

PLAZMA, SVJETLOST I SPEKTROSKOPIJA*

Slobodan Milošević, Institut za fiziku, Zagreb.

(uz radionicu, Zadar 2008, draft verzija 02)

Sadržaj: Porijeklo imena plazma; Važnost plazme; Kako nastaje plazma; Plazma – materija koja zrači svjetlost; Svjetlost, Atom u plazmi – izvor svjetlosti; Spektroskopija plazme; Kako radi CCD spektrometar; Spektar; Dva primjera: Plazma kao izvor svjetlosti i Laserska plazma; Kratki osvrt na curriculum – četvrto agregatno stanje; Planirani pokusi i rasprave; Literatura i preporučeni linkovi

Plazma je najrasprostranjeniji oblik vidljive materije u svemiru koji se sastoji od nezavisno gibajućih, električki nabijenih sastavnica atoma: elektrona i iona. Nezavisno se gibajući, te nabijene čestice proizvode električna i magnetska polja koja u povratu utječu na ponašanje plazme. Materija u takvom stanju zrači svjetlost. Analizom te svjetlosti, spektroskopijom, saznajemo o sastavu i stanju plazme. Plazma je sveprisutna u svakodnevnom životu.

Porijeklo imena plazma

Sredinom 19-tog stoljeća češki fiziolog Jan Evangelista Purkinje (1787-1869) upotrijebio je grčku riječ „plazma“ (formed, moldable substance, jelly) kako bi opisao prozirnu tekućinu koja preostane nakon što se iz krvi uklone sve čestice. Pedesetak godina kasnije, (1927.) američki znanstvenik Irving Langmuir (1881.-1957.), (lang´myoor') je predložio da se elektroni, ioni i neutralne čestice u ioniziranom plinu, mogu na sličan način smatrati „krvnim česticama“ u nekakvom tekućem mediju. Pokazalo se kasnije da takav medij ne postoji, no termin plazma je ostao, kao i zbnjujuće nazivlje, plazma u fizikalnom smislu i krvna plazma pojam koji puno češće čujemo u svakodnevnom životu. Prema Wikipediji prvi je plazmu opisao na znanstveni način Sir William Crookes (1832.-1919.) godine 1879. nazvavši je "materijom koja zrači". No i daleko ranije grčki filozof Empedoklo prepoznao je postojanje četiri "elementa", oblika materije: zrak, voda, zemlja i vatra. Danas, iako su blagodati svakodnevnog života neodvojive od plazme, postoji još uvijek potreba za stalnim jačanjem svijesti o plazmi, za razumijevanjem znanosti plazme i tehnoloških primjena plazme. Jer nekako plazma nam nije očigledna kao zrak (plin), voda (tekućine), i zemlja (krute tvari). Plazma je stanje materije koje nije pogodno za život kakav poznajemo. Nas i nama prihvatljivi okoliš čine krutine i tekućine uronjene u plin. Zato nam plazma i nije toliko bliska. No i to se polako mijenja, stalnim boravkom ljudi u ionosferi unutar Međunarodne svemirske letjelice (ISS), stječu se nova iskustva neposrednog kontakta s plazmom.

* neki dijelovi teksta i slike su preuzeti iz referenci [1] i [2].

