

Nobelova nagrada za fiziko 2018:

Optična pinceta in metoda za ustvarjanje ultrakratkih optičnih sunkov visokih intenzitet

Natan Osterman

Nobelovo nagrado za fiziko za leto 2018 so si razdelili trije eksperimentalni fiziki za svoje »prelomne izume v fiziki laserjev«. Arthur Ashkin je prejel polovico nagrade za »optično pinceto in njeno uporabo v bioloških sistemih«, drugo polovico pa sta dobila Gérard Mourou in Donna Strickland za »metodo za ustvarjanje ultrakratkih optičnih

sunkov visokih intenzitet« (The Nobel Prize in Physics 2018).

Optična pinceta

Nemški astronom Peter Apian je leta 1531 opazoval (danes imenovani) Halleyjev komet in v svoji knjigi *Astronomicum Caesareum* poročal, da njegov rep vedno kaže proč



Slika 1: Arthur Ashkin, Gérard Mourou in Donna Strickland (od leve proti desni). Ashkin, rojen leta 1922 v New Yorku, se je po doktoratu iz jedrske fizike na Univerzi Cornell zaposlil v Bellovih laboratorijih, kjer je ostal vse do upokojitve leta 1992. Nobelovo nagrado je prejel v starosti 96 let in s tem postal najstarejši prejemnik v zgodovini nagrade. Mourou, rojen leta 1944 v Albertvillu, je po doktoratu na Univerzi Pariz VI svojo raziskovalno pot nadaljeval na Univerzi Rochester, nato na Univerzi v Michiganu, leta 2004 pa se je vrnil nazaj v Francijo na ENSTA-École Polytechnique v Parizu. Donna Strickland, rojena leta 1959 v Guelphu v Kanadi, je po diplomi iz inženirske fizike začela z doktoratom pod Mouroujevim mentorstvom na Univerzi Rochester. Še kot doktorska študentka je z mentorjem leta 1985 objavila svoj prvi znanstveni članek, za katerega je 33 let kasneje kot tretja ženska v 117-letni zgodovini nagrade prejela Nobelovo nagrado za fiziko. Stricklandova je po doktoratu delala v Nacionalnem raziskovalnem svetu Kanade, v laboratoriju Lawrence Livermore, na Univerzi Princeton, dokler se leta 1997 ni ustalila na Univerzi v Waterlooju. Ilustracija: Niklas Elmehed. Fotografiji: A. Mahmoud (Nobel Media AB), vir: The Nobel Prize in Physics 2018, www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/.

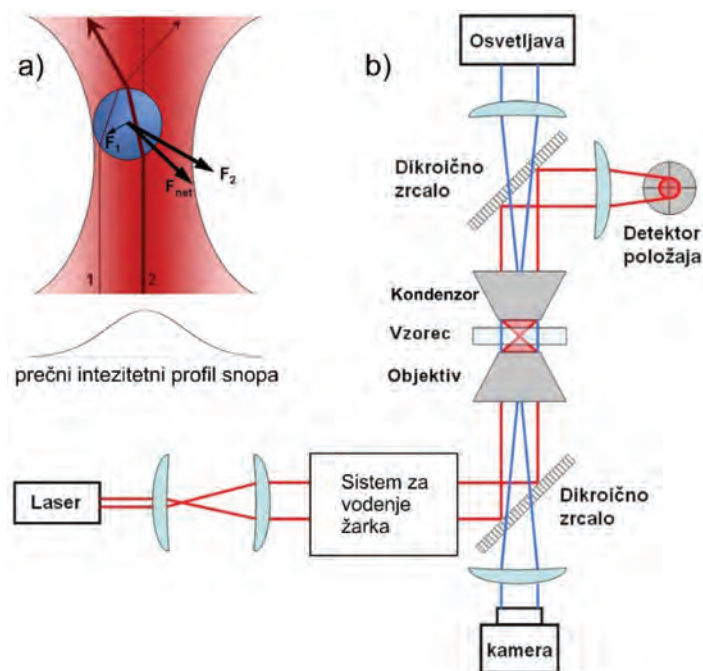
od Sonca. Na začetku 17. stoletja je Johannes Kepler – poleg tega, da je izračunal, da se planeti gibljejo po eliptičnih tirih okoli Sonca – smer repa kometa pojasnil s Sončevimi žarki, ki prebadajo komet in nato del njegove snovi odnesejo s seboj, in s tem kot prvi uvedel idejo svetlobnega tlaka. Teoretični model za opis tega tlaka je izpeljal James Clerk Maxwell konec 19. stoletja, leta 1900 pa ga je ruski fizik Pjotr Lebedev eksperimentalno potrdil. Pri teh eksperimentih so uporabili izjemno nizke tlake, saj viri svetlobe visoke intenzitete takrat še niso obstajali.

