



## Seriál: Laserujeme

Celý proces inerciální fúze začíná vytvořením příslušného svazku, který fúzní proces zahájí. Lasery však nejsou jedinou možností pro zapálení inerciální fúze. Předpokládá se, že pro produkci energie ve fúzních elektrárnách najdou uplatnění urychlovače iontů, a to zejména díky své vysoké opakovací frekvenci (MHz – ve srovnání s lasery, které mají 10 Hz). Avšak současné iontové urychlovače (a pravděpodobně ani ty vyvinuté v blízké budoucnosti) nedosáhnou takových proudů částic, aby započaly inerciální fúzi. Proto se věnujeme výzkumu zapálení pomocí laserů a pravděpodobně bude realizována i první demo-elektrárna využívající laserové svazky. V tomto dílu seriálu se proto podíváme, jak fungují lasery používané pro fúzi.

### Budiž laserové světlo

Jak funguje laser si ukážeme na dvou systémech, které v současné době slouží k výzkumu inerciální fúze – NIF v Lawrenceově národní laboratoři v Livermore a OMEGA na univerzitě v Rochestru. Oba systémy mají tvarovatelný časový profil impulsu, proto jejich oscilátory – tj. zařízení, kde se vytváří laserové světlo – tomu musí být přizpůsobeny.

Laser NIF začíná vláknovým oscilátorem, kde vlákno je dopováno atomy Yb a vyzařuje lineárně polarizované<sup>1</sup> světlo na vlnové délce 1053 nm. Tento oscilátor vyzařuje laserové světlo spojitě, tj. stimulovaná emise zde probíhá neustále. Říkáme, že je kontinuální. Oscilátor laseru NIF je spojitě čerpán infračervenými laserovými diodami. Z tohoto kontinuálního světla se vytvoří modulaci amplitudy krátký, zpravidla obdélníkový impuls o délce typicky 20 ns, který je pak zesilován na konečnou energii.

Na druhou stranu oscilátor laseru OMEGA je impulzní Q-spínaný oscilátor, kde laserujícím prostředím je impulzními výbojkami čerpaný krystal Nd:YLF. Délka tohoto vygenerovaného laserového impulsu je typicky 100 ns, aby z něj bylo možné vytvarovat impuls o délce několik desítek ns. Q-spínání funguje tak, že v oscilátoru máme umístěný tzv. Q-spínač, což je v případě OMEGA laseru akusticko-optický modulátor (AOM). Po přiložení napětí se v modulátoru vytvoří akustická vlna, která na světlo působí jako difrakční mřížka.

V případě Q-spínaného laseru čerpáme laserový krystal a vytváříme tak inverzní populaci. Q-spínač je v tomto okamžiku přepnutý takovým způsobem, že veškeré světlo (vzniklé spontánní emisí) odvede pryč z oscilátoru. Když se AOM sepne, světlo zůstane v oscilátoru a dojde k jeho zesílení stimulovanou emisí a vznikne laserové záření.

Laserový oscilátor vytvoří svazek o energii v řádu pJ až  $\mu$ J. Jelikož na zapálení fúze potřebujeme energii několik MJ, musíme za oscilátor umístit zesilovací stupně. První zesilovač za oscilátorem zpravidla laserový impuls zesílí milionkrát, kdežto ty další, hlavně kvůli technologickým limitům (odvod tepla a chlazení, dostupná energie čerpání atd.), mají zesílení menší (desetkrát až stokrát). Zesilovače obou laserových systémů (NIF i OMEGA) jsou Nd-dopovaná

<sup>1</sup>Oscilátor může generovat v podstatě libovolnou polarizaci, případně i nepolarizované světlo, ale s lineárně polarizovaným se nejnázne pracuje, proto jej většina laserových oscilátorů generuje.

skla, jelikož sklo má relativně dobré tepelné vlastnosti a dokážeme vyrobit prostorově velké díly, což není možné u krystalů.

Jelikož zesílení svazku na energii 1 MJ v impulzu je technologicky nemožné, laser NIF se skládá ze 192 laserových svazků (laser OMEGA ze 60), které synchronizovaně dopadají na palivovou peletku.

Mezi jednotlivými zesilovači jsou umístěny tzv. prostorové filtry, které, jak už název napovídá, vylepšují – vyhlazují – prostorový profil svazku tím, že odfiltrují nechtěné světelné nehomogenity. Prostorový filtr je v podstatě Keplerův teleskop, kde se v místě společného ohniska obou čoček nachází malá apertura, která propustí jen světlo s hladkým prostorovým profilem, takže nehomogenity jsou aperturou zastaveny. Zavedení prostorových filtrů ve vývoji fúzních laserů představovalo obrovský krok vpřed.

Poprvé byly instalovány na laseru Cyclops v roce 1975 kvůli zkušenosti z předchozího laseru jménem Long Path. Tam se při zesilování na vysoké energie (desítky J) pozorovaly výrazné nehomogenity ve svazku, které způsobovaly poškození zesilovačů. Tyto nehomogenity vznikají technologií čerpání – tepelnými toky v prostředí zesilovače. Při vzniku nehomogenity v prostoru může při zesilování dojít k jejímu nelineárnímu fokusování a zesílení, což může dokonce způsobit poškození laserového zesilovače, pokud její intenzita překročí tzv. intenzitu prahu poškození.

Protože homogenita osvětlení palivové peletky je nezbytná pro její úspěšné stlačení, je věnováno veliké úsilí vyhlazení laserového impulzu. Existuje několik technik, jak toho docílit. Všechny jsou zpravidla založeny na snížení koherence laserového záření, čímž se sníží pravděpodobnost, že tyto nehomogenity vytvoří na povrchu terče tzv. horkou skvrnu (nepleťte si to s horkou skvrnou vzniklou uprostřed palivové peletky), kde je velmi vysoká intenzita laseru. Jednu z těchto technik představuje užití tzv. náhodné (resp. kvazináhodné) fázové desky, která fázově posunuje malé části laserového profilu. Čím více těchto částí je, tím více se laserový profil vyhladí. Homogenní intenzita laserového svazku tak může dosáhnout požadované hodnoty ( $10^{14} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) pro optimální stlačení palivové peletky.

---

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.  
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.