



# Laser – od kolébky až po ELI

Jan Řídký, Jana Žďárská

Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 21 Praha 8

ELI Beamlines je evropské výzkumné centrum s nejintenzivnějším laserovým systémem na světě. Díky ultrakrátkým laserovým pulzům, trvajícím jen několik femtosekund, a výkonům až 10 PW by mohlo toto badatelské centrum přinést nové techniky a nástroje pro základní výzkum v oblastech lékařského zobrazování, diagnostiky, radioterapie či rentgenové optiky. Při příležitosti 60. výročí objevu laseru jsme se na podrobnosti týkající se vzniku a plánovaného výzkumu v ELI zeptali profesora Jana Řídkého, jenž stál spolu se svými kolegy přímo u jeho zrodu.

**A**no! Byl to právě Max Planck – německý génius, filozof, „nobelista“ a excellentní fyzik. Ten, který stál přímo u kolébky vzniku laseru. Když roku 1900 rozvinul tuto prazákladní myšlenku svým předpokladem, že světlo je tvořeno maličkými částicemi energie – tzv. kvanty, jistě ještě netušil, k jak velkému objevu základní kámen právě položil. Byl to ale zatím jen počátek předlouhé cesty, jež lidstvo postupně dovedla až k moderním a výkonným laserovým systémům. Bylo třeba ještě mnoho a mnoho usilovné práce, aby se tyto ideje a vize podařilo uvést do praxe.

Svůj osobitý díl k tomuto výzkumu přidal i další slavný fyzik Albert Einstein, který postuloval samotnou podstatu laseru, a to tzv. *stimulovanou emisi záření* – jako jev „symetrický“ k absorpci světelného kvanta. Za vysvětlení jiného jevu spojeného s existencí světelných kvant – *fotoelektrický jev* – pak Albert Einstein obdržel i Nobelovu cenu za fyziku (1921).

Po pojmenování kvant energie „fotony“ (1926 americký chemik Gilbert Newton Lewis) následovalo další období intenzivní práce a důkladného výzkumu. V šedesátých letech dvacátého století ke vzniku laseru postupně přispělo hned několik vědců. V roce 1964 tak za vynález maseru a laseru obdrželi Nobelovu cenu Charles Hard Townes, Nikolaj Genadievič Basov a Alexandr Michajlovič Prochorov. Je zajímavé, že tehdy opomenutému Arthuru Leonardu Schawlowovi byl přiznán podíl na návrhu laseru udělením Nobelovy ceny za související výzkum (spektroskopii) až o 28 let později.

Tvrdá badatelská práce se vyplatila a 16. května roku 1960 zkonstruoval a spustil první fungující (rubínový) laser americký fyzik a inženýr Theodore H. Maiman. Současně na spuštění laseru pracovala řada laboratoří, nejen v USA, ale první může být jen jeden a to byl Maiman. O pouhý rok a půl později (1961) byla v Columbia-Presbyterian Hospital na Manhattanu provedena první unikát-

ní operace oka, během níž byl pomocí laseru odstraněn nádor ze sítnice.

A jaká byla situace u nás v Československu? Můžeme hrdě říci, že jsme se za světem příliš neopozdili, protože Československo se stalo po USA a Sovětském svazu třetí zemí, která zkonstruovala svůj vlastní funkční laser. Ten první byl spuštěn 9. dubna 1963 ve Fyzikálním ústavu ČSAV. Jeho tvůrcem byl Karel Pátek, jenž použil jako aktivní prostředí neodymové sklo. Další z vědců, Helena Jelínková z ČVUT v Praze a Jan Blabla z Ústavu radioelektronického ČSAV, poté postavili rubínový laser, který představili veřejnosti v prostorách pražského planetária. A rubínový laser spustil také Dr. Pachman ve Výzkumném ústavu Ministerstva národní obrany v Praze. Další skvělý český vědec Tomislav Šimeček uvedl v Ústavu fyziky pevných látek ČSAV do provozu první polovodičový laser a František Petrák se svým týmem zprovoznil první plynový laser v Ústavu přístrojové techniky ČSAV v Brně.

Je velká škoda, že do nestranného vědeckého bádání zasáhla i politika a od poloviny šedesátých let došlo v Československu na základě intervence Sovětského svazu ve vývoji laserů k útlumu. Teprve v 80. letech mohl další výzkum a vývoj československých laserů (konkrétně laserů jódových) opět pokračovat. Fyzikální ústav ČSAV tehdy získal darem výkonový jódový laserový systém vyvinutý v Lebeděvěvě ústavu v Moskvě. Přestavěl ho, pozměnil jeho koncepci a uvedl v roce 1985 do provozu pod názvem PERUN. Jeho výkonnější verze – laserový systém PERUN II – byla následně spuštěna v roce 1992. V roce 1997 získal Fyzikální ústav AV ČR ještě výkonnější terawattový laser ASTERIX IV z Ústavu fyziky plazmatu Maxe Plancka v Garchingu u Mnichova a v roce 1998 v Praze vznikla společná laserová laboratoř Fyzikálního



ELI Beamlines je evropské výzkumné centrum s nejintenzivnějším laserovým systémem na světě.

