

## NOBELOVA NAGRADA ZA FIZIKU

**Svjetlost koja zaustavlja čestice. Intenzitet zračenja usporediv s površinom Sunca. Deveti put u dvadeset godina nagrada ide istraživanju i primjeni lasera.**

**i**

Silvije Vdović i Nataša Vujičić / 6. listopada 2018. / [Aktualno](#) / čita se 16 minuta



Arthur Akin, Gerard Mourou (Jeremy Barande/Ecole Polytechnique via AP), Donna Strickland (via [University of Waterloo](#))

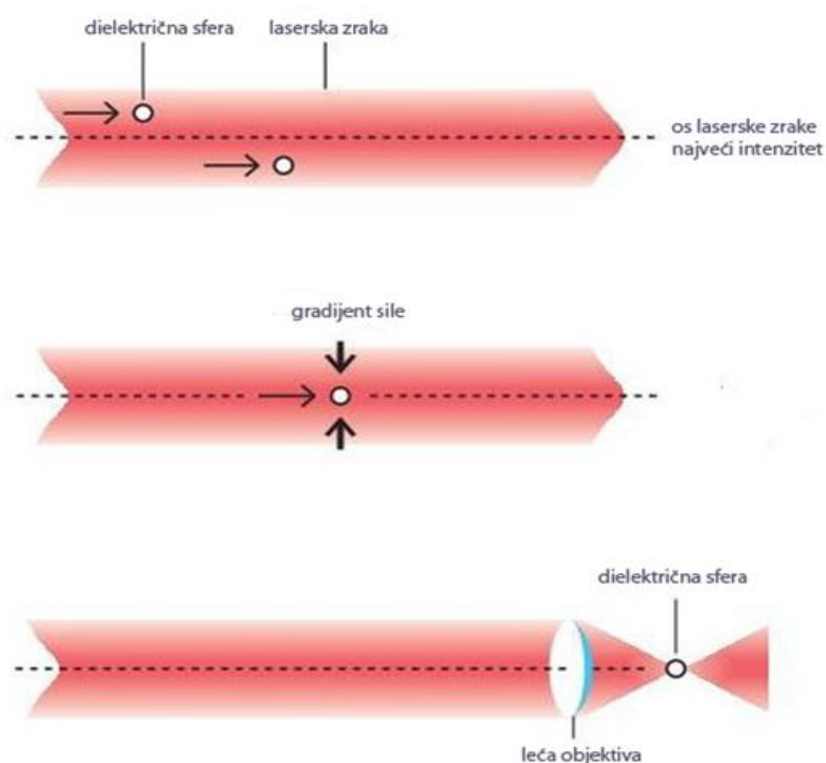
**Ashkin je dobio Nobelovu nagradu za otkriće optičke pincete u svrhu zarobljavanja i manipulacije česticama, atomima i živim stanicama. Mourou i Strickland su podijelili nagradu za razvoj tehnike pojačavanja laserskih pulseva u femtosekundim laserskim pojačalima (femtosekunda je milijunti dio milijarditog dijela sekunde), pišu Silvije Vdović i Nataša Vujičić, Institut za fiziku; Centar za napredne laserske tehnike (CALT)**

Arthur Ashkin, Gérard Mourou i Donna Strickland ovogodišnji su dobitnici Nobelove nagrade iz fizike za njihova *'revolucionarna otkrića u području laserske fizike'*. Arthur Ashkin, sa svojih 96 godina, najstariji je dobitnik Nobelove nagrade, podijelit će je s prof. Gérard Mourouom s École Polytechnique u Francuskoj i prof. Donnou Strickland sa Sveučilišta Waterloo u Kanadi. Ashkin je dobio Nobelovu nagradu za otkriće optičke pincete u svrhu zarobljavanja i manipulacije česticama, atomima i živim stanicama. Mourou i Strickland su podijelili nagradu za razvoj tehnike pojačavanja laserskih pulseva – tzv. Chirped Pulse

Amplification (CPA), koja je postala standardna tehnika za povećanje energije pulseva u femtosekundim laserskim pojačalima.

