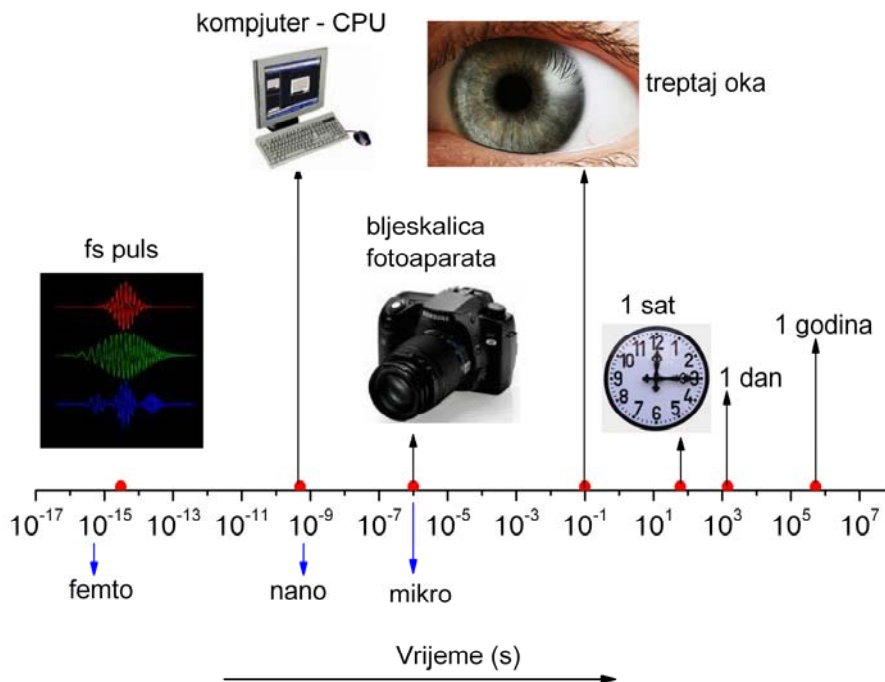


Femtosekundni laseri – preciznost u vremenu i frekvenciji

Ticijana Ban

Institut za fiziku, Bijenička cesta 46, HR-10 001 Zagreb

Mjerenje vremena trajanja prirodnih pojava jedno je od najstarijih područja znanstvenih istraživanja. Težnja da se mjere procesi koji se odvijaju na sve kraćim i kraćim vremenskim skalama osnovna je motivacija široke znanstvene zajednice. Promatrajući vremensku crtu prikazanu na slici 1, vidimo da nas pomaci prema sve kraćim i kraćim vremenima vode izvan dosega ljudskog iskustva. «Ultrabrza» znanost proučava procese koji se odvijaju na femtosekundnoj vremenskoj skali. A kako bismo iz našeg iskustvenog svijeta sekunde skočili u svijet femtosekunde prisjetimo se da je 1 fs (femtosekunda) = 0.000000000000001 s. Omjer 1 fs : 1 s jednak je omjeru 5 min : starosti Zemlje. Svjetlost, koja je elektromagnetski val i putuje najbržom mogućom brzinom, proputuje za vrijeme 1 fs put od svega 0.3 mikrometara ($1\mu\text{m}=10^{-6}\text{ m}$). Ova udaljenost dovodi nas u područje atomskih udaljenosti i tu već naslućujemo zašto nam je istraživanje u fs vremenskom području vrlo važno.



