

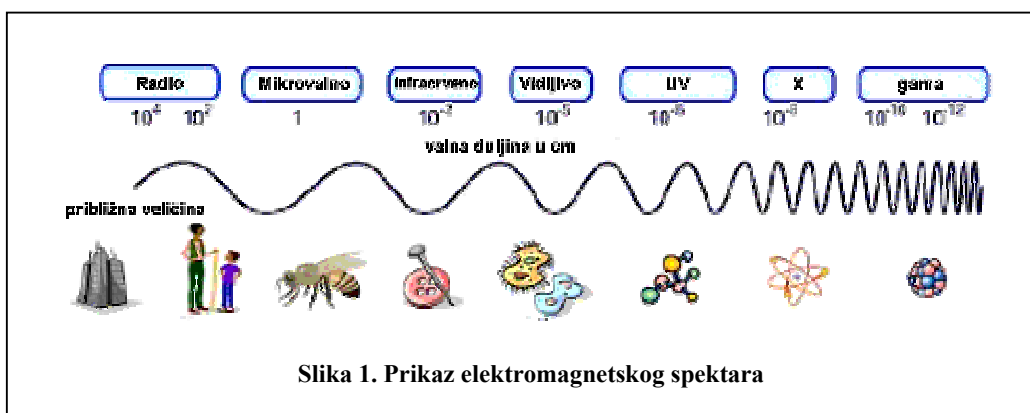
## Laseri u znanosti i tehnologiji

Ticijana Ban

*Institut za fiziku, Bijenička cesta 46, 10 000 Zagreb, Hrvatska*

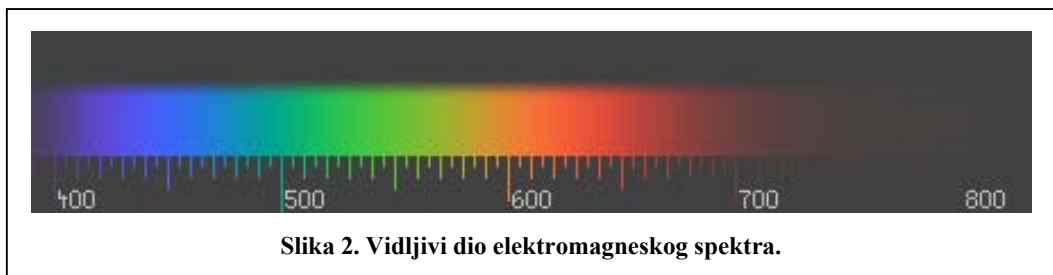
LASER je skraćenica od skupa riječi: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, a ime je za izvor svjetlosti kod kojeg se za razliku od konvencionalnih izvora svjetlosti, svjetlost generira mehanizmom stimulirane emisije. Iako na prvi pogled fizika lasera zvuči jako komplicirano, razvojem tehnologije i to pogotovo tehnologije bazirane na poluvodičima, laseri nas danas u velikom broju okružuju u našem svakodnevnom životu. Unutar svoje radionice pokušat ću vas uvesti u svijet lasera, krenuvši od povijesnih koraka, preko znanstvenih laboratorija, do svakodnevnog života i onda ponovo natrag u mrak laboratorija. Nakon toga izvest ćemo neke pokuse iz geometrijske optike u kojoj nam laseri uvelike mogu poslužiti kao izvrstan izvor svjetlosti.

Još je davne 1917. godine u svom radu «On the Quantum Theory of Radiation» Albert Einstein dao teorijski koncept i predvidio izum lasera i njegove preteče masera. Maser je uređaj koji radi na jednak način kao i laser, ali u drugom frekvencijskom području. Maser je izvor mikrovalova, dok je laser izvor elektromagnetskih valova u infracrvenom i vidljivom dijelu spektra. Ukupni elektromagnetski spektar prikazan je na Slici 1 (preuzeto iz [1]), a proteže se od radio valova (valne duljine  $10^4$ - $10^2$  cm) do gama zračenja (valne duljine  $10^{-10}$ - $10^{-12}$  cm).