Ovo je deveti put u zadnjih dvadeset godina da Švedska kraljevska akademija znanosti prepoznaje i nagrađuje znanstvene aktivnosti koje su direktno povezane uz lasere i njihovu primjenu u znanosti. Iako su, od svog otkrića daleke 1960. godine na ovamo, laseri postali naša svakodnevnica, iako su sveprisutni u laboratorijima, medicinskim ordinacijama i industrijskim postrojenjima, njihov utjecaj na sveukupno ljudsko znanje i korist za čovječanstvo se još uvijek može nagraditi najvećim priznanjem u znanosti – Nobelovom nagradom. U nastavku teksta pokušat ćemo objasniti zašto je mogućnost kontrole gibanja objekata laserskim zrakama i mogućnost povećanja snage laserskih pulseva ostavila tako važan trag u znanosti i koje su sagledive i nesagledive posljedice tih otkrića.

## Optička stupica – očigledno neočigledna sila



Slika shematski prikazuje način rada radijacijskog tlaka te zarobljavanja čestice u fokusu laserske zrake. Ideja na granici sa SF da se uhvati objekt i zadrži na jednom mjestu pomoću svjetlosti, uz pomoć laserske pincete postala je stvarnost koja nam omogućava manipulaciju različitim objektima – od cijelih stanica do individualnih molekula. Preuzeto i prilagođeno iz [1].

Arthur Ashkin je još 1970. godine izučavao i objasnio utjecaj radijacijskog tlaka u laserskom zračenju na kretanje objekta. Glavni izazov u istraživanju optičkih sila bilo je nalaženje mehanizma kojim će se izbjeći zagrijavanje objekata. Ashkin je problem riješio obasjavanjem prozirnog, neapsorbirajućeg medija: mikrometarskih dielektričnih sfera uronjenih u vodu. Rezultate svog istraživanja objavio je u članku *Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure* iz 1970. godine u časopisu *Physical Review Letter* (doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.24.156>).

U tom radu Ashkin izvještava o ubrzavanju mikrometarskih sfera u smjeru rasprostiranja laserske zrake, ali i manje intuitivan rezultat koji proizlazi iz postojanja sile koja usmjerava kuglice prema središtu, odnosno prema osi laserske zrake. S obzirom na to da se svjetlost, dakle i lasersku zraku, može smatrati velikim brojem (rojem) fotona koji imaju moment gibanja u točno određenom smjeru (u smjeru rasprostiranja), svaki put kad foton promijeni svoj smjer gibanja, on predaje impuls sile na objekt od kojeg se odbije. Ta sila koju objekt osjeti zbog promjene impulsa fotona zove se **tlak zračenja**.

U navedenom članku, Ashkin uz pomoć osnovnih zakona geometrijske optike (zakona loma i zakona refleksije, koju zove defleksijom) matematički izvodi dijagram sila za dvije prostorne udaljenosti od središta laserske zrake – za mjesto gdje je kuglica bliže središtu zrake i za mjesto gdje je kuglica dalje od središta laserske zrake. Laserska zraka ima idealno Gaussovu raspodjelu intenziteta, te je njena os, njeno središte, područje jačeg intenziteta, koji trne kako se od njega udaljavamo.

Iz dijagrama sila koje djeluju na sferu, rezultanta sila dolazi kao rezultat loma i defleksije dvije zrake na različitim dijelovima zakrivljene plohe sfere, na prijelazu iz medija nižeg indeksa loma – vode, u medij većeg indeksa loma – sfere, te na izlazu iz medija većeg indeksa loma – sfere, u medij manjeg indeksa loma – vode, ima dvije komponente – komponentu sile koja ubrzava česticu prema središtu zrake te komponentu sile koja usmjerava česticu u smjeru gibanja fotona, dakle od izvora zračenja.

