

# Laseri kao posljedica čudesne godine 1905.\*

**Goran Pichler**

*Institut za fiziku, Bijenička cesta 46, Zagreb*

*Goran Pichler diplomirao je i magistrirao u Zagrebu, a doktorsku disertaciju obranio je Sveučilištu u Kielu (SR Njemačka). Radi na Institutu za fiziku kao znanstveni savjetnik u trajnom zvanju u svojstvu voditelja projekta »Femtosekundna laserska spektroskopija i ultra hladne molekule«. Vodio je brojne diplomske, magistarske i doktorske disertacije. Bio je gostujući znanstvenik u JILA-i, (Boulder, Colorado, SAD) i Alexander von Humboldt Stiftung stipendist u Kielu i Garchingu pokraj Münchena. Dobitnik je državne nagrade za prirodne znanosti za 2004. godinu.*

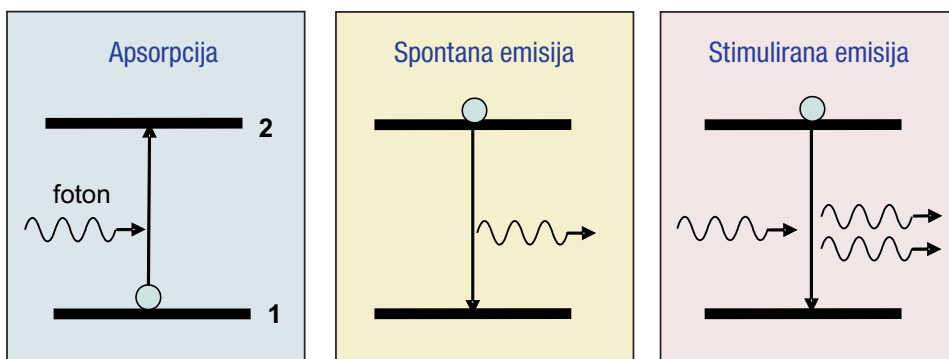
Upravo je nevjerojatno koliko dugo vremena proteče od jedne jednostavne i revolucionarne ideje do njezinog tehnološkog rođenja, pa rasta i konačno do njezine punoljetne primjene u današnje vrijeme.

Radi se naravno o Einsteinu koji je u svojoj čudesnoj godini proizveo oveću količinu znanstvenih radova, od kojih svaki zavređuje posvemašnju knjigu u kojima bi se opisale sveukupne posljedice novih ideja i spoznaja. Jedna od najvažnijih je svakako ideja o kvantiziranom elektromagnetskom polju (svjetlosti) odnosno o fotonima (Einstein, 1905). Pet godina nakon revolucionarne ideje Maxa Plancka da kvantnom hipotezom objasni zračenje crnog tijela, Einstein poopćuje tu ideju i zapravo utire put modernoj kvantnoj fizici, a kasnije i kvantnoj optici. Svojim poopćenjem uspio je objasniti fotoelektrični efekt, Stokesovo pravilo i ionizaciju atoma odnosno molekula. Najbitnije je u toj novoj slici djelovanje svjetlosti kao pojedinih kvanata, čime je Einstein vratio u život čestičnu sliku svjetlosti sir Isaaca Newtona. Ukratko, Einstein kaže: jedan kvant svjetlosti izbacuje iz metala jedan elektron (fotoelektron), jedan kvant svjetlosti uzrokuje fluorescenciju tvari na većim valnim duljinama (tj. manjim energijama), i konačno jedan kvant svjetlosti u cijelosti može ionizirati atome ili molekule.

Albert Einstein i Max Planck postali su jako dobri prijatelji i Planck je svesrdno pomagao Einsteinu u njegovoj bogatoj znanstvenoj karijeri. No Einstein, od svoje 26 godine pa sve do svoje 38 godine, nije bio posve zadovoljan svojim doprinosom kvantnoj slici svjetlosti. On je svakako želio objasniti zračenje apsolutno crnog tijela pomoću svoje korpuskularne teorije. Prihvatio se posla i 1917. godine objavio je revolucionarni rad u kojem je zaista izveo zakon zračenja apsolutno

---

\* Predavanje je održano 18. travnja 2005. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu.



