NOBELOVA CENA ZA FYZIKU 2018

Nástroje vyrobené zo svetla

Objavy ocenené Nobelovou cenou za fyziku v tomto roku spôsobili revolúciu v laserovej fyzike. Extrémne malé objekty a neuveriteľne rýchle procesy sa teraz ukazujú v novom svetle. Nielen fyzika, ale aj chémia, biológia a medicína získali precízne nástroje na využitie v základnom výskume aj v praktických aplikáciách.

Arthur Ashkin objavil optickú pinzetu, ktorá dokáže chytiť častice, atómy a molekuly svojimi „prstami“ z laserových lúčov. Vírusy, baktérie a iné živé bunky tiež dokáže podržať, preskúmať a manipulovať s nimi bez toho, aby sa poškodili. Ashkinova optická pinzeta priniesla nové možnosti pozorovania a ovládania základných kameňov života.

Gérard Mourou a **Donna Stricklandová** vydláždili cestu najkratším a najintenzívnejším laserovým impulzom, aké kedy ľudstvo vytvorilo. Metóda, ktorú vyvinuli, otvorila nové oblasti výskumu a viedla k širokému uplatneniu v priemysle aj v medicínskych aplikáciách; napríklad milióny operácií očí ročne sa robia pomocou najostrejších laserových lúčov.

Cestovanie v lúčoch svetla

Arthur Ashkin mal sen: predstavoval si, že svetelné lúče by sa mohli využiť na premiestňovanie objektov. V kultovom seriáli zo šesťdesiatych rokov, Star Treku, používali ťažný lúč na bezdotykové pritiahnutie vesmírnych objektov, dokonca aj asteroidov. Samozrejme, toto vyzerá ako čisté sci-fi. Cítime, že slnečné lúče prenášajú energiu – na slnku sa zohrejeme –, ale tlak lúča je príliš malý na to, aby sme pocítili čo i len malé štuchnutie. Ale je táto sila dostatočná na to, aby dokázala posunúť extrémne malé častice a atómy?

Hneď po vynájdení lasera v roku 1960 začal Ashkin experimentovať s týmto novým nástrojom v Bellových laboratóriách pri New Yorku. V laseri sa svetelné vlny pohybujú koherentne, nie ako v bežnom bielom svetle, kde sú pomiešané lúče všetkých farieb dúhy a sú rozptýlené do všetkých smerov.