Slika 1. Vremenska crta

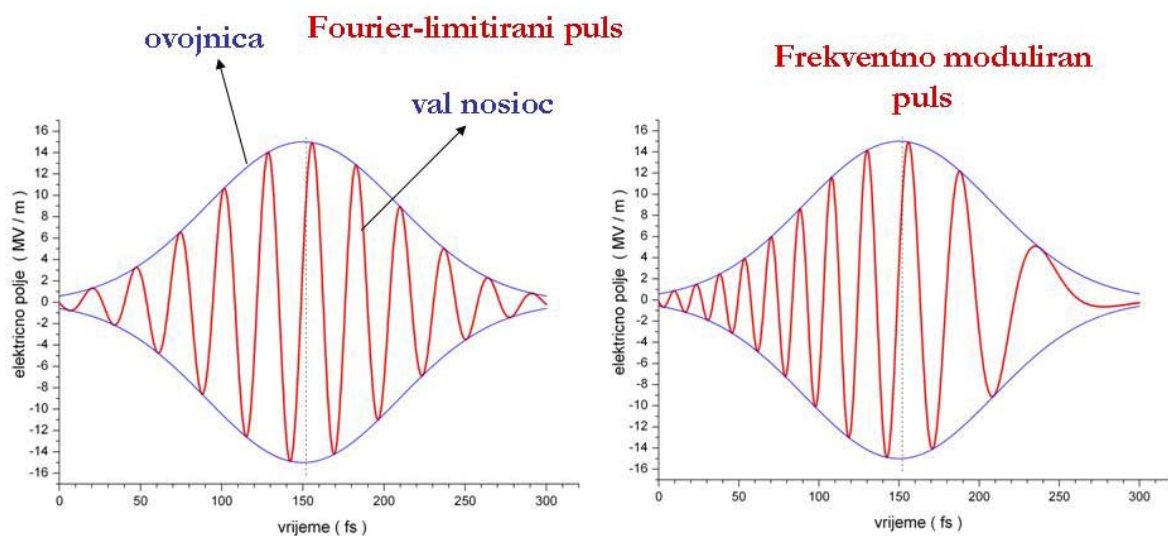
Već su 1930. teorijski računi Hirshfedera i Eyringa pokazali da se dinamika $H+H_2$ reakcije odvija na fs vremenskoj skali. Sama zamisao o eksperimentalnom istraživanju na toj vremenskoj skali, u ono je vrijeme, bila je jednaka ludilu. Izum lasera [1] 1960. godine dovodi do preokreta u eksperimentima atomske i molekulske fizike. Osim kontinuiranih lasera (emisija kontinuirana u vremenu), znanstvenici su uložili velike napore u usavršavanje pulsnih lasera (emisija zračenja skoncentrirana u kratke, isprekidane vremenske domene) kojima je vrijeme trajanja pulseva bivalo sve kraće i kraće. Tako su se preko mikrosekundnih ($1\mu s=10^{-6}$ s), nanosekundnih ($1ns=10^{-9}$ s) i pikosekundnih ($1ps=10^{-12}$ s) pulseva usavršavanjem tehnologije, krajem 80-tih pojavili laseri čiji su pulsevi trajali svega desetak femtosekundi. Pojava femtosekundnih lasera donijela je pravu revoluciju u znanosti.

Dvije su osnovne kategorije eksperimenata koje upotrebljavaju fs lasere. U prvoj su eksperimenti koji se baziraju na proučavanju vremenske dinamike nekog sistema. Tu prvenstveno spadaju eksperimenti proučavanja vibracija i rotacija molekula, za koje je A. Zewail 1999. godine dobio Nobelovu nagradu [2,3]. Iz tih eksperimenata razvila se potpuno nova grana znanosti koja se bavi proučavanjem dinamike atomskih (molekulskih) jezgara, a naziva se femtokemija [4]. U drugu kategoriju spadaju eksperimenti koji koriste činjenicu da su fs pulsevi, pulsevi vrlo velike vršne snage. Npr. ako puls trajanja 50 fs i 1 mJ energije (srednja prosječna snaga po pulsu 20 Gigawatta) fokusiramo na površinu od $100\mu m^2$ dobivamo intenzitet zračenja od 20 Petawatta/cm² ($20\cdot 10^{15}$ W/cm² !!). Ovakav intenzitet odgovara električnom polju od oko 3 GigaV/cm, što je usporedivo sa poljem vezanja u atomu. U takvim se eksperimentima fs laseri koriste za ionizaciju nekog plina, ablaciju (proces pri kojem zbog interakcije zračenja i materijala dolazi do trenutnog isparavanja materijala i nastaje krater), proučavanje nelinearnih svojstava nekog materijala, mikroskopiju,... Danas se fs laseri koriste u istraživačkim laboratorijima za istraživanja u području fizike, kemije i biologije. Međutim, njihova vrlo dobra industrijska komercijalizacija donijela im je primjenu i izvan samih znanstvenih laboratorija npr. u medicini, industriji, vojsci,...

