

Významný pokrok ve výzkumu inerciální termojaderné syntézy

Jiří Limpouch

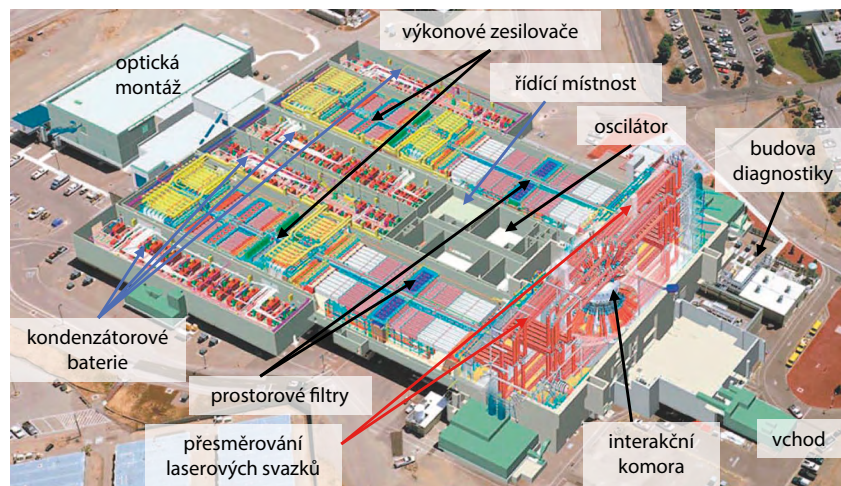
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení technické v Praze, Břehová 7, Praha 1; jiri.limpouch@jfifi.cvut.cz

Článek informuje o významném pokroku ve výzkumu inerciální fúze, kdy v srpnu 2021 bylo získáno 1,3 MJ fúzní energie, což je asi 25krát více než nejlepší dosud publikovaný výsledek. Je podána stručná informace o překážkách na cestě k energetickému využití inerciální fúze. Na závěr je stručně shrnut příspěvek výzkumu v ČR ke studiu inerciální fúze.

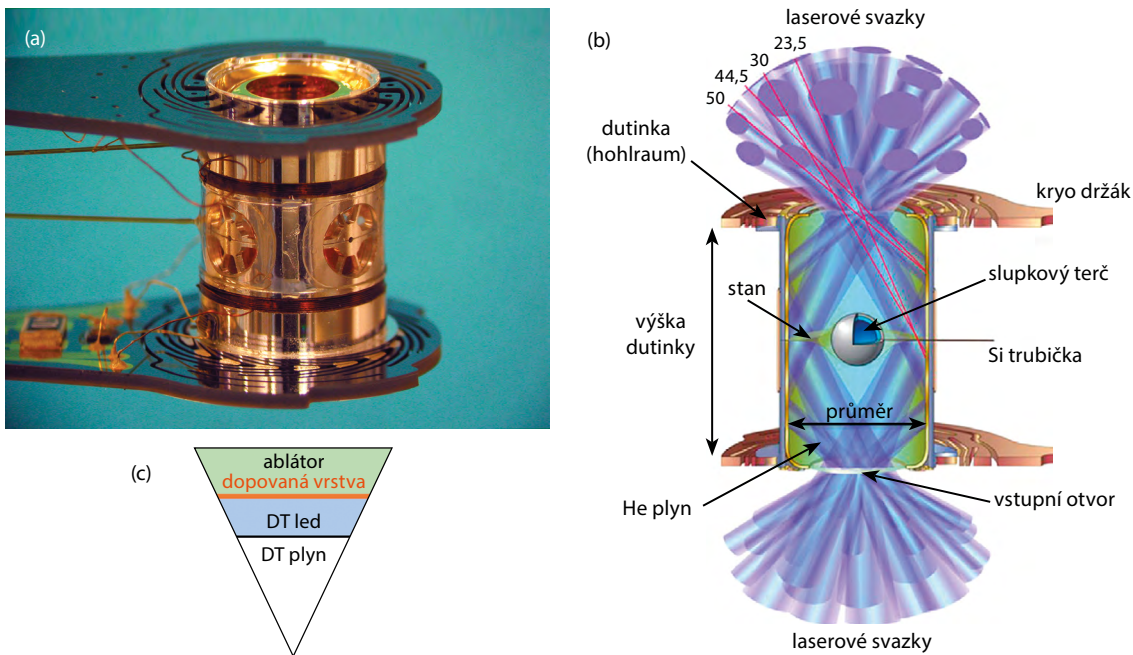
Livermorská národní laboratoř (LLNL) v USA oznámila [1], že 8. srpna 2021 došlo k významnému pokroku ve výzkumu inerciální termojaderné syntézy (fúze). V experimentu na laseru National Ignition Facility (NIF – viz obr. 1) byla v jednom výstřelu uvolněna energie produktů termojaderné fúze 1,3 MJ, což je asi 25krát více, než je dosud nejlepší publikovaný výsledek z roku 2017 [2], a asi 8krát více než nejlepší dosud nepublikovaný výsledek ze začátku roku 2021. Energie uvolněná jadernou syntézou byla však stále na úrovni 70 % energie laserového impulsu (1,9 MJ). Nebyl tedy dosažen *breakeven*, kdy je uvolněná energie rovna energii dodané laserem. Nicméně tato uvolněná energie je podstatně větší než energie 150 kJ absorbovaná vlastním terčičkem s palivem. O úspěšném experimentu informovala 22. září dr. Andrea (Annie) Kritcher z LLNL během konference *Inertial Fusion Sciences and Applications 2021* (IFSA 21), která proběhla online a byla zkrácena na čtyři plenární přednášky.