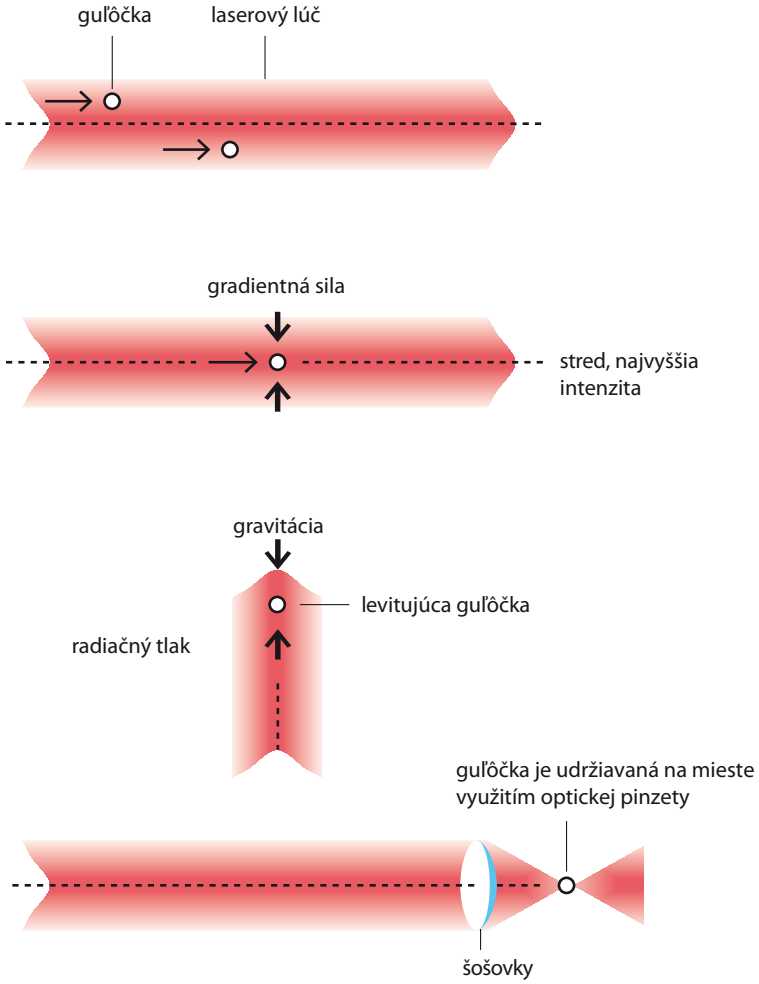
Vytvorenie svetelnej pasce

1 Malé priesvitné guľôčky sa dajú do pohybu po osvetlení laserovým svetlom. Ich rýchlosť zodpovedá Ashkinovmu teoretickému odhadu, čo dokazuje, že je to naozaj radiačný tlak, ktorý ich uvádza do pohybu.

2 Neočakávaným efektom bola gradientná sila, ktorá tlačí guľôčky smerom do stredu lúča, kde je svetlo najintenzívnejšie. Dôvodom je to, že intenzita lúča klesá smerom k jeho kraju a výslednica všetkých síl pôsobiacich na guľôčky ich tlačí smerom do jeho stredu.

3 Ashkin prinútil levitovať guľôčku zacielením laserového lúča smerom nahor. Radiačný tlak pôsobí proti gravitačnej sile.

4 Laserový lúč sa sústredí pomocou šošoviek. Svetlo zachytí častice a dokonca aj živé baktérie a bunky v optickej pinzete.



©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Askhin vytvoril svetelnú pascu, ktorá je známa pod názvom optická pinzeta

Ashkin si uvedomil, že laser by mohol byť ideálnym nástrojom na využitie svetelných lúčov na pohyb malých častíc. Osvietil transparentnú guľôčku s priemerom jeden mikrometer a hneď sa mu ňou podarilo pohnúť. Ashkin bol zároveň prekvapený, že guľôčky boli vtiahnuté do stredu lúča, kde bol najintenzívnejší. Vysvetlenie spočíva v tom, že akokoľvek ostrý lúč je, jeho intenzita vždy klesá od stredu smerom ku krajom. Preto sa líši aj tlak žiarenia, ktorý pôsobí na častice – tlačí ich smerom do stredu lúča, čo udržiava častice v jeho centre.

Aby Ashkin udržal častice v smere lúča, pridal silné šošovky na zaostrenie laserového svetla. Častice boli potom priťahované k miestu, kde bola najväčšia svetelná intenzita. Narodila sa svetelná pasca známa ako optická pinzeta.

Živé baktérie zajaté svetlom

Po niekoľkých rokoch a množstve prekážok sa podarilo do pasce zachytiť jednotlivé atómy. Objavilo sa však aj viacero ťažkostí – jednou z nich bol fakt, že na zachytenie atómu optickou pinzetou bola potrebná väčšia sila. Ďalším problémom boli tepelné vibrácie atómov. Bolo nevyhnutné nájsť spôsob, ako spomaliť atómy a udržať ich v oblasti menšej, ako je bodka na konci tejto vety. Všetko do seba zapadlo v roku 1986, keď bola optická pinzeta skombinovaná s inými metódami na zastavovanie atómov a ich uväzňovanie.