Stanje se je dramatično spremenilo z izumom laserja leta 1960. Arthur Ashkin je leta 1970 močno fokusirani laserski snop usmeril na mikrometrске delce v zraku ali vodi in pri tem pričakovano opazil pospeševanje delcev v smeri širjenja svetlobe zaradi svetlobnega tlaka (Ashkin, 1970). Pri delcih z lomnim količnikom, večjim od okolice (na primer steklene mikrokroglice v vodi), je opazil še dodaten pojav: delce je svetloba potegnila v območje največje intenzitete la-

serskega snopa. (Kot analogijo si lahko delec predstavljamo kot žogo, laserski snop pa kot reko. Žoga, vržena v reko, potuje v smeri toka, hkrati pa jo potegne na sredo reke, kjer je hitrost toka največja.) Da je Ashkin lahko s svetlobo držal delec na mestu, je moral uporabiti dva nasprotno usmerjena laserska snopa. Pri tem se svetlobna tlaka obeh snopov ravno odštejeta, zato delec ne »odfrči«, ampak ostane na mestu največje intenzitete svetlobe, kar je v gorišču snopa. S tem je delec ujet v *optično past*.

Taka »dvožarkovna« optična past je sicer delovala, a je bila zelo nepraktična za uporabo. Z enim samim laserskim snopom je bilo delce možno ujeti samo v primeru, če je bil primerno močan snop usmerjen navpično navzgor, teža delca pa je ravno nasprotovala sili zaradi tlaka svetlobe.

Ashkin je področje raziskoval naprej in je leta 1986 s sodelavci izdelal prvo »enožarkovno« optično past. Pri njej se en laserski snop fokusira skozi mikroskopski objektiv z veliko numerično aperturo, zaradi česar na delec v bližini snopa deluje močna optična sila,



Slika 2: Optična pinceta.

a) Laserski snop na delec vpada s spodnje strani. S črto sta prikazana dva različna žarka: obosni žarek (1) in centralni žarek (2). Po dvojnem lomu se jima spremeni smer in s tem gibalna količina, posledično pa na delec delujeta sili F_1 in F_2 . Rezultanta sil F_{net} deluje v smeri optične osi. b) Tipična eksperimentalna postavitev. Laserski snop se razširi, usmeri s sistemom za premikanje, nato pa z objektivom fokusira v ravnini vzorca, da nastane optična past. Lego delcev se določa s kamero ali s kvadrantno fotodiodo. Prirejeno po viru: Optična pinceta, https://sl.wikipedia.org/w/index.php?title=Opti%C4%8Dna_pinceta, https://sl.wikipedia.org/w/index.php?title=Opti%C4%8Dna_pinceta. (accessed February 11, 2019.).

usmerjena proti gorišču snopa. Če je ta večja od sile zaradi svetlobnega tlaka, je delec ujet v stabilno ravnovesje. Ashkin je pokazal, da v vodi lahko ujame delce velikosti od nekaj deset nanometrov do nekaj deset mikrometrov (Ashkin, Dziedzic, Bjorkholm, Chu, 1986). S premikanjem lege gorišča snopa (kar lahko zlahka naredimo z zunanjimi zrcali) so se premikali tudi v past ujete delci, zato je naprava kmalu dobila ime »optična pinceta« oziroma tudi »laserska pinceta«.