Dosažení inerciální fúze je založeno na sférické kompresi dutého sférického terčičku. Přitom je vnější vrstva terčičku odpařena zářením (ať už laserovým, nebo tepelným rentgenovým) a v důsledku zákona akce a reakce je neodpařená část terčičku urychlena směrem

do středu. Kolem středu terčičku vzniká oblast stlačeného paliva s vysokou hustotou. Relativní vyhoření DT paliva (směs deuteria a tritia) je určeno parametrem ρR , tedy součinem hustoty ρ a poloměru R sférické oblasti obsahující palivo zahřáté na zápalnou teplotu větší než 5 keV (60 milionů kelvinů). Parametr ρR je obdobou Lawsonova parametru $n\tau_E$ (součin iontové koncentrace n a doby energetického udržení τ_E), užívaného v termojaderné fúzi s magnetickým udržením. Při konstantním parametru ρR a dané hmotnosti paliva je energie nutná k ohřevu paliva na zápalnou teplotu úměrná $1/\rho^2$. Proto je třeba DT palivo stlačit na vysokou hustotu několik stovek g/cm^3 . energii dodanou palivu je ale možné snížit klasickou metodou jiskrového zapálení inerciální fúze. Na zapálení fúze totiž stačí dosažení zápalné teploty jen v menší omezené oblasti (*hot spot* – horká skvrna), ze které se šíří vlna termojaderného hoření do paliva s nižší teplotou. K vytvoření této horké oblasti dochází ve chvíli zastavení pohybu (stagnace) urychlené části sférického terčičku ke středu, kdy je také dosaženo maximálního stlačení DT paliva. V této chvíli je materiál okolo středu terčičku v izobarickém stavu, kdy je horké palivo o relativně malé hustotě několik desítek g/cm^3 ve středu obklopeno chladnějším palivem o vysoké hustotě 300–400 g/cm^3 . Při syntéze



Obr. 1
Řez budovou NIF (celková délka od nízkého zeleného vstupu vpravo až po konec budovy montáže optiky vlevo je asi 220 m, maximální šířka je cca 120 m, maximální výška 30 m).



Obr. 2 (a) Fotografie dutinky (hohlraum) na držácích, které zároveň dutinku chladí na 17,3 K. (b) Dutinka s dutým sférickým terčíkem a schématem ozáření dutinky laserovými svazky, které jsou rozmístěny ve 4 kuželech s úhly dopadu 23,5°, 30°, 44,5° a 50°. Dutinka je plněna plynným héliem, terčík je v dutince fixován stanem (dvojitou membránou). DT palivo je do duté sféry plněno křemíkovou trubičkou. Výška dutinky je typicky v rozmezí 9–12 mm, průměr 5–7 mm, průměr vstupního otvoru 3–4 mm. (c) Schéma vrstev sférického terčíku. Na vnější straně je ablátor, jehož vnitřní vrstva (značená červeně) je dopována těžkým prvkem, pod ablatorem je vrstva DT ledu a uvnitř je nasycená pára DT o hustotě asi 0,3 mg/cm³. Poloměr sférického slupkového terčíku je typicky 0,9–1,2 mm, tloušťka ablatoru 70–200 μm, z toho je 20–40 μm vnitřní dopovaná vrstva, tloušťka DT ledu je 50–80 μm.

jader D a T vzniká neutron a α částice (jádro ⁴He). Celková uvolněná energie 17,6 MeV se mezi tyto částice dělí nepřímo úměrně hmotnosti (80% neutron, 20% α částice). Zatímco neutrony vznikající při fúzní reakci z terčíku volně unikají, nabitě α částice jsou brzděny v hustém DT palivu, zahřívají ho na zápalnou teplotu a jejich prostřednictvím se ze středu šíří vlna termojaderného hoření. Podrobněji je fyzika inerciální fúze popsána v článku [3].