**Slika 1.** Shematski prikaz tri osnovna procesa interakcije materije i zračenja (fotona).

crnog tijela, ali je pri tome morao uvesti u fiziku jedan posve novi pojam. Stimuliranu emisiju (Einstein, 1917).

Zračenje apsolutno crnog tijela na bilo kojoj temperaturi posjeduje karakteristiku detaljne ravnoteže, što znači da je svaki proces u jednom smjeru izjednačen procesom u suprotnom smjeru. Broj događaja apsorpcije kvantata svjetlosti morao bi biti jednak broju događaja emisije svjetlosti. To je svakako točna postavka, ali pri tome uobičajena spontana emisija nije bila dovoljna da se dobije traženi zakon zračenja apsolutno crnog tijela. Tek kada se Einstein dosjetio kako mora uvesti jedan novi emisijski fenomen, kako bi dobio Planckov zakon, osjetio je nužnost objasniti svekolike posljedice koje taj fenomen nosi sa sobom. On je pretpostavio postojanje prisilne (stimulirane) emisije, u kojoj jedan kvant svjetlosti nailazi na atom koji se već nalazi u pobuđenom stanju, i prisiljava ga na emisiju istovrsnog fotona. Dakle, ta emisija novog kvanta svjetlosti ima isti smjer, energiju i polarizaciju kao i upadni kvant svjetlosti. To je ujedno najvažnija pretpostavka za rad masera i lasera, kojima se danas služimo sve više.

Dugo i predugo vremena je trebalo za razvoj masera (Nobelova nagrada za fiziku 1964. godine), a onda i lasera (T. Maiman, 1960. godine). Pokojni nobelovac Arthur Schawlow je to jednostavno objasnio: početkom dvadesetog stoljeća pa sve do njegove sredine tehnologija izrade rezonatora za elektromagnetsko polje nije bila razvijena. Posebno se to odnosi na optički maser ili laser (light amplification by stimulated emission of radiation) kako ga danas nazivamo, gdje jednostavan rezonator čine dva paralelna zrcala odgovorna za stvaranje lavine fotona iste vrste, dakle istog smjera, valne duljine (iste energije) i polarizacije.

Premda je prošlo već 45 godina od prvog lasera na kristalu rubina, razvoj tehnike, tehnologije, pa čak i fizike lasera ni izdaleka nije usporen. Ovogodišnja Nobelova nagrada za fiziku upravo je vrlo sretno pogođena s međunarodnom godinom fizike, kao obilježavanje stogodišnjice čudesne godine 1905. Podijeljena je na dva dijela. Jednu polovicu dobio je Roy Glauber za objašnjenje korelacije fotona i opisivanje koherentnih polja i konačno uvođenjem neklasičnih izvora svjet-

losti, čime je zapravo utro put kvantnoj optici, koja se danas vrlo bujno razvija u pravcu optičkih telekomunikacija, kvantnog računanja i stvaranja novih akceleratora s ultrakratkim pulsevima moćnih lasera. Druga polovica je dodijeljena dvojici eksperimentalnih fizičara Johnu (Jan) Hallu i Theodoru Hänschu za revolucionarnu primjenu lasera s frekventnim češljem (frequency comb) u najpreciznijim mjerenjima fundamentalnih atomskih konstanti.