Na sliki 2 je prikazana pot dveh žarkov pri lomu skozi mikrokroglico, ki se nahaja blizu gorišča laserskega snopa. Če se kroglica nahaja levo od osi snopa, se centralni žarek z največjo intenziteto (označen s številko 2) lomi v levo. Fotonom v žarku se pri tem spremeni gibalna količina, zato po 3. Newtonovem zakonu na kroglico deluje sila v nasprotni smeri, torej proti gorišču laserskega snopa.

Uporaba optične pincete

Prva odmevna uporaba optične pincete je bila za lovljenje in hlajenje atomov, kar je izvedla raziskovalna skupina pod vodstvom Stevena Chuja. Chu, med drugim tudi kasnejši minister za energetiko v vladi Billa Clintona, je za te prelomne eksperimente, ki jih je izvedel v sodelovanju z Ashkinom, dobil del Nobelove nagrade za fiziko leta 1997, Ashkin pa je ostal praznih rok. V znanstveni skupnosti je to takrat povzročilo kar nekaj razburjenja. Nobelova komisija je dobri dve desetletji kasneje končno spoznala, da s

svojim izumom tudi Ashkin zasluži nagrado. Medtem ko se je Chu v drugi polovici osemdesetih let prejšnjega stoletja posvetil atomom, se je Ashkin hitro zavedal, da je pinceta s svojim brezkontaktnim načinom delovanja izjemno orodje za manipulacijo v bioloških sistemih. Za čim manjšo absorpcijo svetlobe v vodi je začel uporabljati infrardeči laser z valovno dolžino 1064 nanometrov in z njim najprej demonstriral lovljenje in manipulacijo virusov ter živih celic (Ashkin, Dziedzic, 1987), nato pa pokazal tudi manipulacijo znotrajceličnih sestavin. V optično past brez težav ulovimo bakterijo in opazujemo, kako se ujeta deli, kar je očiten znak, da se »počuti« dobro.

Na začetku devetdesetih let so v mnogih laboratorijih po svetu zgradili svoje optične pincete predvsem za raziskave bioloških sistemov. Pinceta namreč ne omogoča samo manipulacije, ampak tudi meritev sil, ki delujejo na delec v optični pasti. Pokaže se, da je velikost sile, ki delec vleče nazaj proti središču optične pasti, kar sorazmerna z odmikom delca od središča, torej podobno kot Hookov zakon $F = k \cdot x$. Lego delca x lahko določimo s kamero ali kvadrantno fotodiodo, za kvantitativno določitev sile pa je treba poznati še koeficient »vzmeti« k , kar dosežemo s predhodno kalibracijo (umeritvijo) optične pasti. S pinceto je mogoče meriti sile v območju od 0,1 pikonewtona do nekaj 100 pikonewtonov, kar je ravno območje, v katerem je mnogo relevantnih sil v mikrobiologiji (tabela 1).

Tabela 1: Velikosti tipičnih sil v mikrobiologiji. Optična pinceta lahko vleče s silo od 0,1 pikonewtona do nekaj 100 pikonewtonov.

Dogodek	Sila
trganje kovalentne vezi, npr. C-C	1600 pN
trganje nekovalentne vezi, npr. streptavidin-avidin	160 pN
sila med proteinoma	10 pN
sila molekulskega motorja	5 pN
trganje vodikove vezi	4 pN
raztegovanje dvoverižne DNK	0.1 pN – 60 pN
sila teže bakterije <i>E. coli</i>	0.01 pN

Mnogo eksperimentov zahteva uporabo več hkratnih optičnih pasti, kar dosežejo z deljenjem laserskega snopa. Tega je mogoče s primernim uklonskim elementom deliti v prostoru, veliko pogostejše pa je deljenje v času, pri katerem je snop za kratek čas usmerjen v prvo točko vzorca, nato v drugo, tretjo, ..., potem pa se zaporedje ponovi. Če je preklapljanje med posameznimi točkami dovolj hitro, dobimo več sočasnih optičnih pasti.