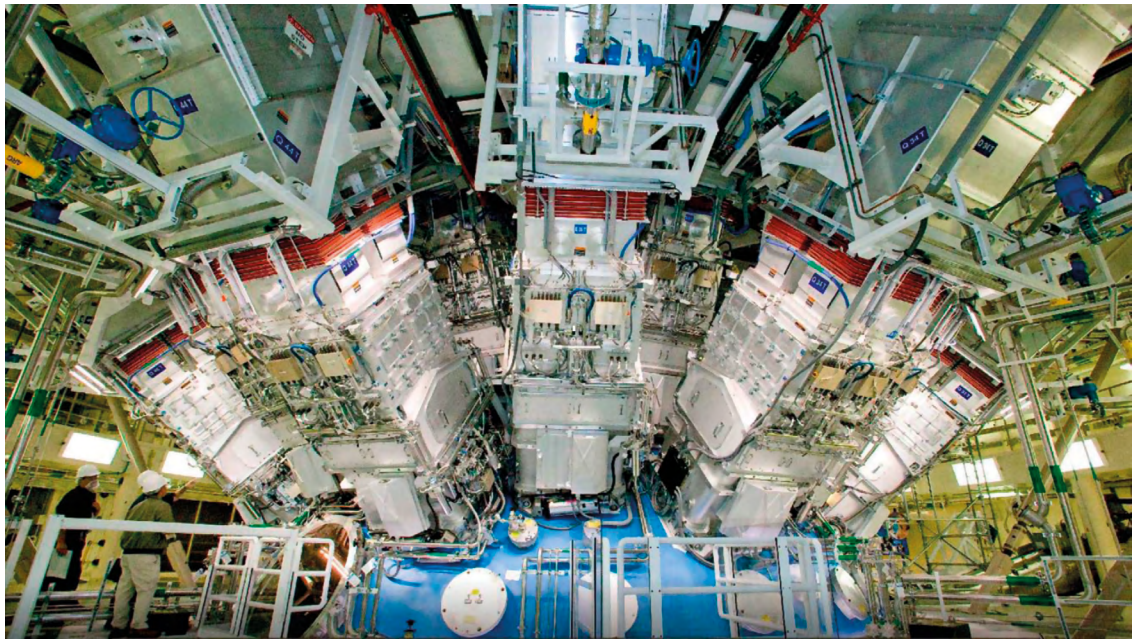
Experimenty na laseru NIF používají schéma nepřímé fúze (viz obr. 2), kdy je laserové záření soustředěno na vnitřní povrch dutinky zvané *hohlraum*. Na jejich stěnách se energie optického koherentního záření laseru mění v tepelné měkké rentgenové záření. Toto rentgenové záření dopadá na uprostřed dutinky umístěný dutý sférický terčík naplněný kryogenním DT palivem (ledem ze směsi deuteria a tritia v poměru 1 : 1, led má hustotu 0,224 g/cm³) a způsobuje jeho ablací, jejímž důsledkem je imploze a komprese paliva. Schéma nepřímé fúze nabízí lepší stabilitu než přímá fúze, kdy ablací (odpaření vnější vrstvy) a kompresi terčíku způsobuje samotné laserové záření. Na druhé straně má však malou účinnost vzhledem k velkým energetickým ztrátám, ke kterým dochází při konverzi energie laserového záření na tepelné rentgenové záření. Nepřímá fúze je určena především pro vojenský výzkum, protože její schéma je do značné míry podobné principu fungování vodíkové bomby (podrobnosti lze najít v článku [3]). Laserová laboratoř NIF je financována z programu údržby amerických jaderných zbraní.

Laser NIF byl uveden do plného provozu v roce 2009, kdy byly spuštěny poslední ze 192 laserových svazků sdružených do 48 čtveřic zvaných *quad*. Záření neodymového laseru o vlnové délce 1 054 nm je konvertováno v nelineárních krystalech na vhodnější třetí harmonickou frekvenci o vlnové délce 351 nm

a fokusováno do sférické interakční komory o průměru 10 m (viz obr. 3). Polovina čtveřice je fokusována do interakční komory shora a druhá polovina zdola s tím, že čtveřice jsou seskupeny do čtyř kuželů, které dopadají pod úhly 23,5°, 30°, 44,5° a 50° vzhledem k ose dutinky (viz obr. 2b). Už v roce 2009 byla dosažena projektovaná energie 1,8 MJ v laserovém impulsu, který je možné přesně časově tvarovat podle požadavku experimentu. Celková délka impulsu je typicky do 20 ns, ale obvykle udávaná délka na polovině maxima je jen několik ns. Laser od samého začátku fungoval dobře a spolehlivě.

V roce 2009 byla spuštěna experimentální kampaň NIC (*National Ignition Campaign*), která měla za cíl demonstrovat breakeven a energetický zisk až 10 (poměr uvolněné energie fúze k energii dopadajícího laserového záření) do roku 2012. Zároveň v USA začala příprava projektu LIFE [4], který měl za cíl navrhnout a do roku 2035 vybudovat demonstrační elektrárnu založenou na inerciální fúzi. V Evropě byl v této době v rámci programu strategických výzkumných infrastruktur připraven projekt HiPER [5], který měl zkoumat možnost výroby energie pomocí inerciální fúze při přímém ozařování terčíku s palivem.

Experimentální kampaň NIC byla připravena pomocí rozsáhlých počítačových simulací, prováděných po několik let. Tyto simulace byly založeny na fyzikálních modelech, které byly ověřeny v experimentech na starším laseru NOVA, jehož energie byla ale 30krát menší. Zvolený přístup zahrnoval 4 rázové vlny a tvar laserového impulsu, který je znázorněn na obr. 4. První slabá rázová vlna byla vytvořena malým předpulslem (zvaným *foot*) tak, aby se palivo udrželo na nízké adiabatě, kdy tlak byl jen 1,45krát vyšší než Fermiho tlak degenerovaného plynu při dané hustotě. Po předpulsu se výkon laseru snížil na minimum a asi po 10 ns přišel