Femtosekundni laseri emitiraju niz pulseva vremenskog trajanja nekoliko desetaka femtosekundi. Femtosekundni puls matematički se potpuno opisuje izgledom električnog polja koje ga sačinjava. Sa slike 2 vidimo da se to električno polje sastoji od brzo oscilirajućeg vala nosioca i sporo oscilirajuće ovojnice toga vala koja za prikazani puls ima oblik Gausove funkcije. Četiri su osnovna parametra koja određuju izgled fs pulsa: vrijeme trajanja pulsa (τ), jakost električnog polja (E_0), frekvencija vala nosioca (ω_c) i faza pulsa (Φ). Ako faza pulsa nije funkcija vremena onda imamo tzv. Fourier-limitirani puls, a ako je faza

funkcija vremena dobivamo frekventno modulirani puls. Val nosioc putuje faznom brzinom, v_f , a ovojnica putuje grupnom brzinom, v_g . Širenjem kroz neko disperzivno sredstvo (sredstvo čiji indeks loma ovisi o frekvenciji vala, $n(\omega)$) fazna i grupna brzina postaju različite, a određujemo ih iz slijedećih relacija:

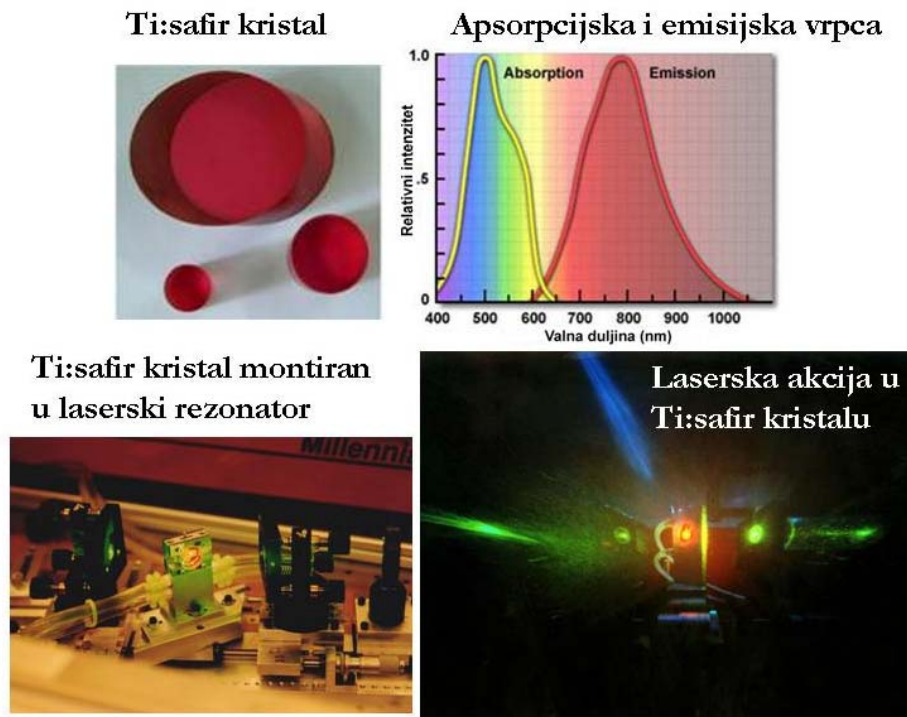
$$v_f = \frac{c}{n(\omega)} \quad v_g = \frac{c}{n(\omega) + \omega \frac{dn(\omega)}{d\omega}} = \frac{c}{n_g}$$



