



Nobelova nagrada za fiziku 2018. za optičku pincetu i pojačavanje laserskih pulseva

Silvije Vdović, Nataša Vujičić¹

Nobelova nagrada za fiziku 2018. dodijeljena je u području laserske fizike “za inovativne izume u području laserske fizike”. Ove godine podijelili su je Arthur Ashkin za razvoj optičkih pinceta koje koriste lasersku svjetlost za premještanje malih predmeta te Donna Strickland i Gérard Mourou za razvoj tehnika za izvođenje ultrakratkih, ultrajakih laserskih pulseva. 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, 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.

Ovogodišnja nagrada Arthuru Ashkinu je svojevrsna isprika za 1997. godinu kada je Nobelova nagrada dodijeljena Stevenu Chu, Claude Cohen-Tannoudju i Billu Phillipsu za tehniku hlađenja atoma koja počiva na istim fizikalnim principima kao i optička pinceta, na kojoj su tadašnji suradnici Chu i Ashkin radili zajedno krajem osamdesetih godina prošlog stoljeća u Bell Laboratorijima, gdje su proučavali utjecaj fotona na gibanje atoma. S obzirom 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, predaje impuls sile na objekt od kojeg se odbije. Ta sila koju objekt osjeti zbog promjene impulsa fotona zove se *tlak zračenja*. U laserskom hlađenju atoma, za istraživanje kojeg su Chu, Cohen-Tannoudji i Phillips dobili Nobelovu nagradu 1997. godine, prijenos impulsa s fotona prilikom apsorpcije u atomu služi za usporavanje gibanja atoma. Ukoliko se taj prijenos ponavlja milijardu puta svake sekunde, laser može efikasno usporiti atome od brzine zvuka do brzine od nekoliko centimetara u sekundi.

Dvadeset sedam godina prije nego što su znanstvenici dokazali da laserska svjetlost može usporiti atome, Ashkin je usporavanje i zarobljavanje objekata u optičkoj stupici pokazao na malim dielektričnim kuglicama. Naime, već tada ga je zanimalo kako radijacijski tlak iz laserskog zračenja utiče na kretanje objekta. Glavni izazov u istraživanju optičkih sila bilo je nalaženje mehanizma kojim će se izbjeći zagrijavanje objekata koje, uslijed termalnog gradijenta, stvara silu čiji je učinak nekoliko redova veličina jači od sile uzrokovane tlakom zračenja. Ashkin je problem riješio obasjavanjem prozirnog, neapsorbirajućeg medija: mikrometarskih dielektričnih sfera uronjenih u vodu. Ashkin je opazio da se mikrometarske sfere ubrzavaju u smjeru rasprostiranja laserske zrake, ali također je opazio i manje intuitivan rezultat koji proizlazi iz postojanja sile koja usmjerava kuglice prema središtu, odnosno prema osi laserske zrake. Ashkin zaključuje da prilikom sudara fotona o neapsorbirajuću kuglicu dolazi do promjene količine gibanja

¹ Autori su s Instituta za fiziku, Centar za napredne laserske tehnike – CALT u Zagrebu; e-pošta: calt@ifs.hr

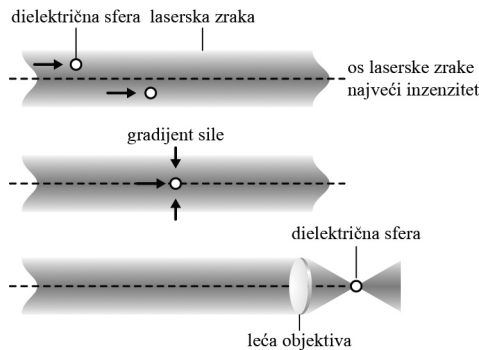
fotona, koji rezultira impulsom sile. Dakle, svjetlost djeluje optičkom silom na objekte. Uz pomoć ovog jednostavnog koncepta te uz pomoć osnovnih zakona geometrijske optike (zakona loma i zakona refleksije, koju zove defleksijom) matematički izvodi dijagram sila za dvije prostorne udaljenosti od središta 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, s najvećom vrijednošću intenziteta na osi zrake. Iz dijagrama sila koje djeluju na sferu, rezultanta sila dolazi kao rezultat loma i defleksije dvije zrake na različitim dijelovima zakrivljene plohe sfere, pri ulasku svjetlosti u sferu i prilikom izlaska iz sfere. Ta sila ima dvije komponente – jednu koja ubrzava česticu prema središtu zrake, u smjeru povećanja intenziteta laserske zrake, te drugu koja usmjerava česticu u smjeru gibanja fotona, dakle od izvora zračenja. Upravo takvo ponašanje je eksperimentalno i opaženo: kada je laser bio isključen, 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 usmjerenom gibati – prema središtu (osi) laserske zrake – dakle u smjeru gradijenta intenziteta laserske zrake i u smjeru zrake.