Frekventni češalj dakle ima oblik češlja i to je sve u čemu se vidi sličnost, a sve ostalo je kvantna optika povezana sa svojstvom laserskog rezonatora da podržava oscilacije ne samo jedne valne duljine, već veliki broj njih, sto tisuća i više. Kada se načini (modovi) titranja svih tih različitih valnih duljina prikažu kao fotoni, onda zamišljamo kako oni nasumice prelaze putanju od jednog do drugog zrcala laserskog rezonatora. No ukoliko se svi fotoni nekako sabiju u isti prostorni element i tako svi zajedno putuju od jednog do drugog zrcala, tada će nastati sinkroni efekt, koji rezultira ogromnim snagama lasera i relativno velikim repetitivnostima pulseva. Nakon jednokratnog obilaska rezonatora svi zajedno djelomice prolaze kroz jedno od zrcala rezonatora, i nakon svakog novog obilaska ponovno se javlja jaki laserski puls. Ovisno o veličini rezonatora ta repetitivnost pulseva može doseći i do milijarde pulseva u sekundi, što znači da su dva susjedna pulsa u vremenu razmaknuta za svega jednu nanosekundu. Značajno je naglasiti da je taj gigantski puls sazdan od milijun »lasera« koji obitavaju unutar jednog laserskog rezonatora. Razlika u frekvenciji dva susjedna »lasera« iznosi 1 GHz, što je jednako repetitivnosti pulseva. Ta čudesna relacija, koja izjednačava učestalost ponavljanja pulseva i razliku frekvencija susjednih modova lasera, s vrlo velikom se uspješnošću koristi u preciznim mjerenjima.



**Slika 2.** Frekventni češalj sazdan od modova rezonatora međusobno udaljenih za  $c/2L$  (Hz).

Od samog početka pojave lasera na sceni svjetske javnosti, maštovite glave fizičara razvile su nove metode laserske spektroskopije, koje su se poslužile sve većim brojem novopronađenih vrsta lasera. No tek je 1967. godine nastala posve nova situacija, kada su na dva mjesta u svijetu nezavisno ponuđena rješenja za laser kojem se valna duljina mogla neprekinuto mijenjati unutar nekog spektralnog intervala. Tek tada je rođena prava laserska spektroskopija, koja danas zauzima istaknuto mjesto u atomskoj i molekularnoj fizici, a posebno je zastupljena u fotokemiji i fotobiologiji.

Laseri se primjenjuju pri obradi različitih materijala, plastike, metala, keramike. Koriste se za zavarivanje, rezanje, bušenje i gotovo sve što se prije moglo zamisliti sada naprosto ide s laserom. Naravno da pri tome treba odabrati laser, njegovu valnu duljinu, snagu, repetitivnost, ako se radi o pulsnom laseru, a ponekad

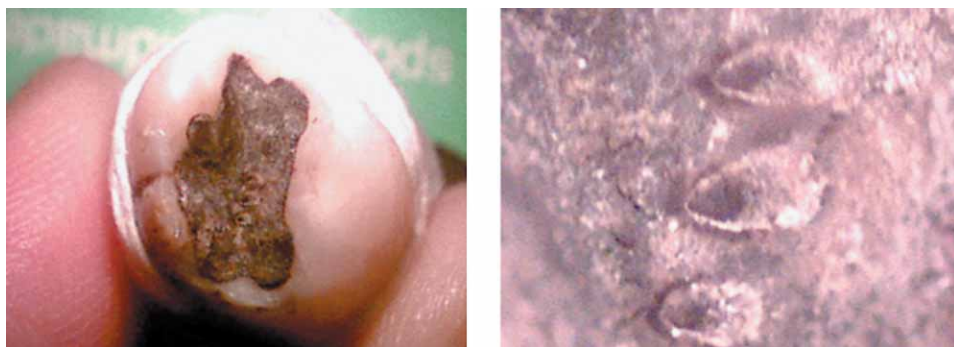
je važno da se na pravilan način iskoristi njegova polarizacija. Zbog toga je primjena različitih lasera u industriji sve veća i zahvaća sve novija područja, a naročito u daljnjem razvoju nanotehnologije i telekomunikacija.

Primjena u medicini je osobito istaknuta pa je vrijedno spomenuti samo neke oblike te primjene. Kao prvo važno je navesti oftalmologiju, gdje se laser koristi za obradu rožnice, ali i pri operacijama kod kojih se vadi očna leća. Kod ablacije mrežnice koristi se laser da bi se mrežnica ponovno pričvrstila za fundus oka, što je važno za bolju uspostavu vida kroničnih dijabetičara.