Upravo takvo ponašanje je eksperimentalno i opaženo: sfere od lateksa su se gibale Brownovim gibanjem u posudi s vodom. U trenutku dok je laserska zraka prolazila kroz medij, sfere bi se počele usmjereno gibati – prema središtu (osi) laserske zrake i u smjeru zrake. Zaključak je da se sfere, zbog svog indeksa loma koji je veći od indeksa loma medija (vode), ponašaju kao fokusirajuće (sabirne) leće, pri čemu je smjer rezultante sile koju osjeća sfera – a koja nastaje

lomom i defleksijom svjetlosti – prema središtu laserske zrake, gdje je zraka najvećeg intenziteta.

*Ukoliko bi netko imao dvije potpuno identične laserske zrake, suprotnih smjerova, koje bi se negdje presijecale, one bi tvorile optičku stupicu za neapsorbirajuća tijela, zahvaljujući silama koje proizlaze iz tlaka zračenja, a koje bi se u toj točki prostora poništile i utjecale na mirovanje tijela. Ashkin je testirao i ovu hipotezu*

Da bi dokazao hipotezu po kojoj bi se, u drugim okolnostima u kojima umjesto dielektričnih sfera načinjenih od materijala indeksa loma većeg od indeksa loma vode, imamo sfere materijala nižeg indeksa loma takve kuglice ponašale kao defokusirajuće (rasipne) leće, Ashkin je ponovio eksperiment s mjehurićima zraka disperziranim u mediju velike viskoznosti – 80 postotnoj vodenoj otopini glicerola. Pokazao je da se mjehurići zraka veličine otprilike 8 mikrometara kreću u smjeru prostiranja laserske zrake, no u smjeru udaljavanja od osi zrake. I ne samo to – uz primjenu Stokesovog zakona za viskozni medij, uz poznavanje snage lasera, polumjera laserske zrake i dimenzije sfera, Ashkin je izračunao i teorijsku vrijednost brzine gibanja sfera koja je odgovarala eksperimentalnom rezultatu.

Ovim radom, Ashkin je pokazao da eksperimentalno opažena sila u smjeru prema središtu osi zrake i u smjeru prema naprijed dovodi do stvaranja pravog optičkog potencijala koji je rezultat činjenice da postoji tlak zračenja. Ukoliko bi netko imao dvije potpuno identične laserske zrake, suprotnih smjerova, koje bi se presijecale negdje u prostoru, one bi tvorile optičku stupicu za neapsorbirajuća tijela u toj točki prostora, zahvaljujući silama koje proizlaze iz tlaka zračenja, a koje bi se u toj točki prostora poništile i utjecale na mirovanje tijela. Ashkin je testirao i ovu hipotezu, ponavljajući eksperiment sa sferama disperziranim u vodi i opazio je sljedeće: sfere obasjane samo jednom laserskom zrakom imaju veliku brzinu gibanja u smjeru prema središtu zrake i u smjeru zrake. Ako se potom uvede dodatna zraka, jednakog intenziteta, ali suprotnog smjera, sfera se počne zaustavljati te se konačno zarobi u optičku stupicu, tj. ostane zatočena u jednoj točki prostora. Ukoliko se bilo koja od zraka zaustavi, sfera se ubrza u smjeru rasprostiranja zrake koja je ostala prisutna u mediju. Ponovnim obasjavanjem sfere iz oba smjera, ona se vraća u ravnotežni položaj u kojem se i zaustavlja.

*Atomi i molekule su poprilično prozirni. Ako ih se obasja zračenjem čija je frekvencija točno ugođena na frekvenciju atomskog prijelaza, atom će apsorbirati svjetlost, foton, i dobiti*

*moment u smjeru gibanja fotona. To se kasnije iskoristilo za lasersko hlađenje atoma u magneto-optičkoj stupci.*