Foto: Archiv ELI Beamlines.

ústavu a Ústavu fyziky plazmatu – badatelské centrum PALS (*Prague Asterix Laser System*).

Ovšem tím opravdu zásadním milníkem se pro české lasery stal rok 2011, kdy se podařilo prosadit podporu ambicióznímu projektu ELI Beamlines. Společně s ELI byl podpořen i projekt menšího laserového centra HiLASE – tedy dvě hvězdy českého laserového výzkumu. A protože se jedná o skutečně grandiózní projekt, rádi bychom vám, našim čtenářům, nyní prostřednictvím rozhovoru s profesorem Janem Řídkým přiblížili současný největší laserový systém na světě – tedy ELI, jehož domovem je Česká republika.

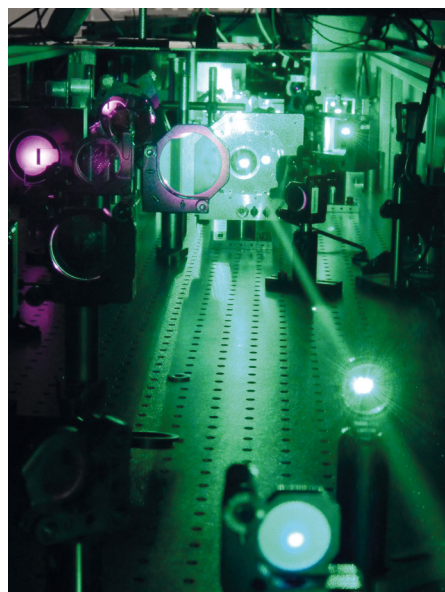
■ *Jana Žďárská: Vážený pane profesore, výstavba ELI (Extreme Light Infrastructure) probíhala právě v době, kdy jste byl ředitelem Fyzikálního ústavu AV ČR. Co pro vás tento projekt znamenal?*

Jan Řídký: Především ohromnou zodpovědnost. Zodpovědnost za chod největšího ústavu AV ČR, a to i v době krize po roce 2008, zodpovědnost za stavbu ELI, zodpovědnost za to, aby tak velká stavba „nepotopila“ samotný ústav.

■ *JŽ: Vratme se ale na začátek, do doby vašeho dětství. Mohl byste našim čtenářům říci, odkud pocházíte a na jaké okamžiky z této doby nejraději vzpomínáte?*

JŘ: Narodil jsem se v Lysé nad Labem. Je tam hezká polabská krajina, mírně zvlněná, borové lesy a slepá labská ramena. Za mého dětství ovšem vypadala příroda o poznání lépe. Koupat se bylo možné celé léto, sinice nebyly. Měli jsme velkou zahradu, kde se dalo něco podnikat celý rok.

■ *JŽ: Co vás tehdy zajímalo? Měl jste už vyhlédnuté či vysněné nějaké povolání?*



Jeden ze čtyř laserů uváděných do provozu v Dolních Břežanech patří do třídy s plánovaným výkonem 10 PW. Foto: archiv ELI Beamlines



Provozní náklady ELI Beamlines jsou pro plný provoz stanoveny na úrovni 25 mil. eur, tj. necelých 700 mil. Kč. Foto: archiv ELI Beamlines

JŘ: Asi jako většina chlapců – nejdříve jsem chtěl být hasičem, pak kosmonautem nebo pilotem.

■ *JŽ: Studoval jste SVVŠ, dříve reálné gymnázium v Nymburce. Toužil jste již v té době po badatelské práci?*

JŘ: Vlastně ani ne. Jen jsem chtěl přijít na kloub tomu, co mě zajímalo. Proto jsem se rozhodl pro jadernou fyziku. Když jsem končil univerzitu, zkoušel jsem zaměstnání v nemocnici na nukleární medicíně a ve Fyzikálním ústavu tehdejší ČSAV. Ale tu nemocnici jsem bral spíše jako pojistku. Místo ve Fyzikálním ústavu bylo ovšem pro experimentátora, ale mě zaujalo natolik, že jsem se rozhodl jej přijmout.

■ *JŽ: Kdo vás tedy k vědě nasměroval nebo dobrým příkladem inspiroval?*

JŘ: Byl to můj profesor chemie na SVVŠ. Učil nás velmi poutavě, jak je uspořádán elektronový obal atomů. Mně pak dále zajímalo, jak je uspořádán atomové jádro, zatímco výuka chemie se vydala k nekonečným variacím organických sloučenin.