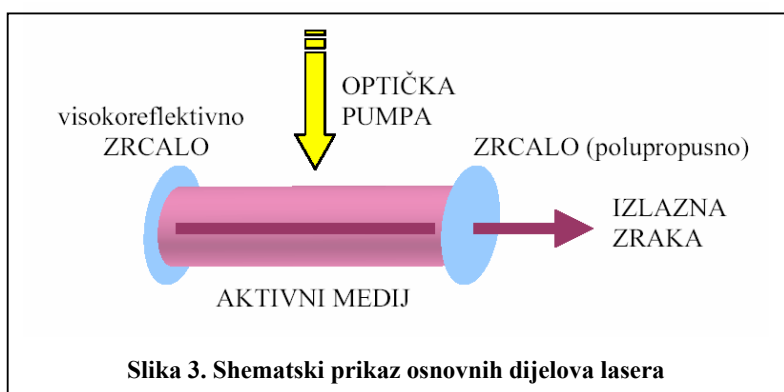
Slika 1. Prikaz elektromagnetskog spektra

Vidljivi dio spektra tek je djelić ukupnog elektromagnetskog spektra (vidi Sliku 2), a sastoji se od zračenja valnih duljina u području od (400 nm – 900 nm). Zahvaljujući ljudskom oku (koji je detektor osjetljiv upravo u tom spektralnom području) svjetlost različitih valnih duljina doživljavamo kao različite boje.



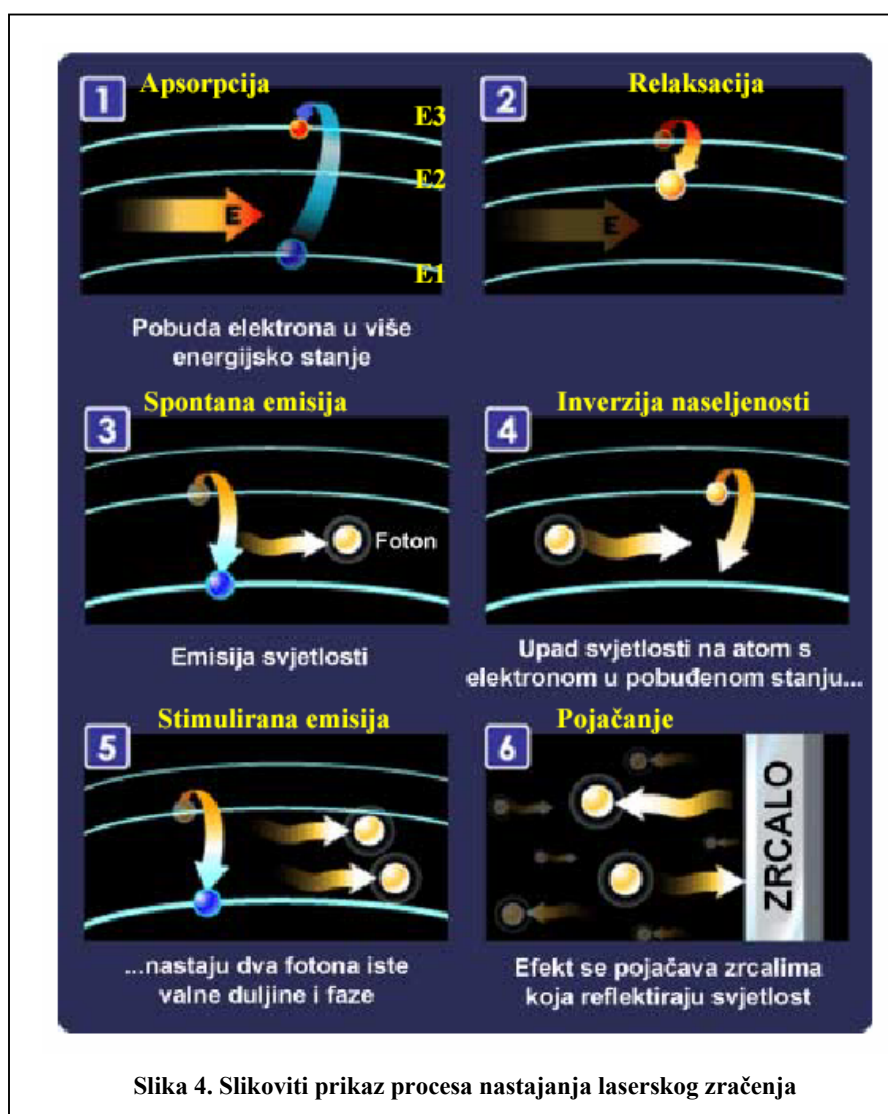
Pretekavši nekoliko izvrsnih eksperimentalnih grupa, prvi laser napravio je 1960. godine Theodore H. Maiman zaposlen na Huges Research Laboratorie Malibu, California. Njegov je laser emitirao svjetlost valne duljine 694 nm u pulsnom režimu, a lasersku emisiju postigao je stimuliranom emisijom iz rubinskog kristala pobuđenog svjetlosnom lampom. Nakon toga, laseri se počinju naveliko proizvoditi u eksperimentalnim laboratorijima širom svijeta, dok konačno razvojem tehnologije danas imamo pravu lasersku revoluciju. No, idemo malo detaljnije razjasniti kako nastaje laserska svjetlost i koje su njene karakteristike.