Ashkina je posebno zanimala primjena ovog otkrića u atomskim sustavima, odnosno manipuliranje atomskim i molekulskim sustavima primjenom radijacijskog tlaka iz laserskog zračenja. Naime, atomi i molekule su po svojoj prirodi poprilično prozirni mediji. No, ukoliko ih se obasja zračenjem čija je frekvencija točno ugođena na frekvenciju atomskog prijelaza, udarni presjek za interakciju atoma s laserskom svjetlošću postaje deset milijuna puta veći od njegovog geometrijskog presjeka. To znači da će atom apsorbirati svjetlost, foton, i dobiti moment u smjeru gibanja fotona. No, prilikom emisije fotona, fotoni se emitiraju nasumično u svim smjerovima pa je ukupna sila na atom u smjeru prostiranja zrake. Ashkin je u ovome vidio veliku mogućnost za primjenu u istraživanju i kontroliranju atomskih sustava i molekula, što se kasnije iskoristilo za lasersko hlađenje atoma u magneto-optičkoj stupci.

*Mnogi su smatrali da je Arthur Ashkin nepravедno zakinut jer je upravo mehanizam tlaka zračenja odgovoran za proces usporavanja atoma u optičkoj stupici. Možemo reći da je dodjelom Nobelove nagrade 2018. godine ispravljena nepravda učinjena dva desetljeća ranije.*

Za demonstraciju prve magneto-optičke stupice za dobivanje hladnih atoma u submikrokelvinskom području su Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji i William Phillips dobili Nobelovu nagradu iz fizike 1997. godine. Mnogi su smatrali da je Arthur Ashkin nepravедno zakinut jer je upravo mehanizam tlaka zračenja odgovoran za proces usporavanja atoma u optičkoj stupici. Možemo reći da je dodjelom Nobelove nagrade Arthuru Ashkinu 2018. godine ispravljena nepravda učinjena dva desetljeća ranije.

Naime, Ashkin je godinama prije Nobelove nagrade za magneto-optičku stupicu surađivao s kolegom iz Bell Laboratorija, Stevenom Chuom, na problemu optičke manipulacije sitnim dielektričnim česticama u polju fokusirane laserske zrake. U radu objavljenom u *Optics Letters* *Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles* iz 1986. (doi: <https://doi.org/10.1364/OL.11.000288>) prvi put su demonstrirali i objasnili učinak fokusiranog laserskog zračenja na uhvat sitnih kuglica raspršenih u mediju nižeg indeksa loma (voda). U sličnom eksperimentu kao i prethodno opisanom, uveli su lasersku zraku u tekući medij, fokusirali je lećom objektiva i opazili da dielektrične kuglice ulaze u žarište laserske zrake, no da se ne nastavljaju gibati u smjeru zrake, već da ostaju zatočene u tom žarištu.

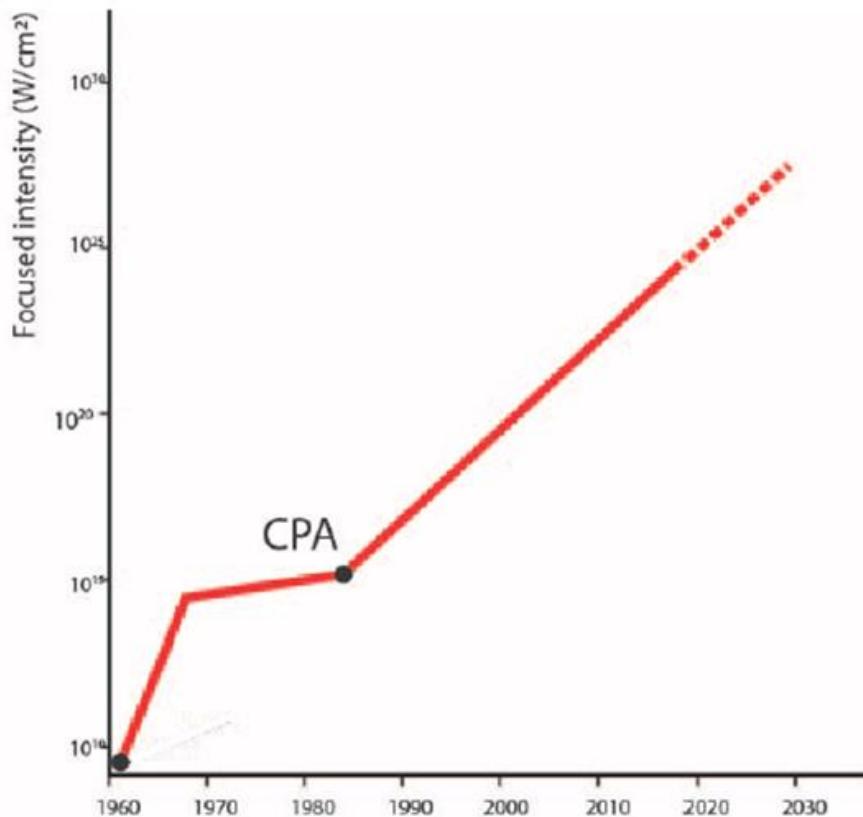
*Za razliku od svojih kolega, Ashkin je vidio velik potencijal u primjeni optičkih pinceta u biologiji. Krajem osamdesetih godina prošlog stoljeća, demonstrirao je primjenu optičke stupice na viruse i žive stanice, poput bakterija, pri čemu je koristio infracrveno zračenje niske energije ne bi li izbjegao termalno zagrijavanje i uništenje živih uzoraka*