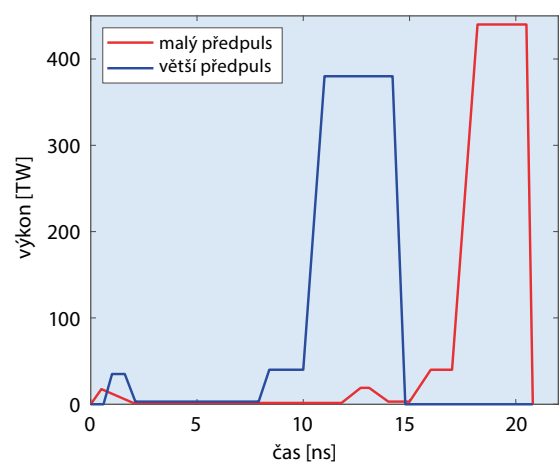


Obr. 3 Pohled na interakční komoru z rovniku – vlevo vzadu je manipulátor pro zavádění terče do komory a jsou zde porty pro diagnostiku. Nahoře jsou koncové optické sestavy, ve kterých jsou velké KDP krystaly konvertující laserové záření do třetí harmonické a je v nich také fokusační optika.

další, o něco větší předpuls a hned po něm se výkon laseru zvýšil ve dvou krocích na maximální asi 450 TW. Dutinka byla vyrobena ze zlata a byla plněna héliem o hustotě asi 1 mg/cm^3 , vstupní otvory pro laserové záření byly překryty slabou blánou. Uvnitř dutinky byl velmi tenkou dvojitou blánou zvanou „stan“ upevněn vlastní dutý sférický terčik s vnější vrstvou (ablátorem) z plastu, na vnitřní straně slabě dopovaným křemíkem snižujícím pronikání rentgenového záření do DT paliva. DT palivo bylo plněno do duté sféry křemíkovou trubičkou o průměru $10 \mu\text{m}$ a po zmrazení na $17,3 \text{ K}$ se na vnitřní straně vnější vrstvy (ablátoru) vytvoří vrstva DT ledu, uvnitř které jsou nasycené páry DT. Možnost jemné změny vlnové délky ve vnějším kuželi laserových svazků dovolila měnit velikost nelineárního přenosu energie mezi jednotlivými svazky, překrývajícími se ve vstupních otvorech. Tak bylo možno měnit intenzitu rentgenového záření ve středu dutinky a bylo dosaženo kulového tvaru horké skvrny. Při kompresi však docházelo k velkým krátkovlnným odchylkám od sférického tvaru v důsledku rozvoje Rayleighovy–Taylorovy nestability, kde počáteční porucha byla do značné míry způsobena stanem. Při kompresi došlo ke značnému promíchání paliva horké skvrny s okolním hustým chladným palivem a materiálem ablátoru, a proto v horké skvrně nebylo dosaženo zápalné teploty jaderné syntézy. Neutronový výtěžek v tomto schématu dosáhl maximálně 9×10^{14} [6], což odpovídá fúznímu výtěžku $2,5 \text{ kJ}$, téměř tisíckrát menšímu, než je energie dodávaná laserem. Navíc se výsledky experimentů vůbec neshodovaly s numerickými simulacemi, a tak nebylo jasné, jakým způsobem lze výsledky experimentů zlepšit.

První částečný úspěch přinesla změna strategie v roce 2013. Byla zvýšena energie prvního malého předpulsu, částečně byl zvýšen i výkon laseru po prvním předpulsu a počet rázových vln zredukován na tři. Srovnání tvaru laserového impulsu v kampani s větším předpulsu („high foot“) s původním tvarem impulsu (*low foot*) je prezentováno na obr. 4. Větší předpuls zvýšil radiační teplotu uvnitř dutinky z přibližně 60 eV na cca 100 eV , což zvětšilo počáteční rychlost ablace

vlastního terčiku a charakteristickou délku profilu hustoty na ablační ploše. Obě tyto změny snížily rychlost růstu ablační Rayleighovy–Taylorovy nestability, která je hlavní překážkou symetrické komprese terčiku. Nevýhodou tohoto přístupu je snížení stagnačního tlaku a maximální komprese DT paliva. Nicméně se neutronový výtěžek zvýšil téměř o řád na 6×10^{15} , což odpovídá fúznímu výtěžku 17 kJ , který tak byl asi dvakrát vyšší, než byla energie dodaná DT palivu [7], ale stále šlo jen o zhruba 1 % energie laserového záření. Poprvé ovšem byla pozorována vlna termonukleárního hoření, kdy a částice vzniklé v horké skvrně ohřály malou část stlačeného paliva na zápalnou teplotu a v důsledku této vlny byla celková fúzní energie asi dvojnásobkem fúzní energie uvolněné v horké skvrně. Velkým úspě-



Obr. 4 Profil výkonu laseru v experimentech s malým předpulsu a s větším předpulsu, kdy je předpuls (foot) asi dvakrát větší než u prvního malého předpulsu. V době poklesu výkonu na minimum je také výkon laseru asi dvakrát větší, aby udržoval vyšší radiační teplotu vytvořenou větším předpulsu, druhý předpuls je vynechán a zvýšení na maximum pak v obou případech probíhá ve dvou krocích. Maximální výkon u většního předpulsu je většinou o něco menší a trvání maximálního výkonu o trochu delší. Celková délka impulsu je asi o 7 ns kratší.

chem a povzbuzením pro optimalizaci experimentu byl fakt, že experimentální měření poměrně dobře souhlasila s numerickými simulacemi, které tak bylo možno využít k přípravě dalších experimentů.