Zatiaľ čo sa spomaľovanie atómov stalo samostatnou oblasťou výskumu, Arthur Ashkin objavil úplne nový spôsob využitia svojej optickej pinzety – využil ju na skúmanie biologických systémov. Priviedla ho k tomu náhoda. Pri svojich pokusoch o zachytenie čo najmenších častíc používal vzorky malých mozaikových vírusov. Po tom, ako ich raz nechal otvorené počas noci, boli vzorky plné veľkých častíc pohybujúcich sa sem a tam. Pomocou mikroskopu zistil, že tieto častice boli baktérie, ktoré neplávali voľne – keď sa priblížili k laserovému lúču, zachytili sa do svetelnej pasce. Avšak toto zelené laserové svetlo zároveň baktérie zabíjalo. Na to, aby prežili, bol potrebný slabší lúč. V neviditeľnom infračervenom svetle zostali baktérie nepoškodené, dokonca sa v pasci dokázali aj rozmnožovať.

Preto sa potom jeho výskum sústredil na množstvo rôznych baktérií, vírusov a živých buniek. Dokonca sa mu podarilo ukázať, že sa dá dostať do buniek bez poškodenia bunkovej membrány.

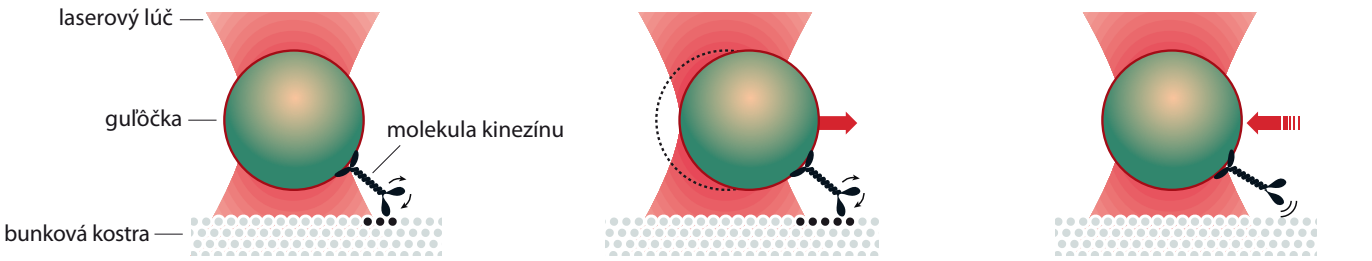
Ashkin svojou optickou pinzetou otvoril dvere úplne novým aplikáciám. Dôležitým prelomom bola možnosť skúmať mechanické vlastnosti molekulárnych motorov, veľkých molekúl, ktoré vykonávajú životne dôležité úlohy vnútri buniek. Prvou detailne zmapovanou molekulou pomocou optickej pinzety bol motorický proteín, kinezín, a jeho pohyb po krokoch pozdĺž mikrotubulov, ktoré sú súčasťou bunkovej kostry (tzv. cytoskeletu).

Od science-fiction k praktickým aplikáciám

Inšpirácia prišla z jedného populárno-vedeckého článku opisujúceho radar a jeho dlhé rádiové vlny. Avšak prenos tejto myšlienky na kratšie svetelné vlny bol zložitý – ako teoreticky, tak aj prakticky. Prelom bol opísaný v článku publikovanom v decembri 1985, ktorý bol prvou vedeckou publikáciou **Donny Stricklandovej**. Prišla z Kanady na Univerzitu v Rochesteri v USA, kam ju pritiahli k laserovej fyzike zelené a červené lúče, ktoré osvetľovali laboratórium ako vianočný stromček, a v neposlednom rade aj vízie jej školiteľa **Gérarda Mouroua**. Jedna z nich bola zrealizovaná – myšlienka zosilniť krátke laserové impulzy na nebývalé hodnoty.