To je bila prva demonstracija optičke pincete. Razlog zarobljavanja čestica je činjenica da je prijenos impulsa raspršenog zračenja na uhvaćenoj kuglici takav da proizvodi silu čiji je rezultatni smjer u smjeru zadržavanja u žarištu zrake, odnosno takav da poništava učinak prijenosa impulsa fotona u smjeru zračenja. Na taj način, čestica ostaje zarobljena u optičkoj pinceti. Svaki put kad žarište laserske zrake promijeni svoj položaj, zarobljena čestica prati taj pomak te ostaje i dalje čvrsto zarobljena u žarištu zrake. Na temelju tih spoznaja, Chu je usmjerio svoj daljnji rad prema zarobljavanju i hlađenju atoma s laserima, što je rezultiralo spomenutom Nobelovom nagradom.

Za razliku od svojih kolega, Ashkin je vidio velik potencijal u primjeni optičkih pinceta u biologiji. Krajem osamdesetih godina prošlog stoljeća, demonstrirao je primjenu optičke stupice na viruse i žive stanice, poput bakterija, pri čemu je koristio infracrveno zračenje niske energije ne bi li izbjegao termalno zagrijavanje i uništenje živih uzoraka. U radu iz 1987. pod naslovom *Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria* objavljenom u časopisu Science (doi: 10.1126/science.3547653) Ashkin je, zajedno sa suradnikom Joseph M. Dziedzicem, demonstrirao prvu primjenu laserske pincete na bakteriju E. coli i virus mozaika duhana.

Optička pinceta postala je neizostavan svjetlosni alat za izučavanje živih stanica i njihovih dijelova te procesa koji se u njima odvijaju. Znanstvenici svakodnevno koriste ovu tehniku u istraživanjima u području biofizike i biologije, a nama ostaje za pamćenje da je pionirski rad Arthura Ashkina u izučavanju tlaka zračenja i višegodišnje istraživanje fenomena koji iz njega proizlaze, usavršavanje eksperimentalnih postava i širenjem mogućnosti primjene ove laserske tehnike ostavilo nezaboravan trag na znanost i istraživanje. To je razlog zašto je Arthur Ashkin dobio Nobelovu nagradu iz fizike.

## Laseri ekstremni u svakom pogledu – kako je jedno elegantno rješenje promijenilo svijet



Prikaz povijesnog razvoja tehnologije pulsnih lasera kroz rast vršne snage lasera. Nakon početnog snažnog napretka u 60tim godinama slijedeće desetljeće obilježila je stagnacija. Nakon otkrića Chirped Pulse Amplification tehnike 1985. godine trend rasta je bitno ubrzan i traje i danas. Preuzeto iz [\[ii\]](#).