■ *JŽ: Proto to u vás vyhrála Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy?*

JŘ: Ano, přesně tak. A od třetího ročníku se specializací teoretická fyzika – jaderná fyzika.

■ *JŽ: A od té doby si vás fyzika získala už napořád. Mohl byste nám říci, co považujete za dosavadní nejdůležitější výsledek vaší práce?*

JŘ: Pokud máte na mysli moji činnost ve fyzice, přispěl jsem ke stavbě a měření na dvou docela zásadních experimentech. Ten první, experiment DELPHI na urychlovači elektronů a pozitronů LEP v CERNu, vedl k velmi přesnému ověření toho, co dnes nazýváme *standardní model elementárních částic*. Podílel jsem se na stavbě, provozu a posléze i modernizaci hadronového kalorimetru. Ten druhý experiment běží dodnes pod jménem Observatoř Pierra Augera a poskytuje jinak nedosažitelná měření

kosmického záření při ultravysokých energiích. Zde jsem se podílel na stavbě a provozu fluorescenčního detektoru a několik let jsem za něj byl zodpovědný. Kromě analýzy dat jsem v obou případech nejen prováděl různé výpočty potřebné pro konstrukci a chod těch detektorů, ale také jsem organizoval jejich stavbu. Tím jsem se dostal i k určité manažerské činnosti. To se mi hodilo v další etapě, kdy jsme ve Fyzikálním ústavu budovali ELI Beamlines v Dolních Břežanech.

■ *JŽ: Ráda bych se zeptala, co vlastně zkratka ELI (Extreme Light Infrastructure) znamená a kdo ji pro tento projekt vybral?*

JŘ: Na počátku tohoto století se vytvořila organizace LASERNET, která sdružovala většinu evropských laboratoří, jež se zabývaly vývojem laserů. V této komunitě probíhaly intenzivní diskuze o budoucí evropské laserové infrastruktuře a v probíhajících debatách se zrodil název ELI jako zkratka pro Extreme Light Infrastructure. Později, když bylo rozhodnuto, že ELI budou tvořit tři infrastruktury, které se budou svými vlastnostmi vzájemně doplňovat, bylo žádoucí je rozlišit. Tu českou, situovanou v Dolních Břežanech, jsme pojmenovali ELI Beamlines, protože její základní charakteristikou je množství laserových svazků s různými vlastnostmi, které poskytují co největší základnu pro široké spektrum použití. Svazky se liší vlnovou délkou, intenzitou, délkou a frekvencí pulzů. Navíc jsme schopni kombinovat působení několika svazků současně nebo v dané časové posloupnosti. Maďarské ELI v Szegedu se specializuje zejména na přírodní děje, které se odehrávají v extrémně krátkých časových intervalech. Tomu odpovídají délky pulzů v trvání několika attosekund, které by měly poskytovat tamní lasery. Maďarská infrastruktura nese jméno ELI ALPS. Rumunská infrastruktura, která se dokončuje v Magurele nedaleko Bukurešti, nese jméno ELI NP a její hlavní náplní bude výzkum v jaderné fyzice prováděný pomocí výkonných laserů a jimi buzených intenzivních svazků gama záření.



Provoz každého ze čtveřice velkých laserových systémů vyžaduje tým čítající přibližně deset specialistů různých profesí. Foto: archiv ELI Beamlines

■ **JŽ:** Proč byla pro stavbu ELI vybrána právě Česká republika?

JŘ: Byli jsme připraveni. V roce 1998 proběhlo úspěšně přestěhování velkého laseru ASTERIX z Německa do Prahy. Tento laser, nově nazvaný PALS (*Prague Asterix Laser System*), naši fyzici nejen zprovoznili, ale také na něm provedli významné inovace a uskutečnili řadu zajímavých experimentů. Tak bylo všem zřejmé, že máme kvalifikované odborníky a laserovou domácí komunitu. V neposlední řadě pak vláda ČR byla ochotna tak velký projekt financovat. V letech 2009–2010, kdy se o umístění rozhodovalo v mezinárodní laserové komunitě, jsme měli podporu řady zemí, které měly o novou mezinárodní infrastrukturu velký zájem, ale z nejrůznějších důvodů by jejich laserová komunita doma nezískala dostatečnou finanční podporu.

■ **JŽ:** Jedná se skutečně o největší laser na světě?