U stomatologiji, krenulo se u obradu zubiju raznim vrstama lasera, a također se dosta eksperimentiralo s laserskom fotopolimerizacijom kompozitnih materijala koji se koriste pri zamjeni srebrnih amalgama s tzv. bijelim ispunima. U novije vrijeme demonstrirani su prvi uspješni eksperimenti s femtosekundnim laserima pri bušenju zubne cakline. Jedna od primjena pri obradi karijesa prikazana je i na slici dolje. Pri tome je korišteno femtosekundno lasersko pojačalo snage od 10 gigavata, smješteno na Institutu za fiziku. Repeticija pulseva je bila tisuću pulseva u sekundi, a trajanje svakog pulsa bilo je oko 100 femtosekundi.

Roboti s laserskim glavama više nisu nikakva novost u automobilskoj industriji, gdje je zavarivanje dijelova itekako važan i osjetljiv posao, koji mora biti izvršen s najvećom mogućom preciznošću. Najčešće se koriste laseri s ugljičnim dioksidom, pa Nd:YAG laseri i konačno najviše obećava primjena lasera s optičkim vlaknima. Ovi posljednji već dosežu dovoljno velike snage za primjene u industriji obrade plastike i tanjih metalnih limova.

Nije na odmet spomenuti da je za vrhunska precizna mjerenja laserom itekako važna njegova stabilnost u frekvenciji i intenzitetu. Samo laseri, stabilizirani u najvećoj mogućoj mjeri, mogu se primijeniti u novim opservatorijama za detekciju gravitacijskih valova iz Svemira. U tu svrhu koriste se razni interferometri gdje se proizvodi interferencija svjetlosti stabiliziranih lasera, koji prolaze dvije različite grane interferometra. Dvije grane moraju imati savršeno jednake udalje-



**Slika 3.** Tri »kratera« izazvana djelovanjem femtosekundnog laserskog pojačala snage 10 GW, pod povećanjem od 10 (lijevo) i 60 puta (desno). Trajanje laserskog pulsa bilo je 100 fs uz učestalost ponavljanja pulseva od 1000 puta u sekundi.



**Slika 4.** Robot s laserskom glavom kakav se koristi u automobilske industriji. Snimljeno na Laserskom velesajmu u Münchenu 2005. godine.

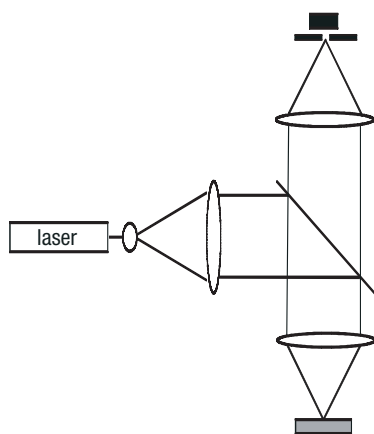
nosti. Na kraju svakog kraka interferometra nalazi se jedno zrcalo pričvršćeno za neku tešku masu, a sve je smješteno u odgovarajuće vakuumske komore. Gravitacijski valovi mogu različito zatriti dvije teške mase u dva različita kraka interferometra, pa će se slika interferencije svjetlosti malo promijeniti. Ta promjena udaljenosti oba zrcala u različitim krakovima je izuzetno mala veličina, ali danas je to tehnološki dohvatljivo i već se 2006. godine očekuju prvi rezultati iz nekoliko opservatorija gravitacijskih valova. Koje ćemo horizonte novih saznanja tada vidjeti, zasada se samo može nagađati.

Već kod prve pojave optičkih masera ili lasera, otac masera Charles Townes predložio je 1960. godine, tada svakako novi, poduhvat uspostavljanja veze s izvanzemaljskim civilizacijama pomoću laserskih signala. Radioastronomska promatranja tada su već bila jako razvijena, pa se pomišljalo i radilo na mogućem hvatanju signala drugih civilizacija koje obitavaju bliski svemirski prostor. Nobelovac Townes je hrabro ustvrdio da će tek laserski snop bez isuviše velikih gubitaka moći prevaliti velike svemirske udaljenosti. Danas je razvijen cijeli sistem, nazvan OSETI (optical search for extraterrestrial intelligence), u kojem će se proučavati optički signali iz svemira. Kako danas postoje dovoljno snažni pulsni laseri s odličnim svojstvima koherencije, moći će se slati signali u bliski Sveмир, do udaljenosti od oko tisuću svjetlosnih godina.