Ashkin je ponovio eksperiment i za slučaj kuglica indeksa loma manjeg od vode: raspršio je mjehuriće zraka 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. Rezultantna sila je bila usmjerena od središta laserske zrake, jer je lom svjetlosti na dodiru s plohom manjeg indeksa loma drugačiji nego u slučaju kuglica od lateksa pa je i rezultantna sila drugačijeg usmjerenja. Ovim eksperimentom pokazao je da se dielektrične kuglice indeksa loma većeg od indeksa loma vode kreću u smjeru povećanja (*gradijenta*) intenziteta (prema središtu zrake), dok se kuglice indeksa loma manjeg od indeksa loma otopine kreću u smjeru smanjenja intenziteta (od središta zrake) – u smjeru *negativnog gradijenta*. 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. Rezultate svog istraživanja objavio je u članku *Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure* iz 1970. godine kojeg je objavio u časopisu *Physical Review Letters*.

U istom radu, Ashkin eksperimentalno provjerava i sljedeću hipotezu: ukoliko bi netko imao dvije potpuno identične laserske zrake, suprotnih smjerova, koje bi se presjecale 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 ponovio 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 dviju zraka zaustavi, sfera se brzo ubrza u smjeru rasprostiranja zrake koja je ostala prisutna u mediju. Ponovnim obasjavanjem sfere iz oba smjera, one se vraćaju u ravnotežni položaj u kojem se i zaustavlja. Ashkina je zanimala primjena tlaka zračenja i optičke stupice na atomske i molekulske sustave. Naime, atomi i molekule su po svojoj prirodi poprilično prozirni mediji. No, ukoliko ih se obasja laserskom svjetlošću čija je frekvencija točno ugođena na frekvenciju atomskog prijelaza, udarni presjek za interakciju atoma s laserskom svjetlošću postaje deset milijuna puta veća od njegovog geometrijskog presjeka. To znači da će atom apsorbirati svjetlost, foton, i dobiti moment u smjeru gibanja fotona. No, prilikom emisije fotona, oni se emitiraju nasumično u svim smjerovima pa je ukupna sila na atom u smjeru prostiranja zrake. Princip optičke stupice usporava atom u središtu

stupice, što se kasnije iskoristilo za lasersko hlađenje atoma u magnetooptičkoj stupci, za koju je Ashkinov suradnik Steven Chu zajedno s Claude Cohen-Tannoudijem i Billom Phillipsom nagrađen Nobelovom nagradom iz fizike za 1997. godinu.

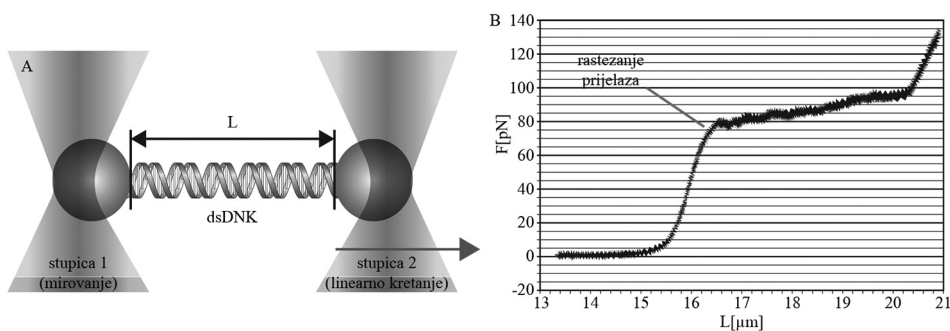
Kroz već prije spomenutu suradnju s kolegom iz Bell Laboratorija Stevenom Chuom, Ashkin je radio i na problemu optičke manipulacije sitnim dielektričnim česticama u polju fokusirane laserske zrake. U radu objavljenom u časopisu *Optics Letters* *Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles* iz 1986. objavljeni su eksperimentalni rezultati vezani za proučavanje učinka 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 objektivna 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. Razlog takvom ponašanju je činjenica da je optička sila usmjerena uvijek prema mjestu jačeg intenziteta, u ovom slučaju to je žarište zrake. Prijenos impulsa raspršenog zračenja na uhvaćenoj kuglici je 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.



Slika 1. Slika shematski prikazuje način rada tlaka zračenja te zarobljavanja čestice u žarištu laserske zrake. Ideja na granici sa znanstvenom fantastikom 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 © JOHAN JARNESTAD/THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES.