JŘ: Z laserů se postupně stala velmi užitečná zařízení s velkým okruhem možného využití a tomu odpovídá i variabilita jejich parametrů, které se ladí podle účelu tohoto laserového zařízení. Takže je to trochu jako když se na otázku „Kdo je největší atlet na světě?“ musíte tazatele zeptat, kterou disciplínu má na mysli. Ale domnívám se, že běžně má veřejnost pod „velikostí“ laseru na mysli špičkový výkon laseru. V tomto smyslu jeden ze čtyř laserů uváděných do provozu v Dolních Břežanech skutečně patří do třídy s plánovaným výkonem 10 PW. Takových se momentálně projektuje nebo staví po světě méně než deset. Žádný z nich se ještě k hranici 10 PW nedostal a samozřejmě bychom rádi této mety dosáhli jako první.

■ **JŽ:** Kdo a jakým způsobem tuto náročnou stavbu financoval?

JŘ: Stavba a vývoj technologií byly financovány z operačních programů OP VaVpI (Výzkum a vývoj pro inovace) v letech 2011 až 2015 a z OP VVV (Výzkum, vývoj, vzdělávání) v letech 2016 až 2018. V rámci OP VaVpI tehdy hradila Evropská unie 85 % a Česká republika 15 % nákladů. AV ČR hradila tzv. neuznatelné náklady. V případě OP VVV hradila EU opět 85 % nákladů, ČR 10 % a AV ČR 5 % spoluúčast a neuznatelné náklady.

■ **JŽ:** Je nějak stanoveno, kdo může navrhovat výzkumné projekty pro ELI a které státy mají k laserům v ELI přístup?

JŘ: ELI se již brzy stane, jak doufáme, organizací označovanou jako ERIC. Tato zkratka znamená *European Research Infrastructure Consortium*. Konsorcium je zřizováno podle unijního práva a v praxi to znamená, že státy sdružené v takové organizaci financují a rozhodují o provozu nějaké významné výzkumné infrastruktury. Podmínkou založení je účast nejméně tří členů EU, ale dalšími členy mohou být i státy mimo Unii. To je z pohledu organizační struktury. Pak je tu ještě hledisko vědecké a z tohoto hlediska může navrhnout experiment na ELI kterýkoli vědec z celého světa. O tom, zda jeho projekt bude uskutečněn, rozhoduje pouze vědecká kvalita návrhu. Děje se to v kampaních – výzvách –, kdy ELI vyzve světovou komunitu vědců k podávání návrhů na experimenty v určitých oborech. Ty pak posuzuje skupina mezinárodně uznávaných odborníků. Již vloni jsme vyhlásili tzv. nultou výzvu, abychom naladili celý systém. V rámci ní jsme například provedli měření navržená vědcem z Nového Zélandu.

■ **JŽ:** Mohl byste našim čtenářům přiblížit, jaké jsou provozní náklady laserových systémů ELI?

JŘ: Provozní náklady ELI Beamlines jsou pro plný provoz stanoveny na úrovni 25 mil. eur ročně, tj. necelých 700 mil. Kč. Polovinu nákladů tvoří výdaje na platy zaměstnanců, další náklady jsou rozděleny mezi energii, údržbu technologií, materiál apod.

■ **JŽ:** Kolik pracovníků v současné době lasery obhospodařuje a jak rozsáhlá a náročná je to činnost?

JŘ: Provoz každého ze čtveřice velkých laserových systémů vyžaduje tým čítající přibližně deset specialistů různých profesí. Další se zabývají vývojem laserových technologií. Celkově má nyní centrum 310 zaměstnanců. V tomto počtu jsou zahrnuti zejména skupiny pracovníků pro obsluhu samotných laserů a interní experimentální týmy, ale také specialisté, kteří se starají o čisté prostředí v laserových halách, klimatizaci, chlazení, bezpečnost provozu, počítačové zabezpečení, logistiku provozu, design mechanických částí, jejich výrobu, nákup, elektrické rozvody, rozvody sítí a jejich diagnostiku – je toho skutečně mnoho. Velkým oříškem je toto vše manažersky skloubit. V téhle souvislosti musím zmínit Ing. Hvězdu, který toto vše zvládl už během výstavby centra a zvládá to i nyní při přechodu na plný provoz.

■ **JŽ:** Kolik laserů již v ELI funguje a s kolika lasery se počítá pro jeho plný provoz?

JŘ: Fungují všechny čtyři plánované lasery. Každý v trochu jiném režimu, ale postupně jsou uváděny do provozu všechny. Nejdále jsou lasery L1 a L3. Laser L1-ALLEGRA, který byl plně vyvíjen a stavěn ve Fyzikálním ústavu, již poskytuje svazky pro řadu fyzikálních aparatur, na kterých v loňském roce probíhaly experimenty výše zmíněné nulté výzvy.