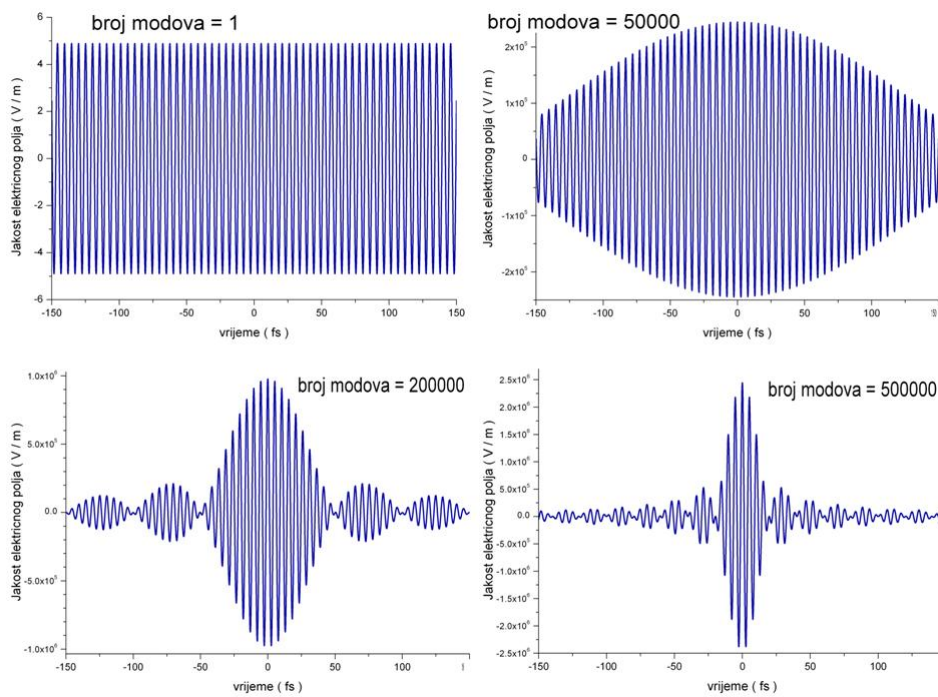
Slika 2. Matematički opis femtosekundnog pulsa

Osnovni dijelovi lasera su: optička pumpa, medij koji stvara lasersku akciju i rezonator. Jedan rezonatorski mod može se predstaviti sinusnim valom. Unutar rezonatora mogu opstati samo oni longitudinalni modovi koji imaju čvorove na krajevima rezonatora. Udaljenost susjednih modova u frekvenciji, Δ , ovisi preko relacije $\Delta = c / 2nL$ o brzini svjetlosti c i duljini rezonatora L . Za medij koji posjeduje široki emisijski spektar (npr. Ti: safir kristal čiji se emisijski spektar proteže od 600-1000 nm, vidi sliku 3) unutar rezonatora može istovremeno laserirati i do milijun modova. Ako takvi modovi svi titraju nezavisno, na izlazu iz rezonatora dobivamo lasersku emisiju kvazi-kontinuiranu u vremenu. Metoda sprezanja modova (tzv. *modelocking*) omogućila je da svi rezonatorski modovi titraju u fazi i kao rezultat zbrajanja električnih polja mnoštva modova (oko 10^6) koji svi titraju u fazi

nastaje u jednoj točki prostora rezonatora ultrakratki puls. Matematički opis generiranja ultrakratkih pulseva metodom sprezanja modova prikazan je na slici 4.



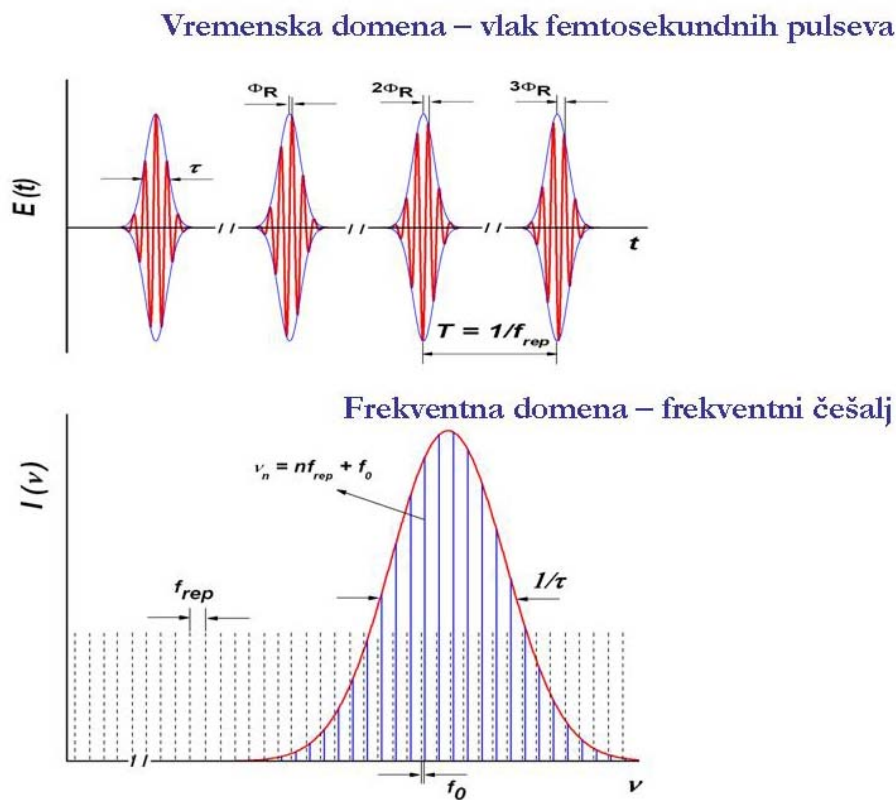
Slika 3. Ti:safir kristal je najčešći laserski medij u femtosekundnim laserima