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 uzorka. U radu iz 1987. godine pod naslovom *Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria* objavljenom u časopisu *Science* Ashkin je, zajedno sa suradnikom Josephom 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. Optičke se pincete uspješno koriste u istraživanju biofizike na nivou jedne molekule. Omogućile su složena istraživanja elastičnosti i dinamike savijanja molekula poput DNK,

RNK, proteina i drugih kompleksnih biopolimera. Optičke pincete također su pomogle daljnjem razumijevanju kako “motorni proteini”, kao što su kinezin i miozin, pretvaraju kemijsku energiju u rad. Takvi biološki motori djeluju na nanometarskim udaljenostima malim silama iznosa 10^{-12} N (pN). Upravo potreba za razumijevanjem sila u ovim bjelančevinama bila je važan pokretač razvoja tehnologije optičkih pinceta osjetljivih i na tako male sile. Optičke pincete omogućile su istraživanja velikog broja mehanički aktivnih enzima, uključujući i mnoge koji su uključeni u biokemijske procese vezane za DNK molekulu. Optičke pincete također se koriste za proučavanje živih bioloških stanica. U početku su se koristile za selekciju, manipuliranje, guranje i privlačenje (*push and pull*) stanica, dakle, kao sredstvo kojim se kontrolira položaj stanice u prostoru. Kasnije je primjena optičkih pinceta omogućila i kvantitativno istraživanje procesa u živoj stanici ili oko nje, poput djelovanja sila u citosketu, proučavanju staničnih organela te složenih staničnih procesa kao što je npr. stanična dioba. Upravo zahvaljujući činjenici da se laserskom svjetlošću može rafinirano manipulirati živim stanicama *in-vivo*, došlo se do otkrića novih fenomena i rješavanja starih problema u području stanične biologije.



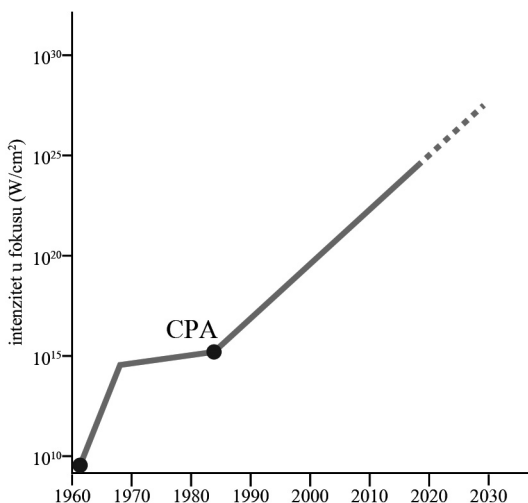
Slika 2. Mjerenja mehaničkog istezanja jedne dvostruke DNK molekule pomoću tehnike dvostruke optičke pincete (stupice). Krajevi molekule kemijski su vezani na dvije različite čestice koje su smještene u optičkoj pinceti. Pomicanjem jedne od stupica, na molekulu se primjenjuje sila. Iz položaja zamke i pomaka čestica može se izmjeriti istezanje L molekule, a izmjerena sila daje informaciju o odnosu sile i produljenja DNK molekule. Preuzeto s

<https://www.americanlaboratory.com/914-Application-Notes/180081-Optical-Tweezers-for-Single-Cell-Multicellular-Investigations-in-the-Life-Sciences/>

Iz svega navedenog, možemo reći 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 optičkih stupica i optičkih pinceta ostavilo nezaboravan trag na znanost i istraživanje. To je razlog zašto je Arthur Ashkin dobio Nobelovu nagradu iz fizike.

Znanstvenici teže stvaranju laserske svjetlosti što veće snage i intenziteta još od izuma lasera 60-tih godina prošlog stoljeća. Povijesno gledano, rješenje se tražilo razvijanjem metoda stvaranja što kraćih laserskih pulseva kako bi se dana količina energije isporučila u kraćem vremenskom prozoru čime se povećava intenzitet svjetlosti. Osnovni preduvjet pojave nelinearnih optičkih efekata je da jakost električnog polja laserske svjetlosti (svjetlost je elektromagnetski val) mora biti usporediva s električnim poljem koje veže elektrone unutar atoma. 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 miješanje više svjetlosnih valova, stvaranje viših harmonika, samofokusiranje, stimulirano Raman raspršenje itd. 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 u titanom dopiranom safiru) 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 vrlo malom vremenskom rasponu, uzrokuju fizička oštećenja kristala, kroz efekt samofokusiranja i filamentacije laserske zrake u kristalu. Smanjenjem intenziteta pulsa drastično se umanjuje efikasnost 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.