Lasersko zračenje, u odnosu na zračenje običnih svjetlosnih žarulja, karakterizira koherentnost, usmjerenost i monokromatičnost. Koherentno zračenje je ono zračenje kod kojega svi svjetlosni valovi od kojih je ono sastavljeno titraju u fazi (svi su događaji sinhronizirani). Laserska zraka je usmjerena, dakle zračenje se rasprostire samo u relativno uzak prostorni kut, pa su i udaljenosti rasprostiranja takvog zračenja velike. Nadalje, lasersko zračenje je monokromatsko, tj. sastoji se od relativno uskog frekventnog spektra ili možemo reći samo od jedne boje. Osnovni dijelovi jednog lasera čine rezonator (dva zrcala), aktivni laserski medij i optička pumpa, a shematski su prikazani na Slici 3.



Da bismo detaljnije objasnili koja je uloga pojedinih dijelova lasera i kako nastaje laserska emisija moramo početi od samih temelja: kvazi-klasične slike atoma od kojih je građen laserski aktivni medij. Atom se u kvazi-klasičnoj slici sastoji od jezgre i elektronskog

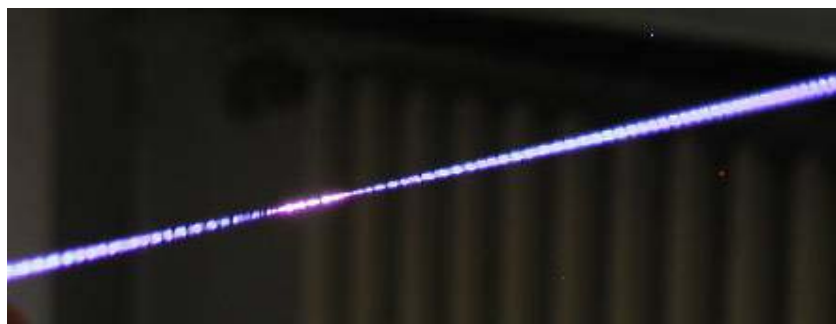
omotača. Elektronski omotač se sastoji od elektrona, koji u stabilnom stanju kruže po svojim putanjama (orbitalama). Svaka orbitala može primiti najviše dva elektrona i karakterizirana je određenom energijom. Prilikom prelaska elektrona iz orbitale veće energije,  $E_2$ , u orbitalu manje energije,  $E_1$ , dolazi emisije zračenja, odnosno emisije fotona čija je energija jednaka  $E_2 - E_1$ . S druge strane, elektron može prijeći iz orbitale manje energije u orbitalu veće energije jedino ako pri tome apsorbira jedan kvant (paket) zračenja ili foton. Proces nastajanja laserskog zračenja prikazan je slikovito na Slici 4 (pruzeto iz [2]). Promatramo atom koji je u stabilnom stanju i posjeduje jedan elektron koji kruži oko jezgre po orbitali energije  $E_1$  (osnovno energijsko stanje). Na takav atom upada foton kojeg emitira optička pumpa i budući da je taj foton upravo odgovarajuće energije dolazi do apsorpcije fotona i naš elektron se prebacuje u nestabilno (pobuđeno) energijsko stanje  $E_3$ .