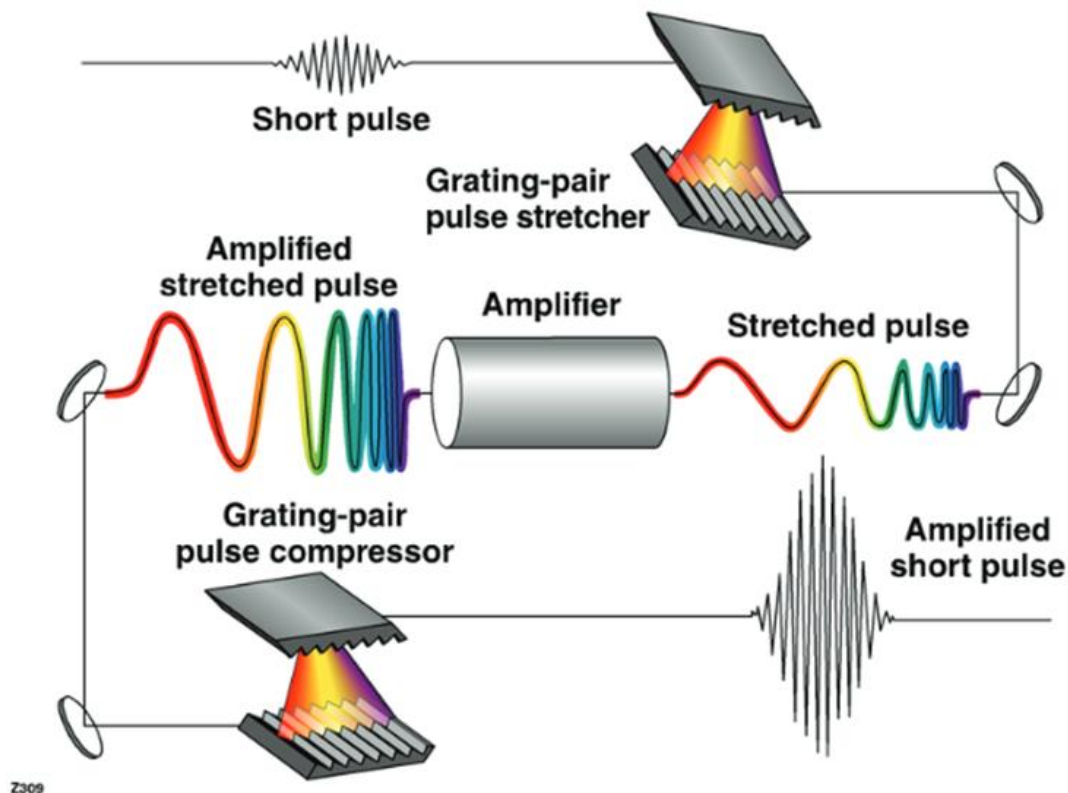
Stvaranje laserske svjetlosti što veće snage i intenziteta jedan je od najvažnijih ciljeva laserske tehnologije kojem znanstvenici teže još od izuma lasera 60-tih godina prošlog stoljeća. Povijesno gledano, rješenje se tražilo razvijanjem metoda stvaranja što kraćih laserskih pulseva. Tehnike razvijene 60-tih godina prošlog stoljeća omogućile su stvaranje pulseva vršne snage reda veličine gigavata čime su stvoreni preduvjeti za istraživanja nelinearnih optičkih efekata kao što su stvaranje viših harmonika, viševalno miješanje, samofokusiranje, stimulirano Raman raspršenje itd. Osnovni preduvjet pojave nelinearnih optičkih efekata je da jakost električnog polja laserske svjetlosti (svjetlost je elektromagnetski val) mora biti usporediva sa električnim poljem koje veže elektrone unutar atoma.