Laserové svetlo sa vyrába reťazovou reakciou, pri ktorej svetelné častice, fotóny, generujú ešte viac fotónov, ktoré môžu byť emitované v impulzoch. Odkedy bol laser

Motorická molekula kráča vnútri svetelnej pasce

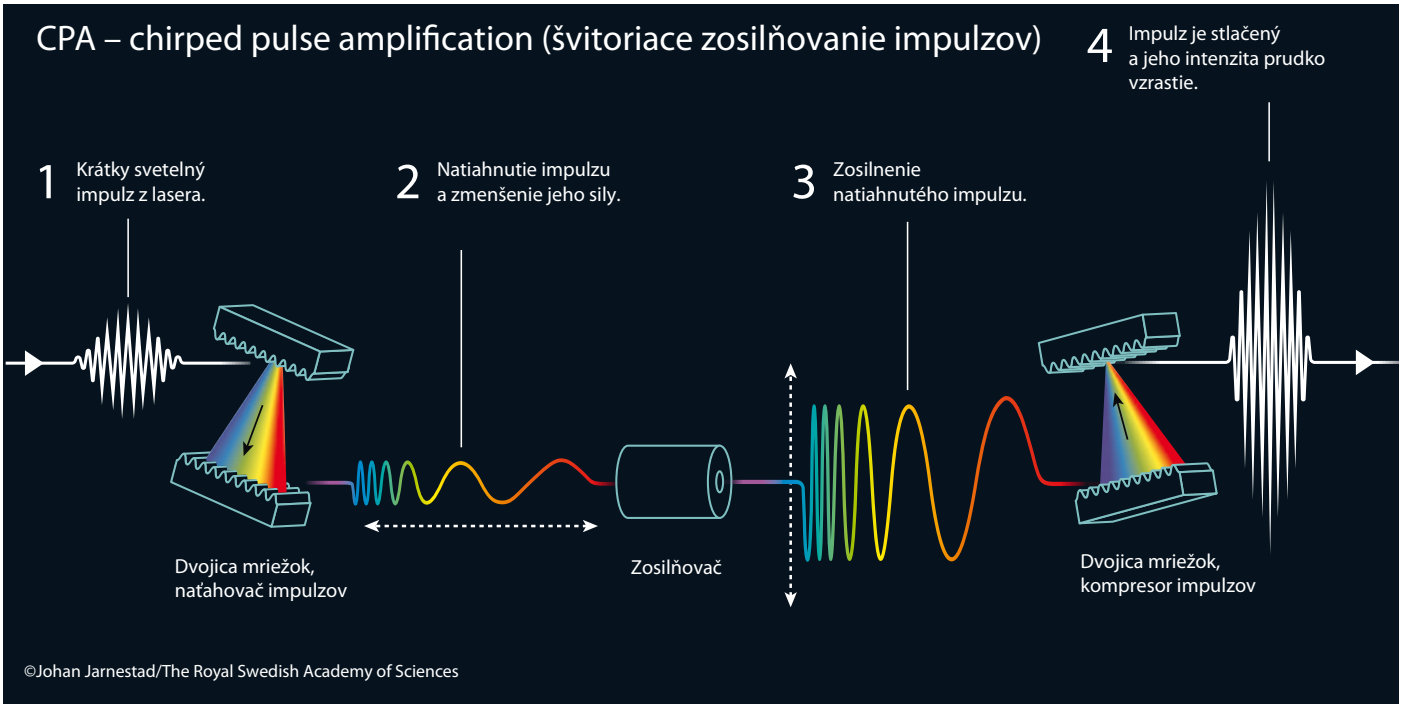


1 Molekula kinezínu sa prichytí na malú guľôčku pridržanú v optickej pinzete.

2 Kinezín odkráča pozdĺž bunkovej kostry. Ťahá pritom guľôčku, čo umožňuje zmerať jeho pohyb.

3 Motorická molekula nakoniec nedokáže odolávať sile svetelnej pasce a guľôčka je vtiahnutá naspäť do stredu lúča.

©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences



Metóda CPA (chirped pulse amplification, švitoriace zosilňovanie impulzov) spôsobila revolúciu v laserovej technike. Umožnila vyžarovanie veľmi intenzívnych krátkych impulzov svetla použitím metódy, ktorá umožnila vyhnúť sa riziku zničenia zosilňujúceho materiálu. Namiesto priameho zosilňovania svetelného impulzu sa impulz najprv natiahne, čím sa zoslabí. Potom sa zosilní a keď sa stlačí, viac svetla sa zozbiera na jednom mieste a svetelný impulz sa extrémne zintenzívni.

vynájdený, teda pred takmer 60 rokmi, sa výskumníci snažili vytvoriť ešte intenzívnejšie lúče. Avšak v polovici osemdesiatych rokov narazili na limity používaných metód. Pri krátkych impulzoch už nebolo prakticky možné zvýšiť intenzitu svetla bez toho, aby sa zničil zosilňujúci materiál.