Slika 4. Slikoviti prikaz procesa nastajanja laserskog zračenja

Energijsko stanje E3 živi jako kratko, što znači da se elektron u vrlo kratkom vremenu ( $\cong ns$ ) prebacuje u energijski niže stanje E2 koje je ujedno i stabilnije stanje (duže živi,  $\cong ms$ ). Ovaj se proces naziva relaksacija jer se kod njega ne mora nužno emitirati foton, već se energija može izgubiti i neradijativnim procesima. Nakon određenog vremena elektron prelazi u osnovno stanje emisijom fotona. Emitirani foton putuje po rezonatoru (kojeg sačinjavaju dva zrcala) i na jednom se zrcalu reflektira natrag. Kada ponovo dolazi do našeg atoma zatekne ga u pobuđenom stanju jer je on u međuvremenu primio novi foton od optičke pumpe. Neravnotežno stanje u atomu u kojem je naseljenost nekog pobuđenog stanja veća od naseljenosti osnovnog stanja naziva se inverzija naseljenosti. Inverzija naseljenosti je nužan uvjet za generiranje laserske emisije. U uvjetima inverzije naseljenosti stimulirana emisija nadjača spontanu emisiju i pri tome dolazi do pojačanja intenziteta svjetlosti, odnosno laserske emisije. Fotoni nastali procesom stimulirane emisije potpuno su identični i upravo je to uzrok koherentnosti laserskog zračenja.

Lasere razlikujemo po različitim aktivnim laserskim medijima u kojima se stvara lasersko zračenje, što određuje osnovna svojstva emitiranog zračenja (frekvenciju, spektralnu poluširinu, snagu,...). Aktivni laserski medij može biti plin pa tada govorimo o plinskim laserima (He-Ne, Ar, Xe, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>), kristal (Ti:safir, Nd:YAG,...), organska boja, egzimerna molekula (KrF, ArF, XeCl) ili poluvodič (diodni, elektronski laseri). S obzirom na raspodjelu emitiranog zračenja u vremenu lasere dijelimo na kontinuirane i pulsne. Kod kontinuiranih lasera svjetlost je konstantna u vremenu, dok se kod pulsnih lasera svjetlost periodički mijenja u vremenu. Zbog tromosti našeg oka, u slučajevima velike repeticije pulseva teško je razlučiti pojedine pulseve, pa nam se pulsni laseri čine kontinuirani. Na Slici 5 prikazana je fotografija prostiranja laserskih pulseva repeticije 1 kHz, kroz prostor Laboratorija za femtosekundnu lasersku spektroskopiju Instituta za fiziku. Iako je za naše oko ova repeticija još uvijek velika, na fotografiji se vrlo jasno razlučuju pojedini pulsevi.



Slika 5. Puls po puls: femtosekundni pulsevi repeticije 1 kHz snimljeni kamerom

Razvoj pulsnih lasera potaknut je kroz povijest osnovnom ljudskom težnjom da promatra i proučava stvari što brže i na što kraćoj vremenskoj skali. Od 1960. godine kada u znanstvenim laboratorijima nastaju mikrosekundni laserski pulsevi ( $1\mu\text{s}=10^{-3}$  s), utrka za što kraćim pulsevima danas je dostigla svoj cilj sa generiranjem attosekundnih pulseva (1attosek =  $10^{-18}$  s). Ovakvi se laserski pulsevi danas koriste za proučavanje dinamike elektrona, a možemo ih pronaći samo u znanstvenim laboratorijima, [3]. Ako se samo korak udaljimo od attosekunda dolazimo do područja femtosekunda ( $1\text{ fs} = 10^{-15}$  s) i tu ćemo malo zastati s obzirom na činjenicu da su femtosekundni laseri uveli u modernu znanost i tehnologiju niz novih i zanimljivih fenomena.