Slika 4. Sprezanje longitudinalnih modova unutar rezonatorske šupljine

U eksperimentu, karakterizacija fs pulsa vrši se mjerenjem njegovog spektralnog ili intenzitetskog profila. Spektralni profil prikazuje ovisnost intenziteta pulsa o frekvenciji, a intenzitetski profil pokazuje ovisnost intenziteta pulsa o vremenu. Spektralna ($\Delta\omega$) i vremenska ($\Delta\tau$) poluširina fs pulsa nisu nezavisne veličine. Povezane su preko Fourierove relacije $\Delta\tau\Delta\omega \geq c_B$, gdje je c_B eksperimentalna konstanta karakteristična za određeni oblik ovojnice pulsa. Spektralni profil mjeri se komercijalno dostupnim spektrometrima (uređaji koji razlažu svjetlost na različite boje), dok se za mjerenje intenzitetskog profila upotrebljavaju metode autokorelacije i kroskorelacije [5,6].

Kod nas na Institutu za fiziku u Laboratoriju za femtosekundnu lasersku spektroskopiju atoma i molekula (<http://projekt2.ifs.hr/femto-laboratorij.htm>), bavimo se proučavanjem atoma i molekula upotrebljavajući femtosekundni (fs) frekventni češalj. Frekventni češalj se može opisati kao niz vrlo uskih laserskih linija koje su sve međusobno povezane u fazi, a nalazimo ga kod svakog fs lasera ako se ne ograničimo samo na promatranje jednog fs pulsa, već promatramo niz fs pulseva međusobno udaljenih za period repeticije. Frekventni češalj u spektralnoj domeni analogan je nizu fs pulseva u vremenskoj domeni, vidi sliku 5.



Slika 5. Femtosekundni pulsevi prikazani u vremenskoj i frekvencijskoj domeni

T.W. Hänsch i J.L. Hall dobili su 2005. godine Nobelovu nagradu za njihov doprinos u razvoju vrlo precizne laserske spektroskopije, što prvenstveno uključuje upotrebu frekventnog češlja [7]. U njihovim se eksperimentima frekventni češalj koristio kao veza između optičkog i mikrovalnog dijela spektra. U našim eksperimentima koristimo frekventni češalj za pobuđivanje alkalijskih atoma [8,9]. Zbog niza vrlo uskih spektralnih linija koje sačinjavaju frekventni češalj, moguće je s velikom preciznošću istraživati energijsku strukturu pojedinog atoma. S druge strane, promatrano u vremenskoj domeni, zbog niza fs pulseva, moguće je opažati efekte povezane s vremenskom dinamikom atoma. Na takav način frekventni češalj ujedinjava spektralnu i vremensku domenu unutar atoma čime se otvara niz potpuno novih i zanimljivih spoznaja.

Utrka znanstvenika s vremenom nije se zaustavila na femtosekundnoj skali, znanost žuri dalje prema još kraćim vremenima. 1990-tih godina, u znanstvene je laboratorije ušla attosekunda ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$). Attosekundni laseri omogućavaju slikanje gibanja samog elektrona, o čemu više možete pročitati na <http://www.attoworld.de>.

Literatura:

- [1] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [2] A. Zewail: Femtochemistry, WILEY-VCH GmbH, Germany 2001
- [3] http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1999/zewail-lecture.html
- [4] <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/femto-welt>
- [5] J.-C. Diels: Ultrashort Laser Pulse Phenomena, Elsevier 2006.
- [6] <http://en.wikipedia.org/wiki/Autocorrelation>
- [7] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2005/index.html
- [8] D. Aumiler, T. Ban, H. Skenderović, G. Pichler: Phys. Rev. Lett. **95**, 233001 (2005).
- [9] T. Ban, D. Aumiler, H. Skenderović, S. Vdović, N. Vujičić, G. Pichler; Phys. Rev. A **76**, 043410 (2007).