Nová metóda známa ako švitoriace zosilňovanie impulzov (*chirped pulse amplification*, CPA) bola jednoduchá, no zároveň elegantná. Vezmi krátky laserový impulz, natiahni ho, zosilni ho a stlač ho znova dokopy. Keď sa impulz natiahne, jeho sila je výrazne menšia, takže ho dokážeme značne zosilniť bez toho, aby sa poškodil zosilňovač. Impulz sa potom stlačí, čo znamená, že sa viac svetla skomprimuje vo veľmi malom priestore, a intenzita impulzu sa potom dramaticky zvýši.

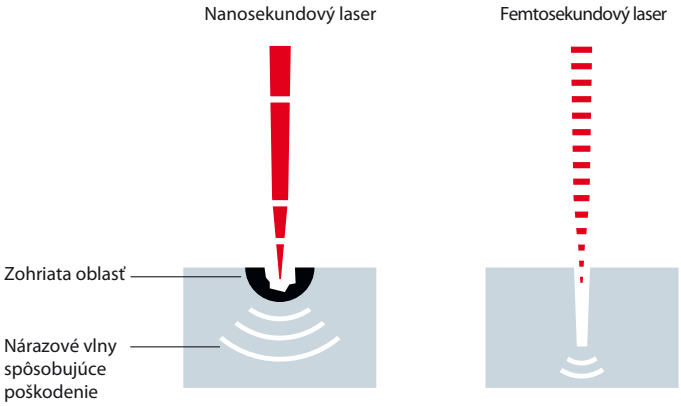
Trvalo pár rokov, kým sa Stricklandovej a Mourouovi podarilo všetko úspešne skombinovať. Ako obvykle, záplava praktických aj konceptuálnych detailov spôsobovala problémy. Napríklad impulzy sa naťahovali pomocou nového 2,5 kilometra dlhého kábla z optických vláken. Lenže žiadne svetlo von nevychádzalo – kábel bol zlomený niekde uprostred. Nakoniec im po množstve problémov muselo stačiť aj 1 400 metrov kábla. Najväčšou výzvou bolo zosynchronizovanie jednotlivých etáp v ich zariadení, dosiahnutie toho, aby naťahovač lúčov pracoval v súlade s kompresorom.

To sa im tiež podarilo vyriešiť a v roku 1985 sa im konečne podarilo dokázať, že ich elegantná vízia funguje aj v praxi. Metóda CPA, ktorú vynašli, spôsobila revolúciu v laserovej fyzike. Stala sa štandardom vo všetkých neskorších vysoko výkonných laseroch a východiskovou bránou k úplne novým oblastiam výskumu a aplikáciám vo fyzike, chémii a medicíne. Najkratšie a najintenzívnejšie laserové impulzy sa teraz mohli vytvárať v laboratórnych podmienkach.