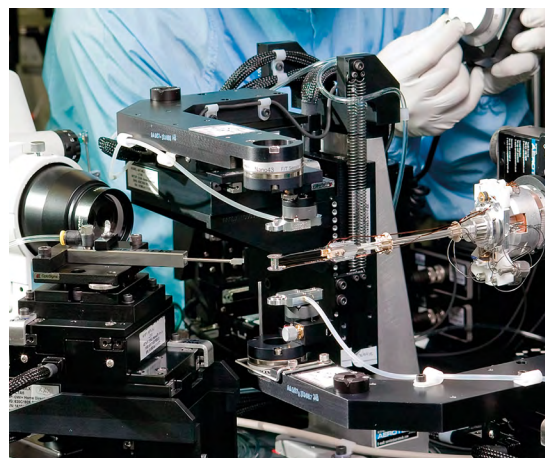
Další zvýšení neutronového výtěžku bylo dosaženo v roce 2017. Vnější vrstvu sférického terčíku o vnitřním poloměru 910 μm tvořil ablátor o tloušťce 70 μm z mikrokrystického diamantu (HDC – *high density carbon*), který má větší tuhost a brání vzniku počátečních deformací, což vede ke stabilnější implozi a kompresi. Vnitřních 20 μm ablátoru bylo dopováno malým množstvím wolframu k odstínění rentgenového záření s kratší vlnovou délkou, aby se zabránilo předohřevu DT paliva a dekompresi v oblasti hranice mezi ablátorem a DT ledem, což dále zlepšuje stabilitu imploze. Další zlepšení stability bylo dosaženo zmenšením průměru trubičky pro plnění terčíku DT palivem na 5 μm . Sférický terčík byl umístěn v dutince z ochuzeného uranu o vnějších rozměrech 6,2 \times 11,3 mm. Oproti předchozím experimentům byla hustota He plynu v dutince snížena na 0,3 mg/cm³. Laserový impuls o celkové délce 7,5 ns a špičkovém výkonu 450 TW měl celkovou energii 1,5 MJ, resp. 1,7 MJ. Uvolněná fúzní energie 48 kJ, resp. 54 kJ, což odpovídá výtěžku 1,7, resp. $1,9 \times 10^{16}$ neutronů, byla větší než dvojnásobek maximální energie 22 kJ implodující vrstvy (DT ledu a neodpařené části ablátoru) [2]. Iontová teplota horké skvrny 4,5 keV nebyla dostatečná, aby ohřev a částicemi kompenzoval ztráty způsobené brzdícím zářením a elektronovou tepelnou vodivostí, a proto teplota horké skvrny začala klesat ihned po stagnaci. K vyrovnání ohřevu a ztrát by pro dosažení $\rho R = 0,3 \text{ g/cm}^2$ horké skvrny došlo až při teplotě 4,8 keV.

V roce 2018 byly v rámci experimentu HYBRID-B použity větší diamantové terčíky o vnitřních poloměrech 1050 mm a 1100 mm. Tento experiment původně počítal se zvýšením energie laserového impulsu až na 2,1 MJ. Při testech se ale neočekávaně ukázalo, že takové překročení projektované energie vede k závažným poruchám optiky laseru NIF, a proto uvažovaná energie nebyla nikdy k dispozici pro experimenty. Pokusy zvýšit rychlost imploze při nižších energiích laseru zmenšením vstupních otvorů pro laserové záření vedly ke zploštělým implozím vzhledem k nedostatečnému ablačnímu tlaku na rovníku [8]. Stabilita implozí byla též ovlivněna špatnou kvalitou velkých diamantových terčíků.

Problém zploštělé imploze řeší nový experiment HYBRID-E ovlivněním přenosu energie mezi laserovými svazky ve vstupních otvorech dutinky pomocí jemné změny vlnové délky některých laserových svazků. Bylo to poprvé, kdy byl tento systém použit pro dutinky plněné plynem o nižší hustotě. Ukázalo se, že při nízké hustotě plynu v dutince je řízení přenosu energie mezi laserovými svazky daleko citlivější a k přenosu energie z vnějších na vnitřní kužely laserových svazků dostatečnému pro dosažení sférickosti imploze stačí menší rozdíl vlnových délek 0,1–0,2 nm. K návrhu experimentů byla také použita rozsáhlá databáze nashromážděná při předchozích experimentálních kampaních [9]. Experimenty používaly nepatrně větší dutinky o průměru 6,4 mm a výšce 11,24 mm z ochuzeného uranu zevnitř potažené zlatem. Relativně více byl zvětšen na 1050–1100 μm vnitřní poloměr diamantových terčíků o celkové tloušťce 80 μm opět s vnitřní 20 μm vrstvou slabě dopovanou wolframem, tloušťka vrstvy DT ledu byla 55–65 μm . Průměr trubičky k plnění DT do terčíku

byl dále zmenšen na 2 μm . K omezení energetických ztrát byl zmenšen průměr vstupních otvorů pro laserové svazky ze 4 mm na 3,64 mm, to si ovšem vyžádalo i modifikaci směřování laserových svazků do dutinky. Díky uvedené optimalizaci se podařilo zvýšit energii horké skvrny až na více než 10 kJ [10]. V experimentu s terčíkem o vnitřním poloměru 1050 μm a vrstvou DT ledu o tloušťce 65 μm bylo zredukováno mísení materiálu ablátoru do horké skvrny a při dosažení symetrické imploze byla získána rekordní fúzní energie 170 kJ. V tomto rekordním výstřelu byl také zmenšen čas mezi koncem laserového impulsu a okamžikem stagnace (*coast time*). Jedním z problémů tohoto experimentu byly mikroskopické vady diamantové vrstvy, které do určité míry zhoršovaly stabilitu imploze. Podrobný popis parametrů tohoto rekordního výstřelu ale dosud nebyl publikován [11]. Nejmenší mix materiálu ablátoru a nejvyšší poměr fúzního výtěžku k výsledku numerické simulace byl však dosažen ve výstřelu s nižší energií laseru 1,7 MJ a ještě tlustším DT ledem (75 μm), přestože horká skvrna byla protáhlá ve směru pólů. Analýza tohoto výstřelu poskytla informaci, že při přechodu na plnou energii 1,9 MJ laseru by bylo možno zkrátit *coast time* a dosáhnout rekordního fúzního výtěžku.