Laser L2 je v trochu zvláštní situaci. Původně byl plánován jako laser s výkonem 1 PW a frekvencí výstřelů 10 Hz založený na technologii keramické aktivní části a kryogenního chlazení. S obdobnými parametry, avšak na bázi neodymových skel a při pokojové teplotě, byl navržen i laser L3. Bylo to projevem obezřetnosti, protože v nultých letech tohoto století, kdy bylo celé ELI koncipováno, ještě žádný takový výkonový laser využívající laserové diody, tzn. plně polovodičovou technologii pro čerpání zesilovačů nefungoval a bylo tedy celkem přirozené spolehnout se na dvě alternativní technologie. Během stavby ELI se ukázalo, že obě technologie fungují dobře, ale také že cena kompletního systému L2 a čas potřebný k jeho stavbě by byly větší a delší než u systému L3. Rozhodli jsme se proto využít postavený první stupeň L2, který je v provozu, a celý laser dostavět vlastními silami tak, aby podstatně rozšířil možnosti ELI Beamlines. Laser přejmenovaný na L2-DUHA bude využívat pro zesílení ultrakrátkých



**Prof. Jan Řídký, DrSc.**, narozený v Lysé nad Labem v roce 1951, absolvoval studium teoretické jaderné fyziky na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze. Od ukončení studií v roce 1975 pracuje ve Fyzikálním ústavu AV ČR (dříve ČSAV). Vědecky působí v oblasti experimentální fyziky elementárních částic a kosmického záření. Kandidátskou disertační práci obhájil v roce 1983. Poté více než sedm let strávil v zahraničí ve Spojeném ústavu jaderných výzkumů v Dubně a v CERNu. Od roku 1997 se podílí na mezinárodním projektu observatoře Pierra Augera. V letech 2006–2010 vykonával funkci koordinátora fluorescenčního detektoru observatoře. V roce 2010 obhájil vědecký titul DrSc.

Ve Fyzikálním ústavu AV ČR působil v letech 1991–2005 jako vedoucí oddělení experi-

mentální fyziky elementárních částic, v letech 2005–2007 jako vedoucí sekce optiky a v letech 2007–2017 jako ředitel ústavu. Mimo to byl členem Vědecké rady Fyzikálního ústavu AV ČR (1992–1998) a členem oborové rady Grantové agentury ČR (2000–2005). V období 2001–2007 byl delegátem České republiky v Evropském výboru pro budoucí urychlovače (RECFA). Z pozice ředitele ústavu se podílel na řadě projektů financovaných ze strukturálních fondů (OP PK, OP VaVpI a OP VVV), z nichž svým mimořádným mezinárodním významem vyniká zejména projekt ELI. Od roku 2017 je členem Akademické rady a místopředsedou AV ČR pro oblast věd o neživé přírodě.

Jeho pedagogická činnost obnáší výběrové přednášky na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého v Olomouci a na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy. Na obou univerzitách je také členem oborových rad doktorských studijních programů. Byl školicí nebo konzultantem 11 obhájených doktorských prací. V roce 2008 se habilitoval na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého, v roce 2014 zde byl jmenován i profesorem. Je autorem nebo spoluautorem více než 400 experimentálních prací s cca 14 000 citacemi.

S manželkou Evou mají čtyři dospělé syny a žijí v Praze.

jení, vakuové systémy atd. Každý z těchto servisních systémů byl sice předán dodavatelem, ale nyní musí dojít k plné integraci jejich provozu. Přítom chod řady z nich ovlivňuje provoz ostatních, jsou zde zpětné vazby a samozřejmě na všech závisí fungování laserů – stále se máme co učit.

■ **JŽ:** *Jakým způsobem se provádí kalibrace laserů?*

JŘ: Lasery s velkým výkonem jsou velice nákladné, jejich svazky přenášejí obrovský výkon a jakákoliv nepřesnost při cestě každého pulzu zařízením by mohla vést k velkému poškození některé jeho části. Proto tzv. diagnostika svazku je pro jejich chod naprosto zásadní. V praxi se jedná o to, že v každém kritickém uzlu laseru je monitorována řada parametrů svazku. Zejména se jedná o délku a tvar rozložení pulzu v čase, jeho celkovou intenzitu, ale i homogenitu a tvar příčného rozdělení intenzity záření v pulzu, jeho spektrální složení a podobně. Tyto parametry se měří sofistikovanou optoelektronickou soustavou prvků, zahrnujících například nelineární krystaly, spektrometry a kompaktní interferometry umožňující konverzi do struktur detekovaných posléze CCD senzory, fotodiodami a podobně.

■ **JŽ:** *V systému laserů ELI je plánován různorodý výzkum v oborech od lékařství po astrofyziku. Je už známo, jaký základní výzkum fyziky zde bude probíhat?*

JŘ: Lasery slouží jednak jako nástroje, které pomáhají řadě vědních oborů, ať již se zabývají základním výzkumem nebo výzkumem, který směřuje k nějaké aplikaci. Používají se k nejrůznějším formám spektroskopie, ke zkoumání povrchů nebo k zobrazování struktury vzorků. Tyto vzorky pak mohou být součástí výzkumu nových ma-

pulzů nelineární optickou technologií OP-CPA a díky vysoké opakovací frekvenci až 50 Hz bude využíván zejména pro urychlování elektronů.