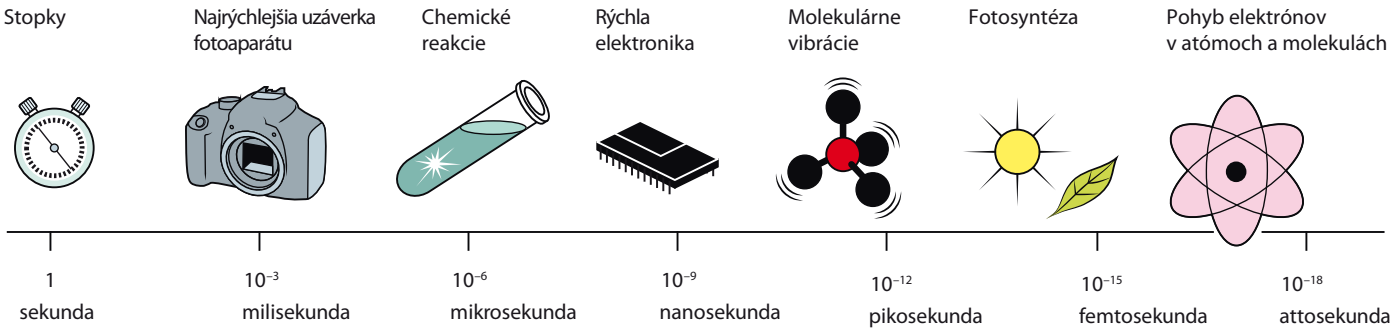
Najrýchlejší fotoaparát na svete

Ako sa tieto ultrakrátke a intenzívne impulzy využívajú? Jedným z prvých využití bolo osvetľovanie diania medzi molekulami a atómami v neustále sa meniacom mikrosvete. Deje prebiehajú rýchlo, tak rýchlo, že dlhý čas bolo možné opísať len stav pred a stav po. Ale pomocou impulzov trvajúcich len jednu femtosekundu, jednu miliontinu miliardtiny sekundy, môžeme uvidieť udalosti, ktoré sa predtým zdali byť okamžité.

Svetlo z lasera extrémne vysokej intenzity môže byť nástrojom na zmenu vlastností hmoty: elektricky nevodivá látka sa dá zmeniť na vodič, veľmi ostré laserové lúče umožňujú rezať alebo vŕtať diery s obrovskou presnosťou do rôznych materiálov – dokonca aj do živej hmoty.



Krátke impulzy z femtosekundového lasera (vpravo) poškodia materiál menej ako miliónkrát dlhšie impulzy z nanosekundového lasera (vľavo). Ultrakrátke a intenzívne laserové impulzy sa používajú pri operáciách oka, ukladaní dát a výrobe medicínskych stentov určených na operácie vnútri ciev.



©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Čím rýchlejšie sú laserové impulzy, tým rýchlejšie pohyby sa môžu pomocou nich pozorovať. Takmer nepredstaviteľne krátke laserové impulzy trvajú len niekoľko femtosekúnd a môžu byť ešte tisíckrát kratšie, len zopár attosekúnd. Toto umožňuje zachytiť udalosti, ktoré mohli byť kedysi iba odhadované; pohyb elektrónov okolo atómového jadra teraz môžeme pozorovať pomocou attosekundového fotoaparátu.

Lasery sa môžu použiť napríklad aj na výrobu omnoho efektívnejších dátových úložísk, keďže na ukladanie dát sa nevyužije len povrch materiálu, ale aj drobné dierky vyvŕtané hlboko do dátového nosiča. Táto metóda sa využíva tiež na výrobu chirurgických stentov, mikrometer tenkých valčekov natiahnutého kovu, ktoré rozširujú a spevňujú cievy, močovody a ďalšie trubice vnútri tela.

Existuje množstvo ďalších oblastí ich využitia, ktoré doteraz neboli plne preskúmané. Každý krok vpred umožňuje vedcom hlbšie preniknúť do nových svetov, zmeniť základný výskum a aj praktické aplikácie.

Jednou z nových oblastí výskumu, ktorá sa objavila v posledných rokoch, je attosekundová fyzika. Laserové impulzy kratšie ako sto attosekúnd (jedna attosekunda je miliardtina miliardtiny sekundy) odhaľujú vzrušujúci svet elektrónov. Elektróny sú ťažným koňom chémie; sú zodpovedné za optické a elektrické vlastnosti všetkých látok a za chemické väzby. Nielen že ich teraz dokážeme pozorovať, ale môžeme ich dokonca aj ovládať.