Shema tipične eksperimentalne postavitve optične pincete je prikazana na sliki 2b). Laserski snop se najprej razširi, nato pa se mu s sistemom za vodenje snopa spremeni smer glede na želeno lego optične pasti v vzorcu. Preko posebnega zrcala, ki odbije lasersko svetlobo, prepusti pa vidno svetlobo, se snop pošlje na objektiv. Ta snop sfokusira, kar v ravnini vzorca ustvari optično past, v katero se ujame delec. Prepuščena laserska svetloba, ki jo zbere kondenzor, preko zrcala potuje na kvadrantno fotodiodo, s katero izmerijo relativno lego delca glede na središče optične pasti in iz tega izračunajo silo na delec. Za mikroskopijo vzorca je opisan elementom potrebno dodati samo še osvetlitev in kamero.

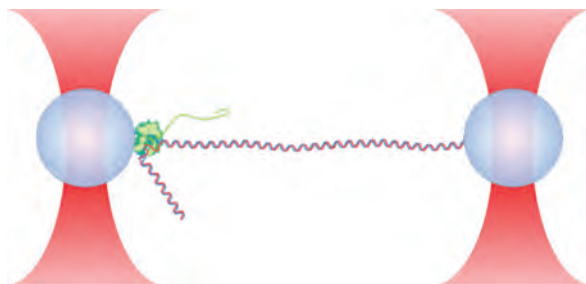
Meritve biomolekulskih interakcij

Optična pinceta je prav posebno pripravna za meritve sil med posameznimi biomolekulami. Te je treba najprej pritrditi na ustrezne »opore«. To so ponavadi steklene ali polistirenske mikrokroglice, na površino katerih s primernim kemijskim procesom vežemo želeni tip molekul. Na primer, na kroglice

premera 2 mikrometra vežemo molekule liganda, na kroglice premera 3 mikrometre pa molekule receptorja. Obe vrsti kroglic zmešamo, pod mikroskopom poiščemo dve različni kroglici in vsako ujamemo v svojo optično past. Pasti s kroglicama staknemo skupaj, da se ligand veže na receptor, nato pa pasti počasi vlečemo narazen, pri čemer se povečuje optična sila na kroglici. Ko postane ta sila malo večja od sile med biomolekulama, se vez raztrga, kar opazimo kot razdružitev kroglic. Na ta način lahko merimo mnogo različnih medmolekulskih interakcij, če je le pincetna sila večja od medmolekulske. Shema take meritve je prikazana na sliki 3.

Kot drug primer naj navedem raziskave molekulskih motorjev, molekul, ki pretvarjajo kemijsko energijo v mehansko delo in so ključne za vse aktivno premikanje živih organizmov, od subcelične ravni do premikanja celotnega organizma. Na kroglico je tako na primer mogoče vezati molekulo kinezina, motornega proteina, ki vleče tovor znotraj evkariontskih celic. Če se tako kroglico z optično pinceto prestavi do mikrotubula (znotrajcelični polimer, ki je celična »cesta«), se kinezin pripne na mikrotubul in začne korakati, kar lahko opazimo kot diskretno premikanje kroglice. S pinceto je moč vleči kroglico tudi v nasprotno smer in tako ugotoviti, s kakšno silo lahko vleče molekulski motor.

Danes optično pinceto uporabljajo za preučevanje posameznih biomolekul (na primer določanje odvisnosti sila-razteg pri DNA, RNA, polimerih pod različnimi pogoji),



Slika 3: Shema meritve sile, s katero neki encim, ki je pritrjen na levo kroglico, vleče dvoverižno molekulo DNA.



Slika 4: Mikroskopska slika množice steklenih mikrokroglic v vodi, ki so ujete v optičnih pasteh. Velikost posamezne erke je približno 10 mikrometrov. Celotni videoposnetek si lahko ogledate na spletni strani <http://tweezers.fmf.uni-lj.si/opticna-pinceta/>.