Laser L3-HAPLS s navrhovaným výkonem 1 PW a frekvencí výstřelů 10 Hz, postavený ve spolupráci s americkou Lawrence Livermore National Laboratory, je založen na technologii neodymových skel. Je to jediný PW laser na světě schopný poskytovat frekvenci výstřelů vyšší než 1 Hz. Již také funguje a postupně se v rutinním provozu přibližuje nominálním parametrům. Od začátku roku 2019 s jeho využitím proběhla řada zajímavých experimentů zaměřených především na urychlování protonů.

Ten nejsilnější laser – L4-ATON – již také v základním režimu funguje. To znamená, že poskytuje pulzy s energií 1,5 kJ při frekvenci zhruba jeden pulz za minutu. Po dokončení obřího kompresoru pulzů, který je při své délce 18 m a výšce 4 m jedním z největších zařízení tohoto druhu na světě, bude možné zkrátit délku pulzů na 150 fs a dosáhnout tak špičkového výkonu 10 PW.

Je to ohromné penzum práce, která začala naplno někdy v roce 2010, takže letos slavíme vlastně 10. výročí. Při této příležitosti nemohu nezmínit dva hlavní „otce“ laserových systémů – Dr. Ruse a Dr. Bakuleho z Fyzikálního ústavu AV ČR.

■ **JŽ:** *Mohl byste prosím ještě shrnout, jaký je jejich výkon?*

JŘ: V současné době je laser L1 ALLEGRA používán při výkonu 1 TW a frekvenci výstřelů 1 kHz. Laser L2 DUHA bude posky-

tovat až 200 TW s pulzy na frekvenci 50 Hz, L3 HAPLS 1,5 PW na frekvenci 10 Hz a L4 ATON 10 PW s četností výstřelů jednou za minutu.

■ **JŽ:** *Jaké je plánováno vytížení laserů a provádějí se experimenty i v noci?*

JŘ: Zatím ne. Dokud lasery nedosáhnou plného rutinního provozu, neplánujeme takový režim provozu. Netýká se to pouze použití samotných laserů. Do naprosto rutinního automatického provozu musejí být uvedeny i všechny podpůrné systémy, jako klimatizace, různé okruhy chlazení, napá-



V lékařském výzkumu se provádí zobrazování proteinů, virů, buněk nebo i vyšších organismů.

Foto: archiv ELI Beamlines

teriálů, chemických reakcí nebo se může jednat o proteiny, viry či jiné organismy pro biologický výzkum. Další velkou oblastí využití laserů ve výzkumu je jejich schopnost urychlovat částice a vyvolávat jaderné reakce. Oba tyto aspekty mohou sloužit jak ve fyzikálním, tak v biologickém výzkumu. V neposlední řadě jsou lasery schopné vytvářet husté plazma různých vlastností. Konkrétně tedy ve fyzice je možné studovat problémy atomové a molekulární fyziky, fyziky pevných látek a rovněž napodobit stav hmoty existující v nejrůznějších vesmírných objektech, například v obřích planetách, stelárních objektech apod. Dále je pak pomocí výkonových laserů možné studovat některé jaderné reakce a rovněž problémy termojaderné syntézy. Na koordinaci různých výzkumných směrů má velkou zásluhu Dr. Korn, který k nám přišel na samém začátku budování ELI Beamlines z Ústavu Maxe Plancka v Mnichově.

■ *JŽ: Jaký typ biomedicínského výzkumu se zde bude provádět a jaké by z něj mohly být praktické aplikace v mezioborovém využití?*

JŘ: Jak už jsem uvedl dříve, provádí se zobrazování proteinů, virů, buněk nebo i vyšších organismů. Je možné zkoumat i chemické děje a vlastnosti různých molekul se vztahem k biologii. Dále se připravujeme k ozařování biologických preparátů protony nebo i těžšími ionty. To vše může vést k aplikacím ve farmakologii nebo hadronoterapii.

■ *JŽ: Nepochybně velké naděje vědci vkládají do výzkumu otázek laboratorní astrofyziky. Myslíte, že zde bude možno například simulovat prostředí odpovídající nitru hvězd?*

JŘ: Pro astrofyziku má velký potenciál tvorba a výzkum vlastností plazmatu, které se vyskytuje jak v atmosféře, tak i v jádru hvězd. Budeme schopni měřit parametry hmoty v podmínkách odpovídajících tlakům

v nitru obřích planet, studovat rázové vlny odpovídající explozi supernovy a podobně. Samozřejmě se jedná o plazma různé teploty a hustoty a právě možnost takové podmínky připravit v laboratoři je nesmírně lákavá.