Danas se koriste posebni laseri kojima se stvaraju umjetne zvijezde pobudom natrijevih atoma, koji se nalaze u tankom sloju atmosfere na visini od oko 100 km. Te umjetne natrijeve zvijezde služe za korekciju slika ostalih zvijezda u vidnom, polju teleskopa zbog turbulencija u zemljinoj atmosferi. Prijenos snopova laserskog zračenja time dobiva novi značaj, pa se od nedavno vrlo detaljno ispituje širenje femtosekundnih laserskih pulseva kroz atmosferu.

Upotreba lasera u modernoj optičkoj mikroskopiji postala je toliko neophodna da se strukture i procesi u živim stanicama ne mogu ni zamisliti bez upotrebe nekoliko raznovrsnih lasera. Takva primjena podrazumijeva vrlo istančano poznavanje podataka o apsorpcijskim svojstvima materijala i njihovoj fluorescenciji izazvanoj apsorpcijom laserskog snopa.

Najčešći su konfokalni mikroskopi, gdje se fokus laserskog snopa na predmetu koji se istražuje direktno preslikava na fokus okulara, iza kojeg je smješten detektor reflektiranog ili fluorescentnog svjetla. U ovom slučaju se predmet može pomicati u ravnini i tako prebrisavati (skenirati) cijela površina. No ukoliko se radi o transparentnom predmetu, tada se može dobiti i trodimenzionalna slika, jer se predmet može micati uzduž treće dimenzije. Obično su takve slike vrlo oštire i daju fine detalje u raznim bojama, koje odgovaraju pobudama lasera raznih valnih duljina.



Slika 5. Konfokalni mikroskop

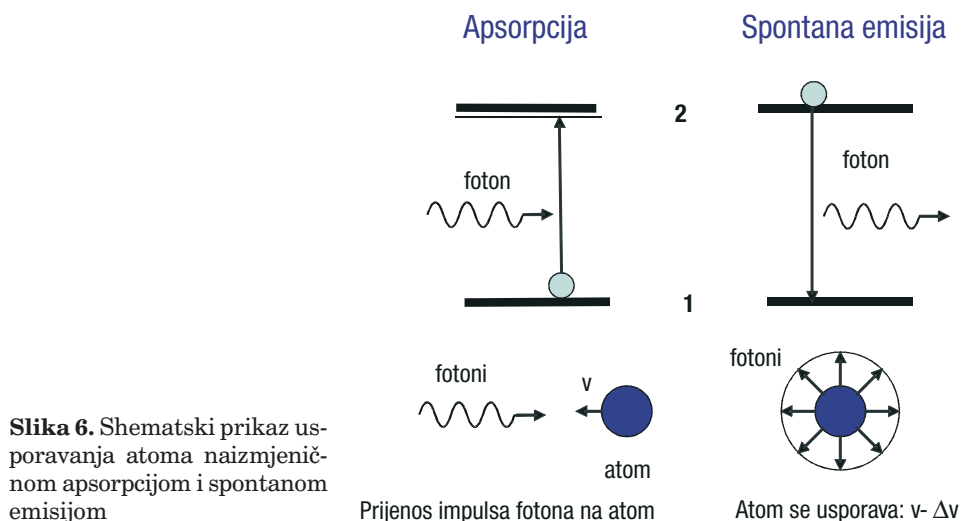
Sam proces apsorpcije može biti jednofotonski ili višefotonski. Ako se radi o višefotonskoj apsorpciji, tada konfokalni aranžman mikroskopa nije od presudne važnosti, jer i otkako fluorescentni signal dolazi iz vrlo malog fokusa gdje je intenzitet lasera dovoljno velik za izazivanje višefotonskog prijelaza.

Multifotonska spektroskopija se najčešće izvodi femtosekundnim laserima, upravo zbog njihove velike snage. Najpopularniji je femtosekundni laserski oscilator na bazi kristala safira dopiranog titanom.