študije biomolekularskih procesov (na primer meritev adhezije med dvema bakterijama; opazovanje korakanja RNA-polimeraze, ki v procesu transkripcije kopira DNA v mR-NA), mikroeologijo – merjenje mehanskih lastnosti mehkih snovi na mikroravni, daleč najpogostejša uporaba pincete pa je natančna manipulacija in razvrščanje mikroobjektov, kar je prikazano na sliki 4.

Optična pinceta v Sloveniji

Čeprav optična pinceta temelji na razmeroma preprostih teoretičnih konceptih, je praktična izvedba optične pincete za resno raziskovalno delo precej zapletena. Na svetu obstaja manj kot deset proizvajalcev tega orodja in enega izmed močnih »igralcev« imamo tudi v Sloveniji. Podjetje Aresis, d.o.o, ki sta ga ustanovila Igor Poberaj in Dušan Babič, dva nekdanja profesorja na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani, razvija, proizvaja in pod svojo blagovno znamko prodaja optične pincete po sistemu »na ključ«. Njihove pincete (slika 5) med poznavalci veljajo kot ene izmed najboljših optičnih pincet na svetu.

V raziskovalnih ustanovah v Sloveniji imamo kar nekaj optičnih pincet: dve sta na Fa-

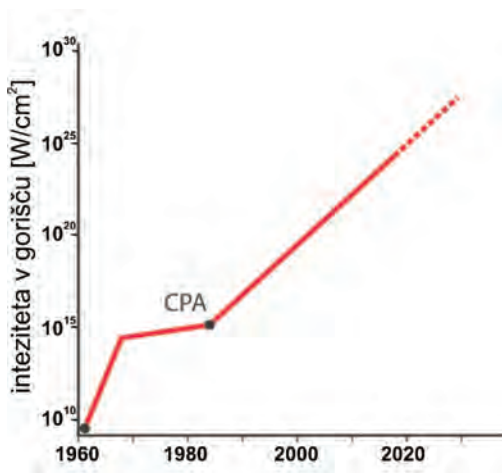
kulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani, tri na Institutu Jožef Stefan, dve na Inštitutu za biofiziko Medicinske fakultete UL, najnovejšo pa so pravkar kupili na Fakulteti za strojništvo UL.

Metoda za ustvarjanje ultrakratkih laserskih sunkov visokih intenzitet

Theodore Maiman je leta 1960 skonstruiral prvi laser, ki je oddajal šibke, milisekundo dolge sunke rdeče svetlobe. Tehnološke potrebe so razvoj laserjev nato gnale v dveh smereh. Na eni strani je bila želja po spektralno čim ožjem izviru svetlobe (torej s čim bolj stabilno in natančno določeno valovno dolžino), ki je potreben pri raznovrstnih meritvah, na drugi strani pa po kratkih in močnih laserskih sunkih, ki so na primer potrebni za lasersko obdelavo materialov. Slednje sta omogočili iznajdbi preklopa kvalitete laserskega resonatorja in uklepanja faz. Pri laserskih sunkih za obdelovanje materialov je želena čim večja intenziteta svetlobe $j = P/S$, to je razmerje med močjo svetlobe P in velikostjo površine S , na katero ta svetloba pada. Za primer, intenziteta Sončeve svetlobe na površju Zemlje na jasen dan

Slika 5: Optična pinceta slovenskega podjetja Aresis. Komercialnemu invertnemu raziskovalnemu mikroskopu sta dodana laser in sistem za vodenje snopa.





Slika 6: Povečevanje intenzitete laserskih sunkov od izuma laserja leta 1960 do danes.

znaša 1000 W/m^2 oziroma 0.1 W/cm^2 , kar je enako intenziteti laserskega kazalnika z močjo 5 mW , ki ima piko velikosti 5 mm^2 . Moč laserskega sunka izračunamo kot razmerje med energijo E in časom trajanja sunka t , torej $P = E/t$. Intenziteta sunka torej znaša $j = E/(t \cdot S)$, kar pomeni, da imajo lahko kratki sunki sicer nizkih energij velike intenzitete.