K ešte extrémnejšiemu svetlu

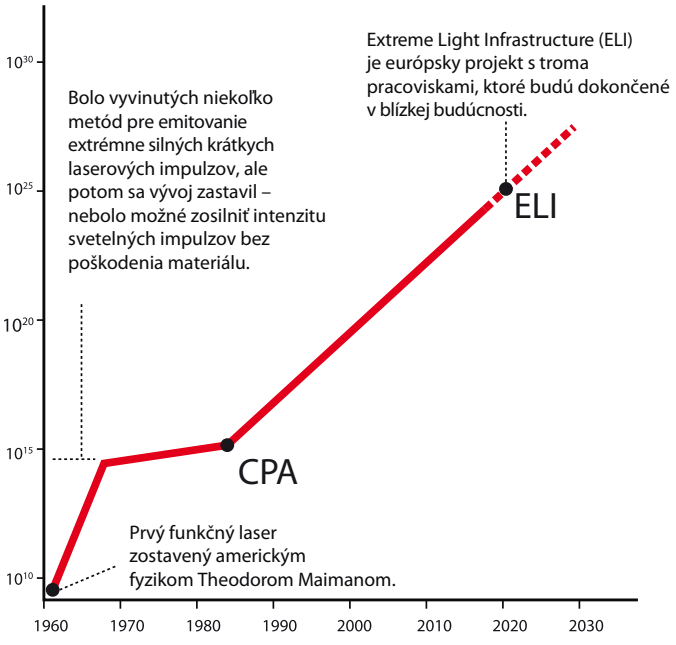
Mnohé aplikácie týchto nových laserových metód čakajú za rohom – rýchlejšia elektronika, efektívnejšie fotovoltické články, lepšie katalyzátory, výkonnejšie urýchľovače, nové zdroje energie alebo navrhovanie liečiv. Nečudo, že je v laserovej fyzike tvrdá konkurencia.

Donna Stricklandová pokračuje vo výskumnej kariére v Kanade, zatiaľ čo Gérard Mourou sa vrátil do Francúzska, okrem iných projektov je zapojený aj do paneurópskej iniciatívy v laserovej technológii. Inicioval a v začiatkoch viedol projekt *Extreme Light Infrastructure*, ELI. Výskumné centrá na troch miestach – v Česku, Maďarsku a Rumunsku – budú v plnej prevádzke v priebehu niekoľkých rokov. Plánovaný výkon zariadení je 10 petawattov, čo je ekvivalentné neuveriteľne krátkemu záblesku zo stotisíc miliárd svetelných žiaroviek.

Na týchto troch miestach sa budú špecializovať na rôzne oblasti – attosekundový výskum v Maďarsku, jadrovú fyziku v Rumunsku a vysokoenergetické časticové lúče v Česku. Nové a ešte výkonnejšie zariadenia sú naplánované v Číne, Japonsku, USA a Rusku.

Špekuluje sa aj o ďalšom kroku: desaťnásobnom zvýšení výkonu na 100 petawattov. Vízie budúcnosti laserovej fyziky sa týmto nekončia. Čo tak výkon jeden zettawatt (milión petawattov, 10^{21} wattov) alebo impulzy trvajúce len zeptosekundy, čo je ekvivalentné neuveriteľne krátkemu časovému úseku 10^{-21} sekundy? Otvárajú sa nové obzory, od výskumu kvantovej fyziky vo vákuu k výkonným protónovým lúčom, ktoré sa dajú použiť na odstránenie rakovinových buniek v tele. Avšak už teraz nám tieto slávne vynálezy umožňujú objavovať mikrosvet v duchu Nobelovho odkazu – pre najväčší prínos ľudstvu.

Smerom k ešte vyšším intenzitám



©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Vývoj maximálnej intenzity laserových impulzov (na zvislej osi, jednotky W/cm^2). Technika CPA ocenená v tomto roku sa stala základom pre mimoriadne intenzívny rozvoj v oblasti veľmi silných laserových impulzov.

Katarína Hriňáková, Martin Hriňák
Zdroj: www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/summary/
Fotografie: OSA, Laurence L. Levin, École polytechnique