Ironično, isti razlog koji je omogućio istraživanje novih fenomena usporio je daljnji napredak u razvoju laserskih izvora još veće snage koji bi npr. omogućili stvaranje laserske plazme i razvoj novih područja istraživanja kao što je relativistička optika. Tipično se pojačanje pulseva odvija u odgovarajućem kristalu (najčešće titan dopiran safir) u kojem je optičkim putem pohranjena energija koju puls koji pojačavamo treba „pokupiti“. Problem nastaje kada su ti pulsevi toliko kratki da, zbog svoje velike snage koja je koncentrirana u jako malom vremenskom rasponu, uzrokuju fizička oštećenja kristala, kroz efekt samofokusiranja i filamentacije laserske zrake u kristalu. Smanjenje intenziteta pulsa nije rješenje zbog posljedičnog drastičnog smanjenja efikasnosti procesa pojačanja te se činilo kako će biti nemoguće razviti tehnologiju do stupnja koji bi omogućio izradu pouzdanih laserskih izvora ultrakratkih (pikosekundnih i femtosekundnih) pulseva koji bi se mogli koristiti i izvan najnaprednijih znanstvenih instituta.

*Profesor Gérard Mourou idejni je začetnik europskog projekta Extreme Light Infrastructure (ELI) čiji je cilj izgradnja laserskih sustava koji će svojim karakteristikama nadmašiti sve postojeće lasere. Planirana vršna snaga ovih lasera bit će desetak petavata (deset milijuna milijardi vata) što odgovara intenzitetu zračenja većem od zračenja površine Sunca.*

Strickland i Mourrou na svoju revolucionarnu ideju došli su posudivši koncept nešto ranije razvijen u radarskoj tehnologiji gdje je jedan od problema bio kako povećati domet i preciznost radarske detekcije.<sup>[iii]</sup> Veći domet ostvariv je povećanjem snage radio valova, dok se preciznost može povećati slanjem kratkih pulseva radio valova. Glavna tehnološka prepreka bila je u razvoju odgovarajućih pojačala signala koji bi davali mikrovalno zračenje željenih karakteristika što je riješeno korištenjem rastegnutih pulseva kako bi pojačalo radilo smanjenom snagom u duljem vremenskom periodu dok se skupljanje pulseva, ukoliko je bilo potrebno, radilo nakon detekcije povratnog zračenja. Chirped Pulse Amplification tehnika (pojačanje rastegnutog pulsa), u pojednostavljenoj slici, svodi se na slijedeće: laserski puls koji želimo pojačati naprije se rastegne u vremenu kako bi mu se smanjila vršna snaga, zatim ga se pojača, i nakon pojačanja ponovno skрати na početnu vrijednost koristeći disperzijske optičke elemente kao što su optičke rešetke ili prizme.





Standardna konfiguracija laserskog pojačala koje koristi CPA tehniku. Prilikom vremenskog proširenja (i kasnijeg skupljanja) pulsa koriste se disperzivni optički elementi koji lasersku svjetlost prostorno razlažu po valnim duljinama (laserski puls nije monokromatski val) što uzrokuje cvrkut (chirp) odnosno činjenicu da različite valne duljine pulsa u neku točku prostora stižu u različitim vremenima. (reproducirano iz Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester)

Profesor Gérard Mourou iznimno je aktivan znanstvenik čiji je rad prepoznat i cijenjen u cijelom svijetu zbog doprinosa u područjima elektronike, optoelektronike, arheologije i medicine. Između ostaloga, idejni je začetnik europskog projekta Extreme Light Infrastructure (ELI)[\[iv\]](#) čiji je cilj izgradnja laserskih sustava koji će svojim karakteristikama – intenzitetom i kratkoćom laserskog pulsa, nadmašiti sve postojeće lasere. Planirana vršna snaga ovih lasera bit će desetak petavata (deset milijuna milijardi vata) što odgovara intenzitetu zračenja većem od zračenja površine Sunca.