V prvem desetletju razvoja laserjev je intenziteta laserskega sunka z začetne vrednosti 10^9 W/cm^2 z razvojem laserskih ojačevalnikov narasla za pet velikostnih redov (slika 6). Hiter razvoj pa se je po letu 1970 občutno upočasnil, ker velike intenzitete hitro poškodujejo material laserskega ojačevalnika in ostale optične komponente.

Visokoenergijske sunke z intenziteto pod pragom poškodb so v sedemdesetih in osemdesetih letih prejšnjega stoletja lahko dosegli le s povečevanjem premera laserskega snopa. Za to so bili potrebni veliki ojačevalniki, kar je laserske sisteme naredilo ogromne, drage in so zaradi počasnega ohlajanja ojačevalnikov omogočali samo nizko frekvenco ponavljanja sunkov. Kot

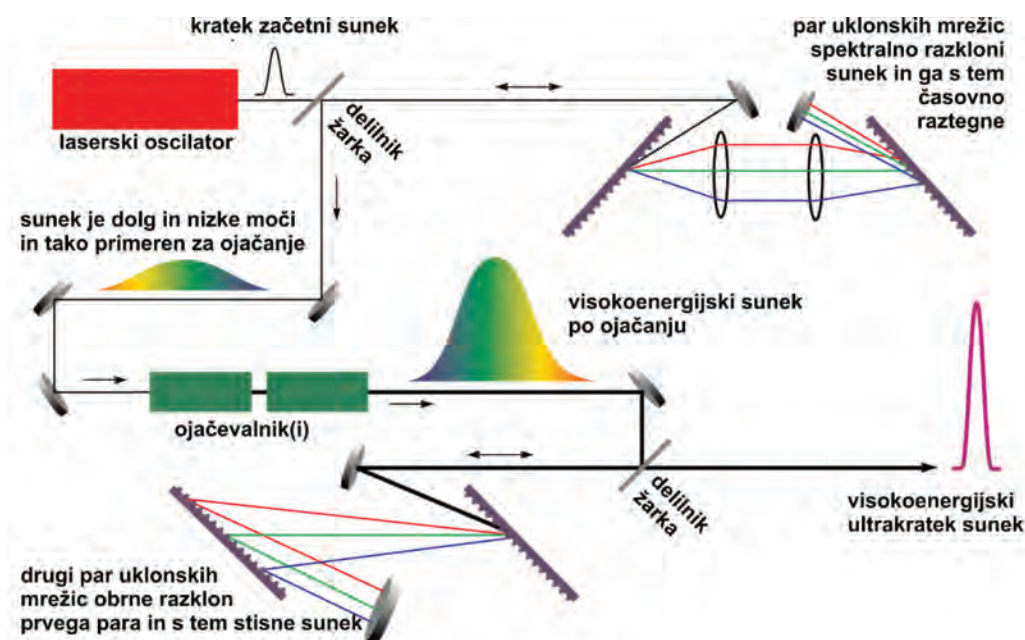
skrajni primer lahko omenimo Nacionalni laboratorij Lawrence Livermore (Kalifornija, ZDA), kjer so konec sedemdesetih let prejšnjega stoletja začeli graditi laser Nova. Sestavljalo ga je deset 180 metrov dolgih žarkovnih linij s premerom ojačevalnikov približno pol metra in je nekajkrat na dan lahko ustvaril sunek dolžine 2 nanosekundi z energijo 100 kilojoulov.

Tehnika CPA

Nov zagon razvoju kratkih laserskih sunkov visoke intenzitete sta leta 1985 omogočila Donna Strickland in Gérard Mourou z uporabo tehnike CPA (v angleščini *chirped pulse amplification*). Navdih sta dobila iz radarske tehnologije, kjer so CPA uporabljali že od šestdesetih let. Zamisel je preprosta: predstavljajte si, da morate v bloku brez dvigala iz pritličja (nizka energija) v deseto nadstropje (visoka energija) prenesti 100 kilogramov ploščic. Lahko si jih vse naenkrat naložite na hrbet (ojačevalnik) in začnete »vzpon«. Če vam bo slučajno uspelo priti do desetega nadstropja, bo vaš hrbet zagotovo poškodovan. Bolj smiselno je seveda, da tovor razdelite na manjše kose, recimo po 10 kilogramov, in potem desetkrat ponovite »vzpon«. Cilj bo dosežen, trajalo bo sicer dalj časa, a hrbet ne bo poškodovan.