Važnost plazme

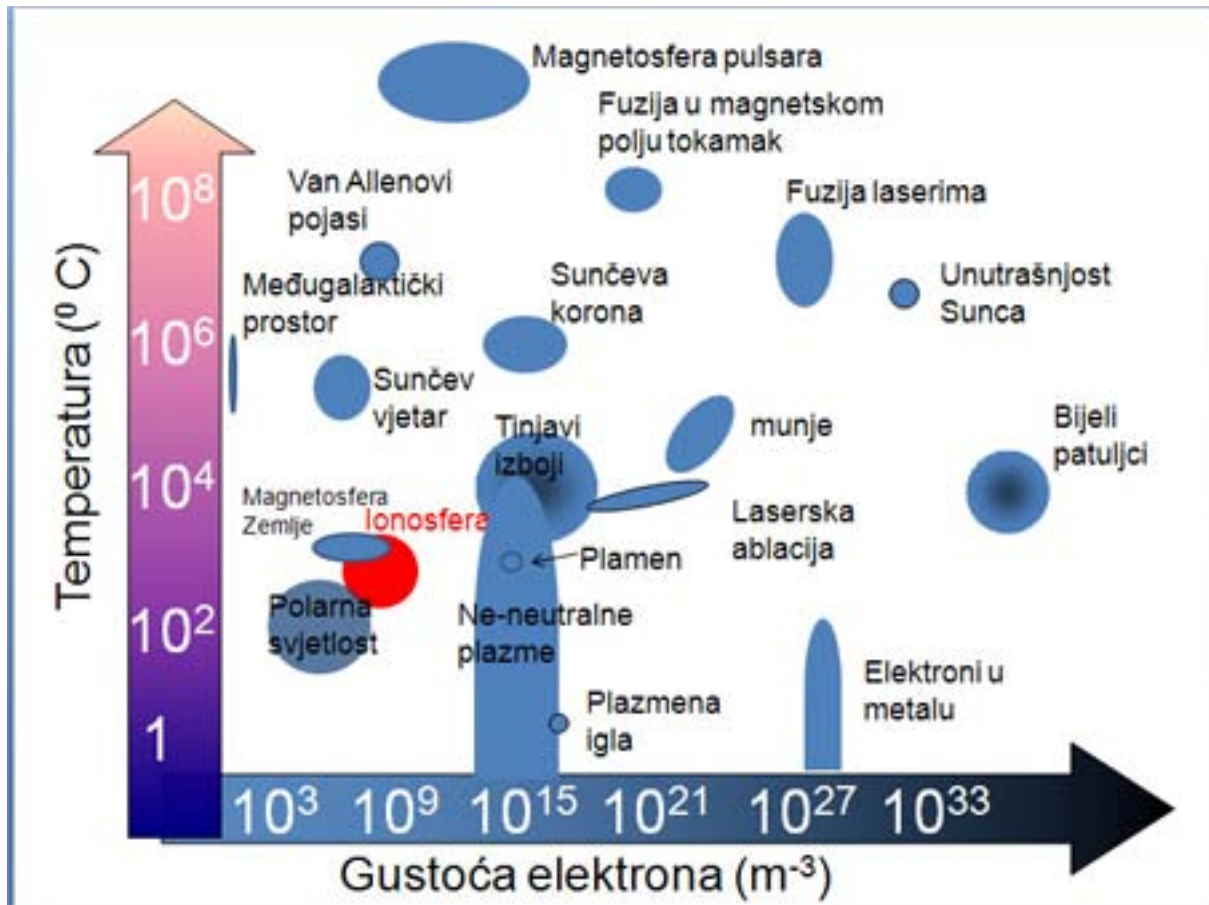
Gibanje slobodnih elektrona i iona u plazmi u mnogome je opisano fizikalnim zakonima koje su poznavali fizičari već krajem 19. stoljeća. No usprkos tome ponašanje raznih plazmi često je vrlo zakučasto i ponekad misteriozno. Počevši od dramatičnih sunčevih bljeskova, polarne svjetlosti [3] ili čestih svakodnevnih munja [4], raznolikih atmosferskih izboja, crvenih sprajtova (vatrenjaka) ili rijetkih kuglastih munja pa do hladnih kemijski aktivnih plazmi koje se u tvornicama koriste za izradu kompjuterskih čipova ili solarnih ćelija, istraživači i inženjeri susreću se sa raznoraznim nestabilnostima, turbulencijama, nelinearnim fenomenima, kaosom i redom koji se izmjenjuju. Enorman je napredak u razumijevanju plazme ali isto tako pregršt je otvorenih pitanja kako u temeljnim istraživanjima tako i u raširenim tehnološkim primjenama.

Upravo su tehnološke primjene plazme jedan od osnovnih pokretača istraživanja i opravdanja za nova ulaganja. Proizvodi koje je omogućila tehnologija na bazi plazme preplavili su našu svakodnevnicu. Svi mikroelektronički elementi, izvori svjetlosti, veliki plazma zasloni, solarne ćelije, lopatice turbo motora, biokompatibilni ljudski umetci, razni tekstilni proizvodi, ili se temelje na plazmi ili se ona koristi u njihovoj proizvodnji. Danas ne zaobilazni tehnološki postupci kao što je zavarivanje, eliminacija otpadnih tvari, sterilizacija medicinske opreme i umetaka, pročišćavanje zraka, i još mnogi drugi, koriste neku vrst plazme. Fuzija, jedno od mogućih energetske rješenja za budućnost čovječanstva, temelji se na tehnološkom dostignuću stvaranja i kontrole guste i vruće plazme kakva postoji samo u zvijezdama.