*Prije samo par mjeseci Wikipedija odbila uvrstiti članak o Donni Strickland s obrazloženjem da „ne sadrži dovoljno informacija o temi“, dok je samo 90 minuta nakon objave vijesti o dobitnicima ovogodišnje Nobelove nagrade dopunjeni članak objavljen*

Donna Strickland tek je treća žena (nakon Marie Curie i Marie Goeppert-Mayer) i jedini živi ženski dobitnik Nobelove nagrade. Nagradu je podijelila sa svojim nekadašnjim suradnikom i

mentorom Gérardom Mourouom, s kojim je sredinom 80-tih godina prošlog stoljeća razvila CPA tehniku koja je omogućila povećanje snage i intenziteta laserske svjetlosti za nekoliko redova veličina i time otvorila brojna nova područja istraživanja i primjene lasera. Kao zanimljivost valja izdvojiti da je još prije samo par mjeseci Wikipedija odbila uvrstiti članak o ovoj znanstvenici s obrazloženjem da „ne sadrži dovoljno informacija o temi“<sup>[v]</sup>, dok je samo 90 minuta nakon objave vijesti o dobitnicima ovogodišnje Nobelove nagrade iz područja fizike nadopunjeni članak objavljen na Wikipediji.

I opet se vraćamo na pitanje zašto je razvoj ove tehnike toliko važan da zaslužuje Nobelovu nagradu? Osim primjene za snimanje „filmova“ koji prikazuju dinamiku molekula i kemijskih reakcija gdje se procesi odvijaju na femtosekundnoj vremenskoj skali (femtosekunda je milijunti dio milijarditog dijela sekunde) te za moguću lasersku manipulaciju kemijskim reakcijama, za što je Ahmadu Zewailu dodijeljena Nobelova nagrada za kemiju 1999. godine, novi laserski izvori zasnovani na CPA konceptu koriste se za izradu akceleratora na bazi laserski inducirane plazme koji bi jednog dana, zbog svoje kompaktnosti, mogli zamijeniti radiofrekventne akceleratora kakvi se danas koriste u bolnicama za npr. radioterapiju tumora. Nadalje, ovi laserski izvori omogućili su proboj i ubrzali razvoj područja istraživanja vezanih uz stvaranje visokih harmonika, kako bi se valne duljine laserskih izvora iz tradicionalnog područja vidljivog dijela spektra pomakle prema dubokom UV i rendgenskom području. Rezultati ovih istraživanja omogućili su razvoj tehnika za stvaranje još tisuću puta kraćih, atosekundnih laserskih pulseva, čime je omogućeno donedavno nezamislivo praćenje dinamike elektrona unutar atoma. Svoju primjenu ultrakratki laseri nalaze u znanstvenim istraživanjima s velikim potencijalom primjene kao što su razvoj novih efikasnijih katalizatora, solarnih ćelija, novih izvora energije, efikasnijih metoda spremanja podataka, te u razvoju novih lijekova. Svim navedenim istraživanjima zajedničko je da se većina najvažnijih procesa odvija na ultrakratkoj vremenskoj skali.

U posljednja tri desetljeća izvori ultrakratkih laserskih zraka našli su svoju primjenu i u brojnim područjima izvan znanosti, kao što su precizno mikrostrukturiranje te u oftamologiji za liječenje miopije (kratkovidnosti) i uklanjanje astigmatizma. Tehnološki napredak koji je svojim idejama ovaj znanstveni dvojac omogućio je razvoj brojnih novih područja istraživanja u fundamentalnoj i primijenjenoj znanosti, medicini i industriji čiji se zenit još ne naslućuje.

[i] ©JOHAN JARNESTAD/THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

[ii] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/advanced-information/>

[iii] Cook, Charles (1960). "Pulse Compression-Key to More Efficient Radar Transmission". Proceedings of the IRE. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). **48** (3): 310–316. *doi:10.1109/jrproc.1960.287599*. *ISSN 0096-8390*.

[iv] <https://eli-laser.eu/>

[v] [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Draft:Donna\\_Strickland&oldid=842614385](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Draft:Donna_Strickland&oldid=842614385).