Podoben postopek sta raziskovalca uporabila za ojačitev laserskega sunka: ultrakratek sunek sta najprej razširila v času, s čimer se je ustrezno zmanjšala intenziteta. Sinek sta nato ojačala, v zadnji fazi pa sta sunek stisnila nazaj na začetno dolžino, kar je posledično prineslo zelo veliko intenziteto.

Za razumevanje procesa ojačenja je pomembno dejstvo, da je za razliko od neprekinjenega vira laserske svetlobe (na primer laserski kazalnik), pri kateremu je frekvenca oziroma valovna dolžina (torej barva) natančno definirana, kratek sunek sestavljen iz množice frekvenc oziroma valovnih dolžin. V svojem eksperimentu sta raziskovalca 150 pikosekund trajajoči laserski sunek z energijo 1 nanojoula poslala po 1,4 kilometra



Slika 7: Ustvarjanje ultrakratkih visokoenergijskih sunkov z metodo CPA.

dolgem optičnem vlaknu. Ker se različne valovne dolžine svetlobe po snovi širijo z različnimi hitrostmi (temu strokovno rečemo disperzija), se je nizkofrekvenčni (rdeči) del sunka širil hitreje od visokofrekvenčnega (modrega) dela. Na izhodu iz vlakna sta posledično dobila 300 pikosekund dolg čivk (angl. *chirp*), sunek, pri katerem se je – tako kot pri čivkanju ptičev – frekvenca spreminjala s časom. V drugem koraku sta čivk ojačila, da sta dosegla energijo 1 milijoule, nato pa ga s kompresorjem sunkov v času skrčila na dolžino 2 pikosekundi.

Dolgo optično vlakno za transformacijo kratkega sunka v dolg čivk ni zelo praktično, zato ga je kmalu nadomestil par uklonskih mrežic. Z njim so leta 1987 demonstrirali razteg sunka trajanja 85 femtosekund na 85 pikosekund in skrčitev nazaj na začetno dolžino (Pessot, Maine, Mourou, 1987) ter pri tem poudarili, da bo to v prihodnosti omogočilo laserske moči v območju petavatov. Takšna – danes standardna – konfigu-

racija CPA je prikazana na sliki 7. Ultrakratek sunek iz laserskega oscilatorja preko delilnika žarka najprej potuje na prvi par uklonskih mrežic, ki sta postavljeni v obliki grške črke Λ . Na prvi mrežici se snop razkloni, optika ga usmeri na drugo mrežico, ki deluje ravno obratno – različno usmerjene frekvenčne sestavine spet skombinira v en snop. Ta se v zrcalu odbije naravnost nazaj, tako da se proces razklona in kombinacije še enkrat ponovi. Pri potovanju sunka skozi tako postavljeni par mrežic prepotuje rdeča svetloba krajšo pot od modre svetlobe, kar glede na to, da je hitrost širjenja svetlobe po praznem prostoru neodvisna od valovne dolžine, pomeni, da rdeči del spektra v času prehiti modri del spektra. Rezultat je čivk, po trajanju lahko do 10.000-krat daljši od vhodnega svetlobnega sunka.

Delilnik žarka čivk odbije in ga usmeri skozi enega ali več ojačevalnikov, pri čemer se mu energija poveča, a seveda tako, da njegova intenziteta ostane pod pragom poškod-