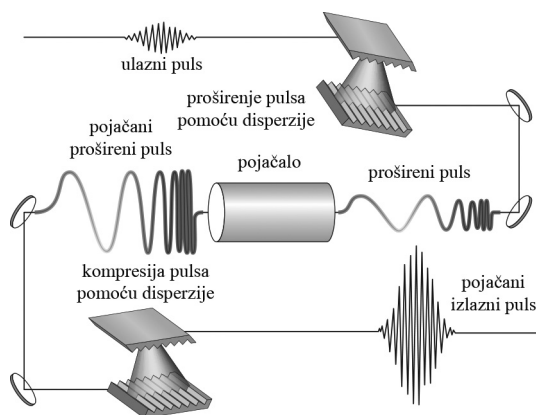
Slika 3. Prikaz povijesnog razvoja tehnologije pulsnih lasera kroz rast vršne snage lasera. Nakon početnog snažnog napretka u 60-tim godinama sljedeće desetljeće obilježila je stagnacija. Nakon otkrića Chirped Pulse Amplification tehnike 1985. godine trend rasta je bitno ubrzan i traje i danas. Preuzeto s

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

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. 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 elektroničkih 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.

Kako bi se shvatio princip rada Chirped Pulse Amplification (CPA) tehnike potrebno je najprije poznavati osnovna svojstva lasera. Iako se najčešće pogrešno smatra kako je po definiciji laser monokromatski (jednobojni) izvor elektromagnetskog zračenja, kada je riječ o pulsnim laserima, kao posljedica Fourierovih transformacija, spektar laserskog zračenja nije više uzak već mu je širina određena trajanjem pulsa u vremenu. Što

su laserski pulsevi kraći, to im je spektar širi. Korištenjem disperzivnih elemenata, kao što su recimo optičke rešetke, moguće je manipulirati laserskim pulsevima na način da se mijenja duljina puta valova različitih valnih duljina pulsa čime je moguće produljiti puls u vremenu: duljina puta koji prođu kraće (plave) valne duljine je dulja od duljine puta koji prođu dulje (crvene) valne duljine. Za laserski puls kojemu dulje valne duljine prethode kraćima kažemo da posjeduje pozitivni cvrkut (engl. chirp) jer frekvencija valova raste s vremenom prolaska pulsa, dok u suprotnom slučaju govorimo o negativnom cvrkutu. U oba slučaja kao rezultat imamo proširenje laserskog pulsa u vremenu. Kako se disperzijom očito mijenja i profil (poprečni presjek) zraka koja se širi i divergira, potrebno je upotrijebiti još jednu rešetku kako bi se poništio taj efekt i zraka zadržala svoj paralelizam. Najčešće se koristi dvostruki prolaz kroz sustav dvije rešetke kako bi se laserskoj zruci vratio početni profil. Chirped Pulse Amplification tehnika (pojačanje rastegnutog pulsa), u pojednostavnjenoj slici, svodi se na sljedeće: laserski puls koji želimo pojačati najprije se rastegne u vremenu kako bi mu se smanjila vršna snaga, zatim ga se pojača, i nakon toga ponovno skрати na početnu vrijednost koristeći disperzijske optičke elemente kao što su optičke rešetke ili prizme.



Slika 4. Pojednostavnjeni prikaz principa rada CPA tehnike koja se danas standardno koristi za pojačanje ultrakratkih pulseva. 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. (Preuzeto i prilagođeno 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 svog doprinosa u područjima elektronike, optoelektronike, arheologije i medicine. Između ostalog, idejni je začetnik europskog projekta Extreme Light Infrastructure (ELI) čiji je cilj izgradnja laserskih sustava koji će svojim karakteristikama, intenzitetom i kratkoćom laserskog pulsa, nadmašiti sve postojeće lasere. Planirana vršna snaga ovih lasera biti će desetak petavata (deset milijuna milijardi vata) što odgovara intenzitetu zračenja većem od zračenja površine Sunca.

Nakon Marie Curie i Marie Goeppert-Mayer, Donna Strickland tek je treća žena i jedina živuća ženska dobitnica Nobelove nagrade. Nagradu je podijelila sa svojim nekadašnjim suradnikom i doktorskim 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 veličine i time otvorila brojna nova područja istraživanja i primjene lasera.

Iako je ova tehnika omogućila značajni napredak u razvoju lasera postavlja se pitanje zašto je razvoj ove tehnike toliko važan da zaslužuje Nobelovu nagradu? Odgovor leži u brojnim važnim područjima znanosti, medicine i industrije gdje su ovi laseri našli svoju primjenu. U znanosti, najpoznatija primjena lasera zasnovanih na CPA tehnici koristi kratkoću ovih pulseva za spektroskopsko praćenje dinamike kemijskih reakcija, molekulskih vibracija i prijelaznih stanja 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 brojim područjima izvan znanosti, kao što su precizno mikrostrukturiranje te u oftalmologiji 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.