Zaustavljanje i skladištenje ultrahladnih atoma i stvaranje ultrahladnih molekula posebno je poglavljje moderne atomske i molekulske fizike. U ovom području podijeljene su

brojne Nobelove nagrade, a moguće je da će i ubuduće neke biti podijeljene zbog dalekosežnih rezultata najnovijih istraživanja.

Na slici 6. prikazujemo proces apsorpcije fotona jednog atoma koji se giba u susret laserskom snopu. Da bi uopće došlo do apsorpcije, foton mora imati nešto manju energiju od one koju bi mogao apsorbirati u stanju mirovanja. Prilikom procesa apsorpcije foton će prenijeti svoj impuls na atom i pri tome mu smanjiti brzinu. Nakon apsorpcije doći će do spontane emisije, koja je izotropna, tj. događa se u bilo kojem smjeru prostora s jednakom vjerojatnošću. Pri emisiji, atom će malo trznuti u suprotnom smjeru zbog odbojne sile. Ako se sada ovaj ciklus apsorpcije – spontane emisije ponovi oko 10 000 puta, prvotna brzina atoma će se znatno smanjiti, jer apsorpcija uvijek ide iz istog laserskog snopa, a spontana

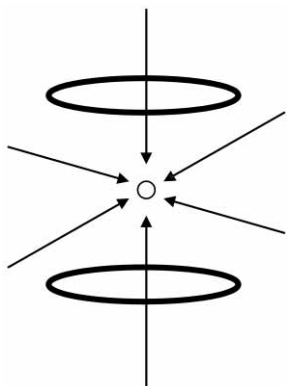


Slika 6. Shematski prikaz usporavanja atoma naizmjeničnom apsorpcijom i spontanom emisijom

Prijenos impulsa fotona na atom

Atom se usporava:  $v - \Delta v$





**Slika 7.** Magneto-optička stupica za lasersko hlađenje i uskladištenje ultrahladnih atoma.



**Slika 8.** Femtosekundni laserski oscilator Tsunami-Millennia na Institutu za fiziku u Zagrebu.

emisija se odvija u bilo koji prostorni kut. Zapravo, pri procesu zaustavljanja, frekvencija laserskog snopa bi se također trebala uzastopce malo povećavati, kako bi se proces apsorpcije mogao rezonantno odvijati.

Ako sada zamislimo da se oblak atoma obasja laserskim snopovima iz šest okomitih smjerova (po tri iz suprotnih smjerova), tada ćemo ostvariti optičko zaustavljanje atoma. Njihovo dugotrajnije uskladištenje moguće je ostvariti upotrebom magnetske »boce« koja se pravi s dva kružna svitka u kojima teče jaka struja suprotnog smjera. Na taj način se ostvaruje kvadrupolno magnetsko polje pomoću dva suprotno usmjerena magnetska dipola. U toj magnetskoj boci atomi male brzine odnosno kinetičke energije mogu dugovremeno obitavati, no njihova temperatura ne može pasti niže od nekoliko mikrokelvina. Za ostvarenje nižih temperatura potrebno je primijeniti princip isparavanja, kod kojeg atomi najvećih brzina najprije napuštaju magnetsku stupicu, a atomi koji ostaju prelaze u novo stanje superfluidne materije nazvano Bose-Einsteinov kondenzat.

Je li moguće hlađenje molekula i biomolekula femtosekundnim laserom? Ovo pitanje postavlja se kao centralno pitanje u svim našim razmišljanjima o budućim eksperimentima i razvoju eksperimentalnih metoda atomske fizike s najverstatilnijim laserima do sada izmišljenima na svijetu.

Nema sumnje kako smo ovdje samo dotakli neke od mnogobrojnih mogućnosti u kojima će laser odigrati itekako važnu ulogu. Jer, laser je još uvijek rješenje u potrazi za problemom (laser is a solution in search for a problem).

## Literatura

Einstein A. (1905): *Annalen der Physik*, **17**, 132.

Einstein A. (1917): *Physikalische Zeitschrift*, **18**, 121.