be. Ojačani čivk je na koncu pod kotom usmerjen na drugi par uklonskih mrežic, ki sta tokrat postavljeni vzporedno. Snop se na prvi mrežici razkloni, druga mrežica pa sestavine z različnimi valovnimi dolžinami usmeri tako, da padajo pravokotno na ogledalo. Posledično posamezne sestavine potujejo nazaj po natanko istih poteh, kar pomeni, da se na prvi mreži skombinirajo nazaj v en snop. Pri opisanem procesu prepotujejo dolgovalovne sestavine daljšo pot od kratkovalovnih, kar pomeni, da bi modri del spektra rdečega prehiteval v času, če bi na ta par mrežic prišel sunek, ki bi imel vse sestavine sočasne. Pri tehniki CPA pa imamo opravlja s čivkom, v katerem rdeči del spektra prehiteva modrega, zato se lahko z ustrezno nastavitvijo mrežic to prehitevanje kompenzira, tako da so vse sestavine spet izravnane. Rezultat je ultrakratki sunek z ogromno močjo.

Uporaba laserskih sunkov

Ultrakratki laserski sunki visokih intenzitet so zelo primerno orodje za temeljne raziskave snovi. Sunki z dolžino pod 1 femtosekundo omogočajo raziskave dinamike elektronov znotraj atomov in molekul, ki poteka na attosekundni časovni skali. Sunkom visokih intenzitet ustreza kolosalno električno polje, pri katerem se atomi začnejo obnašati neobičajno. Bodoči »rekorder« je laser 4 Aton, ki ga evropski znanstveniki trenutno gradijo pri Pragi. Laser bo proizvajal sunke z dolžino 150 femtosekund in energijo 2 kilojoula, kar pomeni, da bo moč sunkov 10 petavatov (PW). Za primerjavo, toplotna moč nuklearne elektrarne v Krškem je približno 2 gigavata (GW), torej 5-milijonkrat manj!

Laserjev z visokointenzivnimi ultrakratkimi sunki najpogosteje uporabljajo v industriji in medicini, in sicer za natančno odstranjevanje materiala. Zaradi kratkega trajanja sunka je segrevanje materiala minimizirano, zato je okolica mesta, na katero je laser sfokusiran, praktično nepoškodovana. V medi-

cini lahko tako z njimi s submikrometrsko natančnostjo odstranjujejo nezaželeno tkivo, pri tem pa je zaradi brezkontaktnega načina delovanja zmanjšana možnost okužb. Ocenjeno je, da z njimi vsako leto opravijo milijone operacij kratkovidnosti, dolgovidnosti ali astigmatizma očesne leče. Namesto s skalpelom pri metodi LASIK operater naredi rezo v roženico z računalniško vodenim femtosekundnim laserjem, nato pa skozi nastalo odprtino z ultravijoličnim laserjem s fotoablacijo preoblikuje površino sredice roženice in tako spremeni njeno zakrivljenost ter s tem dioptrijo očesa. Zadnji dosežek na področju laserske operacije kratkovidnosti je metoda SMILE, pri kateri je uporabljen samo en femtosekundni laser. Ta v tkivo roženice vreže tanek okrogel disk primerne oblike ter v roženico napravi 4 milimetre dolgo režico, skozi katero operater disk potegne ven. S tem je dioptrija odpravljena, okrevanje pa še hitrejše kot pri operaciji LASIK.

Literatura:

- Ashkin, A., 1970: *Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure*. *Physical Review Letters*, 24: 156–159.
- Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E., Chu, S., 1986: *Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles*. *Optics Letters*, OL, 11: 288–290.
- Ashkin, A., Dziedzic, J. M., 1987: *Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria*. *Science*, 235: 1517–1520.
- Laboratorij za eksperimentalno fiziko mehke snovi, <http://tweezers.fmf.uni-lj.si/opticna-pinceta/>, <http://tweezers.fmf.uni-lj.si/opticna-pinceta/>. (Dostop 1. 11. 2018.)
- Optična pinceta, https://sl.wikipedia.org/w/index.php?title=Opti%C4%8Dna_pinceta, https://sl.wikipedia.org/w/index.php?title=Opti%C4%8Dna_pinceta.
- Pessot, M., Maine, P., Mourou, G., 1987: *Compression of amplified chirped optical pulses*. *Optics Communications*, 62: 419–421.
- The Nobel Prize in Physics 2018, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/>, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/summary/>. (Dostop 1. 11. 2018.)