Podstatné zvýšení rekordního výtěžku na 1,3 MJ bylo dosaženo ve výstřelu provedeném 8. srpna 2021. Oproti předchozímu experimentu došlo jen k malým změnám. Byl dále zmenšen průměr vstupních otvorů pro laserové svazky na 3,15 mm. Byl snížen maximální výkon laseru z 500 TW na asi 440 TW a ušetřená energie byla použita k prodloužení laserového impulsu – tím byl zkrácen čas mezi koncem laserového impulsu a stagnací o asi 350 ps na méně než 1 ns. Optimalizovaný laserový impuls o energii 1,9 MJ byl precizně tvarován v čase, prostoru a frekvenci. Použitý diamantový terčík o vnitřním poloměru 1050 μm byl dosud nejkvalitnější jak z hlediska povrchových a vnitřních vad, tak i z hlediska nečistot. Relativně malé zvýšení teploty a energie horké skvrny proti předchozímu rekordnímu experimentu vedlo k zásadní změně časového průběhu teploty v horké skvrně. Ohřev a částicemi převýšil energetické ztráty a teplota horké skvrny na začátku expanze rychle stoupla až na více než 9 keV, což podstatně urychlilo fúzní reakci. Vlna termojaderného hoření se šířila do stlačeného paliva, celkem vyhořely asi 2% DT paliva. Oblast zdroje intenzivního rentgenového záření a neutronů byla širší než v předchozích experimentech. Ohřev horké skvr-



Obr.5 Sestavení malého komplexního terče pro inerciální fúzi na přesném robotickém manipulátoru, vyvinutém vědci a technikou v LLNL. Kredit: NIF LLNL

» Laserová laboratoř NIF je financována z programu údržby amerických jaderných zbraní. «

» Poprvé byla pozorována tlaková vlna, vzniklá v důsledku miniaturní termojaderné exploze. «

ny vedl k urychlení expanze a tím se i doba generace $4,8 \times 10^{17}$ neutronů zkrátila na asi 90 ps. Fúzní výkon byl 15 PW, celková energie ohřevu a částicemi 250 kJ převýšila sumu ztrát brzdícím zářením 60 kJ a ztrát práci tlaku 20 kJ. Inerciální fúze byla zapálena, termonukleární hoření se po výše uvedené dobu samostatně udržovalo. Poprvé byla pozorována tlaková vlna, vzniklá v důsledku miniaturní termojaderné exploze.

V dalších experimentech bude třeba zjistit, s jakou spolehlivostí bude možno zopakovat nebo i případně zvýšit dosažený rekordní fúzní výtěžek. Experimenty na laseru NIF se v současné době pohybují v okolí prahu zapálení inerciální fúze a výtěžek se tak může podstatně měnit při nepatrné změně parametrů experimentu. Zdá se však, že stále ještě existuje prostor pro další optimalizaci, což snad povede k dalšímu zvýšení fúzního výtěžku a opakovatelnosti experimentů. Počítačové simulace například naznačují, že by ještě další malé zkrácení času mezi koncem laserového impulsu a stagnací by mohlo zvýšit fúzní výtěžek. Další experiment měl být proveden v průběhu podzimu, omezením pro opakování experimentu je doba přípravy dutého sférického terčiku z mikrokrytalického diamantu, která je asi 6 měsíců [12].

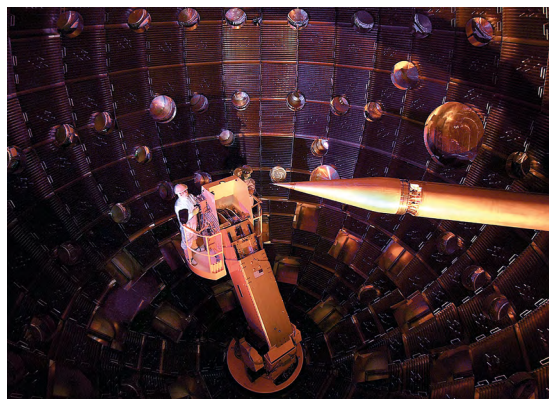
Zapálení inerciální fúze otvírá možnost výzkumu principiálně nového systému – plazmatu s termonukleárním hořením a hustotou srovnatelnou s hustotou ve středu hvězd. Vojenští výzkumníci budou moci získat jinak nedostupná data, která jim pomohou verifikovat jejich počítačové simulace jaderných zbraní [1]. To zmenší nejistoty při údržbě stávajícího jaderného arzenálu i při certifikaci nových pokročilých zbraňových systémů. Získaná data bude možné využít i pro výzkum možnosti energetického využití inerciální fúze.