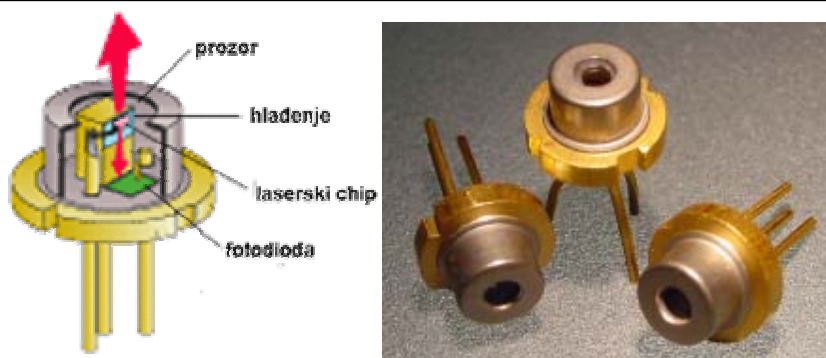
Femtosekundni laseri emitiraju zračenje u pulsevima koji traju svega nekoliko desetaka femtosekundi (fs). 1 fs je vrijeme potrebno svjetlosti (a svjetlost je elektromagnetski val i putuje najvećom mogućom brzinom) da prijeđe put od svega  $0.3\ \mu\text{m}$ . Dakle, 1 fs je vrlo kratak vremenski period i potpuno nam je nezamislivo da se sa tako kratkim laserskim pulsom može išta raditi. Međutim, pročitajte dalje i vidjet ćete da se fs laseri osim u fizici danas upotrebljavaju u kemiji, biologiji, medicini, industriji,... Detaljnije o matematičkom opisu električnog polja femtosekundnog pulsa i mehanizmu stvaranja ultrakratkih pulseva možete pronaći u ref. [4]. U laboratorijima ih počinju razvijati već početkom 80-tih godina, a s obzirom na trajanje pulsa koje se nalazi u vremenskoj skali vibracija i rotacija molekula ovakvi se laseri prvenstveno upotrebljavaju za istraživanje vremenske dinamike molekula (vibracije, rotacije), te za kontroliranje, karakterizaciju i navođenje kemijskih reakcija. Prof. A. Zewail dobio je 1999. godine Nobelovu nagradu za istraživanja kemijskih reakcija upotrebom femtosekundne spektroskopije, područje znanosti nazvano femtokemija. Osim kratkoće pulsa, fs lasere karakterizira velika snaga emitiranog zračenja (po puls). Tako npr. puls koji traje oko 50 fs, energije 1 mJ, ima prosječnu snagu oko 20 Gwatt. Ovo svojstvo fs lasera omogućava niz novih primjena. Laserska ablacija (ablacija je proces izbacivanja materijala s površine čvrste mete pod utjecajem laserskog zračenja), laserom vođeni izboji i generiranje viših harmonika (stvaranje svjetlosti koja se sastoji od frekvencija koje su višekratnici frekvencije fs pulsa) su samo neka od istraživanja u fizici u kojima se primjenjuju snažni fs pulsevi. U biologiji se fs laseri upotrebljavaju za izgradnju nelinearnih laserskih mikroskopa vrlo velike prostorne rezolucije. Ovakva primjena fs lasera potakla je usavršavanje tehnologije fs lasera, pa danas možete kupiti kompaktni, vrlo maleni fs laser, dobrih karakteristika i izuzetno jednostavan za uporebu. Kao posljedica toga fs se laseri počinju koristiti u medicini (operacije oka) i industriji (fina obrada materijala). Na Slici 6 prikazana je fotografija fs lasera Tsunami koji se nalazi u Laboratoriju za femtosekundnu

lasersku spektroskopiju na Institutu za fiziku, a upotrebljava se za fundamentalna istraživanja alkalijskih atomskih para.



Slika 6. Unutrašnjost fs lasera Tsunami u Laboratoriju za femtosekundnu spektroskopiju Instituta za fiziku

