude každý atom stěny zasažen neutronem a každou vteřinu obdrží stěna tlakový šok, protože v nádobě bude vybuchovat nálož s tritolovým ekvivalentem několika kg.

Přes všechny uvedené těžkosti jsou již v současné době předloženy projekty, které dokazují, že s laserovou termojadernou energií je možné počítat a že problémy na cestě k ní lze překonat. Podle světového trendu se dá usuzovat, že experimentální termojaderný

reaktor s laserovou fúzí bude uveden do provozu počátkem devadesátých let tohoto století. Ještě před koncem tohoto tisíciletí by měla dát první laserem vyvolávaná termojaderná energie z pokusné elektrárny první průmyslově použitelný proud. Cesta k tomuto cíli nebude lehká a laciná. Přesto přínos tohoto snažení stojí za to. Pro náš výzkum z těchto úvah plyne, že se musí připojit k tomuto úsilí tak, jak to určuje zaměření našeho průmyslu na výrobu energetických zařízení. Vzhledem k tomu, že celý tento výzkum je velice nákladný, musí se tak dít v zapojení do celkové dělby práce v této oblasti.

Literatura

[1] A. M. Prochorov, S. I. Anisimov, P. P. Pašinin: Uspechi fizičeskich nauk *119*, 1976, č. 3, str. 401.
[2] K. L. Kompa, H. Walther: *High-Power Lasers and Applications*. Springer Series in Optical Sciences 1978.
[3] Lawrence Livermore Laboratory, Laser Program Annual Report 1977.
[4] Referáty 9. Evropské konference o řízené termojaderné reakci a fyzice plazmatu. Oxford září 1979.
[5] J. V. Afanasjev, N. G. Basov, O. N. Krochin: Radiotechnika, tom *17*, Moskva 1978.
[6] John L. Emmett: *US Research on Inertial Confinement*. Referát na 9. Evropské konferenci o řízené termojaderné reakci a fyzice plazmatu.

Generace rychlých elektronů při interakci intenzívního laserového záření s plazmatem

Milan Kálal,
katedra fyziky FJFI ČVUT

Úvod

Potřeba nových zdrojů energie pro budoucnost nikoliv vzdálenou vedla v 50. letech k zahájení intenzívního (do r. 1957 přísně utajovaného) bádání směřujícího k ovládnutí syntézy lehkých jader. Teoreticky bylo zjištěno [1], že např. pro DT směs s teplotou iontů $T_i \simeq 1$ keV je k docílení účinnosti $\eta = 1$ termonukleárního procesu nutno dosáhnout hodnoty součinu $N \,.\, \tau_u \simeq 10^{14}\,\mathrm{cm}^{-3}$ s (tzv. Lawsonovo kritérium), kde N je koncentrace iontů a τ_u je doba, po kterou musí být zajištěny příslušné hodnoty veličin N a T_i. Úsilí experimentátorů, snažících se realizovat potřebné parametry termonukleárního paliva, bylo v té době orientováno na plazma udržované ve vhodně uspořádaných magnetických polích. Očekávaný rychlý úspěch se však nedostavil. Tento fakt přispěl k tomu, aby se na