K výrobě energie pomocí inerciální fúze je stále ještě daleko. Pro energetické využití má lepší předpoklady přímá fúze, kdy laserové záření dopadá přímo na dutý sférický terčik. Lze tak dosáhnout podstatně vyšší účinnosti přeměny laserové energie na kinetickou energii implodující vrstvy. V pokročilých systémech se počítá s oddělením fáze komprese paliva nanosekundovým laserovým impulsem od rychlého ohřevu paliva na zápalnou teplotu krátkým pikosekundovým impulsem, což může několikrát snížit potřebnou celkovou energii laseru. Rychlost imploze může být v takovém systému menší, což zlepšuje stabilitu komprese. Laserové záření neproniká do hustého paliva, ale rychlé zapálení (*fast ignition*) fúze může být uskutečněno pomocí energetických elektronů nebo iontů, které vznikají interakcí

záření o intenzitě větší než 10^{18} W/cm² s plazmovou korunou. Nevýhodou je potřeba dalšího laseru, protože potřebné intenzity laserového záření nelze dosáhnout tvarováním impulsu nanosekundového laseru. Tento problém odstraňuje metoda zapálení fúze rázovou vlnou (*shock ignition*), kdy je na konci laserového impulsu vygenerována dodatečná silná kumulativní sférická rázová vlna, která ohřeje předem stlačené palivo. Laserový impuls pro generaci rázové vlny musí mít intenzitu řádově 10^{16} W/cm² a délku kolem 100 ps. Takový impuls lze získat tvarováním impulsu nanosekundového laseru. Proto byl evropský projekt HiPER [5] založen na metodě zapálení fúze rázovou vlnou.

Laser NIF může vystřelit maximálně třikrát za den a jeho účinnost je menší než 1 %. Pro výrobu energie pomocí inerciální fúze bude zapotřebí zvýšit účinnost laseru a provádět mikroexploze několikrát za sekundu. Základem projektu HiPER byl proto pevnolátkový diodově čerpaný laser s opakovací frekvencí 5 Hz a účinností větší než 10 %. Jinou variantou pulsního zdroje energie pro inerciální fúzi jsou krátkovlnné excimerové lasery (KrF s vlnovou délkou $\lambda = 248$ nm a ArF s $\lambda = 193$ nm). Z hlediska účinnosti, opakovací frekvence i ceny se dnes pro energetické využití inerciální fúze jeví jako nejlepší zdroj pulsní energie urychlovač těžkých iontů. Na světě však neexistuje žádné větší zařízení, které by dovolovalo experimentálně prověřit existující teoretické modely inerciální fúze iniciované svazky těžkých iontů. Na řešení čeká i problém dodávání kryogenních terčiků s dostatečnou opakovací frekvencí a s přesností řádu desítek mikronů do středu interakční komory o průměru 10 m. Ve srovnání s fúzí s magnetickým udržením bude interakční komora technologicky jednodušší a levnější, takže sama konstrukce komory se neměla představovat problémem. Možným problémem se ovšem jeví masová výroba kvalitních levných terčiků, jichž bude elektrárna založená na inerciální fúzi potřebovat několik set tisíc denně.

V poslední době bylo dosaženo značného pokroku ve studiu fyziky pro přímou inerciální fúzi. Neexistuje však zařízení, kde by ji bylo možno zapálit. Největšími zařízeními pro výzkum přímé fúze jsou 30kJ laser Omega na University of Rochester v USA a 5kJ laser Gekko XII v japonské Ósace. Laser NIF i laser LMJ ve Francii jsou vojenské laboratoře s omezeným akademickým přístupem, konfigurované pro studium nepřímé fúze, a jejich úprava pro zapálení přímé fúze by byla časově i finančně velmi nákladná. I další vícesvazkové lasery, jako Orion ve Velké Británii nebo SG-II-UP v Číně, se nacházejí ve vojenských laboratořích s omezeným akademickým přístupem. V Evropě nikdy neexistoval žádný laser v nevojenské akademické laboratoři, který by měl energii větší než 1 kJ a byl schopen implozních experimentů. V současné době je v Evropě dostatečný lidský i materiální potenciál pro výzkum inerciální fúze, ale evropské aktivity v této oblasti v posledních 10 letech rychle klesají a zájem komunity se přesouvá do fundamentálnějších blízkých oblastí fyziky vysokých hustot energie, jako jsou laboratorní astrofyzika, laserové urychlovače částic nebo nelineární kvantová elektrodynamika v superintenzivních elektromagnetických polích. To je v příkrém rozporu s uznávaným faktem, že bezpečná, čistá a široce dostupná fúzní energie je velkou nadějí pro udržitelný rozvoj lidstva. Soustředění evropských investic do magnetického udržení plazmatu jako jediné cesty k fúzi se nezdá



Obr. 6 Vnitřek terčové komory o průměru 10 m na NIF. Vlevo servisní modul s techniky, vpravo manipulátor, který zavádí terč do přesné polohy. Kredit: NIF LLNL



Obr. 7 Pohled na budovu NIF. Nejvyšší část skrývá uprostřed interakční komoru (viz obr. 1). Kredit: NIF LLNL

být moudré. Hrozí, že se během několika let přesune veškerý akademický výzkum inerciální fúze mimo Evropu do USA a Číny, které významně podporují vědecký výzkum v této oblasti, a evropské know-how bude ztraceno. Teoretický, experimentální a inženýrský výzkum v oblasti inerciální fúze určené pro výrobu energie musí být podpořen výstavbou moderní evropské laserové laboratoře dedikované pro přímou inerciální fúzi, která bude schopna testovat inovativní fyzikální a technologické návrhy a technická řešení. Takové zařízení s energií na úrovni stovek kJ založené na nejmodernější technologii by mohlo být vybudováno během následujících 10 let a představovalo by velký krok ke komercializaci fúzní energie. To by postavilo Evropskou unii na přední místo ve výzkumu energie z termojaderné fúze [13]. Současný průlom v zapálení inerciální fúze podnítil evropskou komunitu k úsilí oživit program HIPER v inovované podobě HiPER-Plus [14, 15].