■ *JŽ: Jaké praktické výstupy jsou očekávány v oblasti lékařství, zobrazovacích metod, radioterapie a optice?*

JŘ: Už výše jsem zmínil farmacii a hadronoterapii. Vyspělé zobrazovací metody biologických vzorků na buněčné úrovni mohou být přínosné při studiu imunitních reakcí nebo nádorového bujení. V oblasti hadronoterapie lasery umožňují zkoumat působení i těžších částic, než jsou protony. Takovou možnost dávají urychlovače jen zřídka a variabilita použitých iontů je pak malá. V neposlední řadě se rozbíhá studium možnosti používat lasery jako urychlovače pro klasickou protonovou terapii.

■ *JŽ: Mohl byste nám osvětlit, co si můžeme představit pod pojmem „bílá kniha ELI“?*

JŘ: Tak to se musíme vrátit trochu do historie. Již v 90. letech minulého století začala spolupráce velkých evropských laserových infrastruktur s cílem umožnit přístup k těmto zařízením všem evropským vědcům v oboru. To vyústilo v první projekt typu Cooperation Network v rámci FP5 s názvem LASERNET financovaný Evropskou unií v letech 2001–2004. Toto sdružení nadále pokračuje v činnosti, nyní pod jménem Laserlab Europe, a má zajištěné financování nejméně do roku 2023. Uvnitř tohoto sdružení evropských odborníků na lasery se zrodila myšlenka koncentrovat lidské i finanční prostředky a postavit laserové zařízení nové generace. V kondenzované formě tuto myšlenku vyjádřil Gérard Mourou<sup>1</sup> a předložil

1 Gérard Mourou spolu s Donnou Stricklandovou získali v roce 2018 Nobelovu cenu za objev principu, který umožňuje stavět lasery nové generace.

ji Evropskému strategickému fóru pro výzkumné infrastruktury (ESFRI). Jednalo se údajně o text na jednu stránku formátu A4. Od roku 2007 toto kolektivní úsilí získalo finanční podporu EU a organizační strukturu ve formě projektu ELI PP, kde PP stojí za *Preparatory Phase* – přípravná fáze. Finálním výsledkem projektu je právě vámi zmíněná bílá kniha ELI. Je pod ní podepsáno více než 170 autorů převážně z Evropy, včetně České republiky, ale i z Japonska a USA. Kniha má přes 500 stránek a obsírně shrnuje současný stav laserové fyziky i schéma projektu ELI, rozděleného na ELI Beamlines, ELI ALPS a ELI NP. Popisuje jejich strukturu, zaměření a plánované parametry laserů. Něco jako stavební plán. Kniha byla dokončena v roce 2011, v té době jsme podle ní již postupovali.

■ *JŽ: Od ELI se očekávají nové poznatky v oblasti výzkumu ultraintenzivních polí a ultrarelativistického režimu. Co si pod tímto pojmem můžeme představit?*

JŘ: Laserový pulz je vlastně „balíček“ elektromagnetického záření lokalizovaný v prostoru a v čase. Vysokovýkonové lasery nám umožňují do takového balíčku vložit pole s velmi vysokou intenzitou a zkoumat jeho vlastnosti a účinky. Díky ELI jsme schopni vytvořit v laboratoři podmínky jako nikdy předtím. Vyjádřeno v číslech, posuneme se z relativistického režimu, kdy intenzita pole dosahuje hodnot  $10^{18}$ – $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> o několik řádů blíže k ultrarelativistické oblasti s intenzitami nad  $10^{24}$  W/cm<sup>2</sup>, kdy intenzita pole by měla vést ke vzniku  $e^+e^-$  párů ve vakuu.

■ *JŽ: Předpokládá se, že by laserové centrum ELI mělo posílit pozici Evropy ve světovém laserovém výzkumu. Jakým způsobem by toho bylo možné docílit?*

JŘ: V ELI Evropa získá infrastrukturu, jaká dosud ve světě není. Doufejme něco jako CERN pro lasery. Samozřejmě CERN



Po dokončení obřích kompresorů pulzů, který je při své délce 18 m a výšce 4 m jedním z největších zařízení tohoto druhu na světě, bude možné na laseru L4 ATON dosáhnout špičkového výkonu 10 PW. Foto: archiv ELI Beamlines



V ELI Evropa získá infrastrukturu, jaká dosud ve světě není. Doufejme, že něco jako CERN pro lasery.  
Foto: archiv ELI Beamlines

■ **JŽ:** A těsně před závěrem bych se ráda zeptala na otázku, která mi tak trochu vrtá hlavou. Co by se stalo, kdyby se – čistě hypoteticky – laserový paprsek v ELI dostal z laboratoře ven? Kam a jak daleko by letěl?