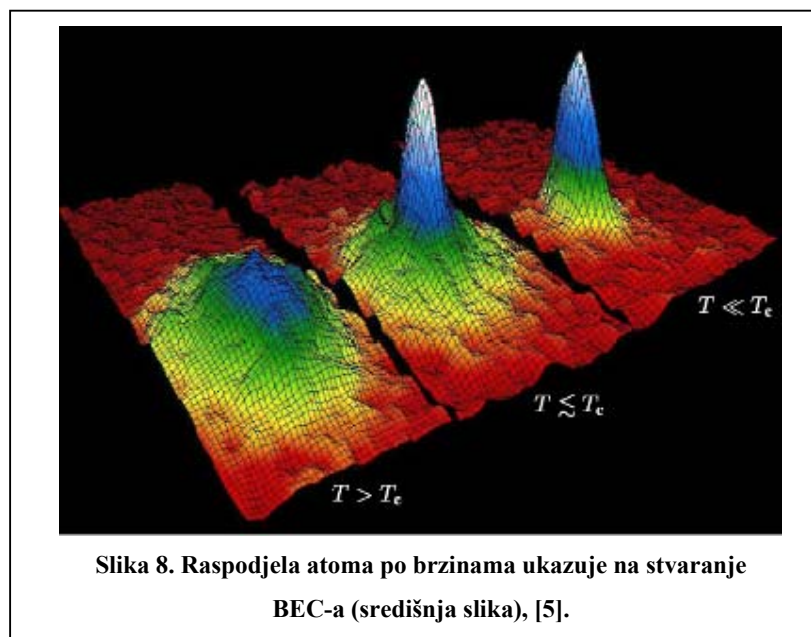
Nakon fs lasera preskačemo cijeli niz pulsnih i kontinuiranih lasera i dolazimo do lasera koji su danas u najširoj svakodnevnoj upotrebi, a nazivaju se poluvodički (diodni) laseri, Slika 7. To su laseri koji emitiraju kontinuirano zračenje, obično malih snaga (do 100 mW), najčešće u crvenom i infracrvenom dijelu spektra. Kao aktivni medij, a ujedno i rezonator koriste poluvodičku pločicu (eng. *chip*) tipa GaAs, InP, GaSb ili GaN. Njihova široka uporeba rezultat je masovne proizvodnje, zbog jednostavne tehnologije izrade i niske cijene. Lasersko zračenje nastaje kao rezultat rekombinacije elektrona i šupljina unutar poluvodiča kada se na krajeve poluvodiča narine odgovarajući napon. Karakterizira ih visoka efikasnost pretvorbe električne u svjetlosnu energiju. Nominalna valna duljina emisije (boja) definirana je tipom poluvodiča, strujom koja prolazi kroz poluvodič i temperaturom.



Slika 7. Poluvodički laseri

Poluvodički se laseri danas koriste kao čitači CD-ova i DVD-ova, kao čitači cijena u svim trgovinama, u laserskim printerima, kao laserski pokazivačima (engl. *pointer*), laserski instrumenti za mjerenje duljine i kosine, u telekomunikacijama, itd.

U znanstvenim se laboratorijima oni koriste za eksperimente laserskog hlađenja molekula i stvaranja jednog novog stanja materije tzv. Bose-Einsteinovog kondenzata (BEC), Slika 8. BEC je najhladnije eksperimentalno izmjereno stanje materije. Temperatura atoma koji čine BEC iznosi svega stotinjak nK. Atomi na tim temperaturama zaboravljaju na svoju individualnu svijest i dobivaju novu, kolektivnu svijest. U takvim se uvjetima može povući analogija između atoma i fotona, prvenstveno što se tiče svojstva koherentnosti. Sukladno tome znanstvenici su izumili atomski laser koji pokazuje sva svojstva fotonskog (svjetlosnog) lasera. Upotreba atomskog lasera u holografiji i interferometriji omogućila bi veliki korak prema osvajanju novih prirodnih prostranstava. Naime, zbog dualne prirode (de Broglieva hipoteza), atomi se također ponašaju kao valovi čija je valna duljina puno kraća od valne duljine svjetlosnih lasera. To bi u eksperimentima holografije značilo povećanje rezolucije do nanometarskih skala, odnosno u eksperimentima interferometrije povećanje osjetljivosti instrumenta čime bi se direktno mogla testirati kvantna teorija.



Unapređenjem znanosti kroz istraživanja u znanstvenim laboratorijima dolazi do unapređenja tehnologije i upotrebe novih proizvoda u svakodnevnom životu, čime mijenjamo i direktno utječemo na način života. Ovaj se proces tada ne završava, već se pronalazi novi problem zbog kojeg se treba vratiti u laboratorije i dalje nastaviti istraživanja i penjenje zavojitim putem prema cilju imajući uvijek na umu da tehnologija mora služiti čovjeku, a ne čovjek tehnologiji.

Literatura:

[1] <http://en.wikipedia.org>

[2] <http://www.howstuffworks.com>

[3] <http://www.attoworld.de>

[4] T. Ban, Femtosekundni laseri – preciznost u vremenu i frekvenciji, Matematičko-fizički list **LVIII** 2 (2007.-2008.).

[5] E. Cornell, C. Wieman, i ostali, Sveučilište u Coloradu, JILA, USA,  
<http://jilawww.colorado.edu>