V Česku má výzkum v oblasti fyziky inerciální fúze dlouholetou tradici. V 80. a 90. letech spočíval v teoretických a simulačních studiích a experimentech malého měřítka. Přelomem bylo otevření laboratoře laseru PALS v roce 2000. Ačkoliv nebyl PALS primárně určen k výzkumu inerciální fúze, stal se v Evropě asi nejčastěji užívanou infrastrukturou pro studium dílčích problémů inerciální fúze (např. interakce záření o intenzitách 10^{15} – 10^{16} W/cm² vhodných pro zapálení fúze rázovou vlnou s rozsáhlou plazmovou korunou nebo interakce laserového záření s porézními materiály o nízké hustotě). Nová evropská infrastruktura ELI-Beamlines, uváděná v současné době do provozu v Dolních Břežanech, obsahuje také laserový modul L4n, který může generovat nanosekundové impulsy s energií až 1,5 kJ a opakovací frekvencí 1 minuta. Takový laserový modul by se mohl v budoucnu stát základem mnohasvazkového laseru o energii několika set kJ, dedikovaného pro výzkum přímé inerciální fúze [13]. Ač laboratoř ELI-Beamlines není primárně určena pro výzkum fúze, není pochyb o tom, že se také zde otevrou nové možnosti pro experimentální studium fyziky relevantní pro inerciální fúzi. V laboratoři HiLASE jsou vyvíjeny diodově čerpané impulsní pevnolátkové lasery s vysokým středním výkonem, které by v budoucnosti mohly nalézt uplatnění i jako zdroj pulsní energie pro energetické využití inerciální fúze. Specialisty, kteří se dobře uplatňují i ve výzkumu inerciální fúze, v ČR vychovává Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze

v magisterských oborech Fyzikální elektronika (specializace Laserová fyzika a technika a Počítačová fyzika) a Fyzika plazmatu a termojaderné fúze.

Literatura

- [1] NIF Experiment Puts Researchers at Threshold of Fusion Ignition, LLNL 18.8.2021. Dostupné z WWW: <https://lasers.llnl.gov/news/nif-experiment-puts-researchers-threshold-fusion-ignition>
- [2] S. Le Pape a kol.: Fusion energy output greater than the kinetic energy of an imploding shell at the National Ignition Facility. *Phys. Rev. Lett.* **120**, 245003 (2018).
- [3] K. Rohlena: Inerciální fúze. *Čs. čas. fyz.* **60**, 346 (2010).
- [4] Laser Inertial Fusion Energy. Dostupné z WWW: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_Inertial_Fusion_Energy
- [5] HIPER (European High Power Laser Energy Research Facility), HiPER Preparatory Phase Final Report, Dec 1, 2013. Dostupné z WWW: <https://cordis.europa.eu/project/id/211737/reporting>
- [6] M. J. Edwards a kol.: Progress towards ignition on the National Ignition Facility. *Phys. Plasmas* **20**, 070501(2013).
- [7] O. A. Hurricane a kol.: Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion. *Nature* **506**, 343 (2014).
- [8] A. L. Kritcher a kol.: Symmetric fielding of the largest diamond capsule implosions on the NIF. *Phys. Plasmas* **27**, 092709 (2020).
- [9] D. Callahan a kol.: Exploring the limits of case-to-capsule ratio, pulse length, and picket energy for symmetric hohlraum drive on the National Ignition Facility Laser. *Phys. Plasmas* **25**, 056305 (2018).
- [10] A. L. Kritcher a kol.: Achieving record hot spot energies with large HDC implosions on NIF in HYBRID-E. *Phys. Plasmas* **28**, 072706 (2021).
- [11] A. B. Zylstra a kol.: Burning plasma achieved in inertial fusion. *Nature*, **601**, 541–548 (2022).
- [12] D. Kramer: Lawrence Livermore claims a milestone in laser fusion. *Phys. Today* (17. 8. 2021). Dostupné z WWW: <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.6.2.20210817a/full/>
- [13] V. T. Tikhonchuk: Progress and opportunities for inertial fusion energy in Europe. *Phil. Trans. R. Soc. A* **378**, 20200013 (2020).
- [14] S. Atzeni a kol.: An evaluation of sustainability and societal impact of high power laser and fusion technologies: a case for a new european research infrastructure. *High Power Laser Science and Engineering*. **9**, 04000e52 (2021).
- [15] D. Batani a kol.: The continuation of HiPER- HiPER Plus: Proposal for a new “directdrive” laser-fusion programme in the EU, dopis BP&IF sekce EPS. Dostupné z WWW: https://www.cpht.polytechnique.fr/sites/default/files/The_continuation_of_%20HiPERHiPER_Plus.pdf