JŘ: To je dosti hypotetická otázka – záleží, ve které fázi. Když svazek míří na terč, má ohromnou intenzitu a je koncentrován do bodu; pak se zase začne rozbíhat a intenzita klesá. Když se svazek přivádí k experimentálnímu zařízení a nerozbíhá se, je rozostřený v příčném průřezu na velkou plochu, aby jeho intenzita nezničila optiku. Ale když se tedy pokusíme přiblížit k představám „Star Wars“, tak nejdříve by musel překonat 1,6 metru tlustou betonovou zeď a pak by pokračoval do okolní zeminy. Paprsky jsou totiž vyvedeny do experimentů v suterénu. Ten nejsilnější 10 PW by asi způsobil menší výbuch, protože by se vlhkost v zemi nesmírně rychle proměnila v páru. Ovšem pokud by nějaký obr naklonil celé ELI tak, aby paprsek mířil do vzduchu, pak by dolétl hodně daleko. Laserem se například měřila přesně vzdálenost Země–Měsíc odrazem od zrcadla, které tam zanechali američtí astronauti.

■ **JŽ:** Stál jste u zrodu ELI a na jeho provozu spolupracujete i nadále. Jaké úspěchy byste ELI do budoucna přál vy osobně?

JŘ: Co nejvíce co nejzajímavějších objevů! I když se výzkumná činnost může zdát pracná a zdlouhavá, věda je nesmírně vzrušující, a pokud je někdy odměněna nečekaným výsledkem, nelze si přát více...

■ **JŽ:** Vážený pane profesore, děkuji vám za zajímavé informace a za celou redakci bych vám ráda popřála mnoho důležitých objevů, které prostřednictvím ELI v budoucnu do zajista přijdou.

má za sebou téměř sedmdesátiletou historii, mnoho úspěchů a představuje obrovskou koncentraci lidského potenciálu a know-how v oblasti částicové fyziky, jaderné fyziky, technologií urychlovačů a detektorů. Držme palce, aby za deset let bylo ELI tomuto ideálu blíže. Každopádně svět již nyní ELI zaznamenal a například prestižní sdružení Národních akademií USA ve svém reportu z roku 2017, který je celý věnován problematice laserů s intenzivními ultrakrátkými pulzy, tedy s velkým výkonem, dává ELI za vzor, jakým by se USA měly řídit.

■ **JŽ:** Jedním z cílů výzkumu v ELI je vývoj nových metod ve zpracování jaderného odpadu. Už tento výzkum začal? A jakým směrem by se měl ubírat?

JŘ: Tím, že lasery jsou schopné urychlovat různé ionty, mohly by vyhořelé palivo z jaderných elektráren transmutovat na méně nebezpečné prvky s kratšími poločasy rozpadu. Ty by se daly snadněji skladovat. Zatím jsme u počátečních studií a domlouváme se na spolupráci s Centrem jaderného výzkumu Řež, což je dceřiná organizace ČEZ.

■ **JŽ:** Jak se na výzkumu v ELI podílejí doktorandi a celkově nová generace vědců?

JŘ: Doktorandi a postdoci mají pro ELI ohromný význam. Tvoří 15% všech vědeckých pracovníků, a protože ELI je opravdu běh na dlouhou trať, úloha těch současných bude zásadní. A bude na nich, aby opět vychovali další generaci.

■ **JŽ:** Je ELI otevřeno i laickým návštěvníkům? Je možné navštívit některé provozy, nebo se počítá se zbudováním informačního centra podobně jako například v jaderné elektrárně Temelín?

JŘ: Už pominuly doby, kdy do budovných experimentálních a laserových hal

mohli volně návštěvníci. Všechno to jsou dnes již čisté prostory, kam mohou lidé chodit jen v ochranných oblecích a za přísných bezpečnostních opatření. Do laserových hal je nyní možné nahlédnout z návštěvnické galerie v době, kdy lasery nepracují. Návštěvník však o nic nepřijde, laserové i experimentální haly je možné prohlížet kdykoli ve virtuální realitě. Kromě toho se návštěvníci dozvědí mnoho zajímavého o výzkumu a jeho fyzikálních základech z řady panelů a případně i z výkladu průvodce. V neposlední řadě pak mohou doporučit malou, ale velmi zajímavou expozici vzniklou z archeologického průzkumu stavebního pozemku. Místo dnešního ELI Beamlines je obývané již od dob mladšího neolitu! Do budoucna plánujeme stavbu specializovaného návštěvnického centra.



Prof. Jan Řídký: „I když se výzkumná činnost může zdát pracná a zdlouhavá, věda je nesmírně vzrušující, a pokud je někdy odměněna nečekaným výsledkem, nelze si přát více...“

Foto: archiv ELI Beamlines