Plazma je izuzetno širok pojam: ima plazmi koje možemo dotaknuti da nam se ništa ne dogodi (plazmena igla), koje nas mogu spržiti (plamen ili munje), ili u kojima se sve tvari razgrađuju na osnovne elemente (plazmene mlaznice za spaljivanje otpada), ili pak plazmi u kojima se jezgre atoma spajaju (tokamak), plazmi u čijem laganom sjaju možemo uživati (polarna svjetlost), uz čiju pomoć možemo noću čitati (fluorescentne cijevi, štedne žarulje), lakše voziti gradom (visokotlačne natrijeve žarulje) ili koja nas može oslijeptiti ako gledamo direktno u nju (Sunce).

Plazme je moguće opisati pomoću tri osnovna parametra: temperature čestica, gustoće čestica, i jačine stacionarnog magnetskog polja. Temperatura se mjeri u elektron voltima ($1 \text{ eV} = 11066 \text{ Kelvina}$), gustoća u broju čestica po metrima kubičnim a magnetsko polje u Teslama. Te osnovne parametre nalazimo u ogromnom rasponu veličina. Jedna ilustracija određenih vrsta plazme prikazana je na slici 1.

Plazma može biti ili blagotvorna ili opasna (češće) ali gotovo uvijek je „lijepa za oko“ jer jedno od osnovnih njenih svojstava je da zrači svjetlost. Upravo ta svjetlost nam donosi osnovne informacije o Svemiru, veličini, strukturi, kemijskom sastavu. Vjerojatno najljepše snimljene fotografije su one koje je napravio teleskop Hubble, a sve one predstavljaju plazmu u različitim oblicima (od golemih međugalaktičkih prostora ispunjenih vrućim magnetiziranim plazmama do gustih plazmi od kojih se sastoje zvijezde).



Slika 1: Različite vrste plazmi s obzirom na gustoću elektrona i temperaturu.

Plazma je kompleksan sustav, izrazito nelinearan. Obiluje fenomenima koji su prisutni i u drugim oblicima materije. U fizici plazme susreću se slični problemi kao i u npr. fizici čvrstog stanja: samo-organizirajući fenomeni, kaos, turbulencije, fazni prijelazi, kritične pojave. Sva stanja materije mogu se miješati - doticati. Posebno su zanimljivi prijelazi krutina/tekućina krutina/plin, tekućina/plin. No u tu priču možemo ubaciti i plazmu! Tako su granice krutina/plazma, tekućina/plazma, plin(para)/plazma ključni objekti današnjih istraživanja vezanih uz tehnološke primjene. Mnogo je otvorenih temeljnih pitanja ponašanja nelinearnih i neravnotežnih složenih plazma sustava.

Nedavno je objavljen izvještaj Američke akademije znanosti koji daje sažeti pregled najvažnijih dostignuća u području plazme posljednjih desetak godina na preko 200 stranica [5]. Izdvojeno je nekoliko najznačajnijih pravaca istraživanja za budućnost: nisko temperaturne plazme - fundamentalna istraživanja i industrijska primjena; visoko energetska plazma fizika vezana poglavito uz inercijalnu fuziju pomoću jakih lasera; istraživanje magnetske fuzije (ITER);

prostorne i astrofizičke plazme. Fundamentalna istraživanja u plazmi obrađena su kroz osam istaknutih fokusa istraživanja: neneutralne jednokomponentne plazme, ultrahladne plazme, prašinate plazme, laserski proizvedene i plazme visoke gustoće energije, mikroplazme, turbulencije i turbulentni transport u plazmi, magnetska polja u plazmama, plazmeni valovi-strukture i tokovi. Glavni istaknuti još neriješeni problemi vezani su uz: eksplozivne nestabilnosti u plazmi, multifaznu dinamiku plazme (međudjelovanje plazme sa ne-plazmom), ubrzanje čestica i energetske čestice u plazmama, turbulencije i transport u plazmama, magnetsku samoorganizaciju u plazmama, i korelacije u plazmama. Možda ovako nabrojeno zvuči nerazumljivo, ali rješavanje i razumijevanje tih problema vezano je uz preživljavanje na Zemlji i uz mogućnosti osvajanja drugih svemirskih prostora.

Kako nastaje plazma.

Krenimo od krutina. Njihova struktura određena je elektromagnetskim silama koje određuju statičke razmještaje atoma i molekula, (npr. u kristalnoj strukturi). U takvim strukturiranim sustavima energije vezanja osnovnih ćelija veće su od okolne termalne energije. Ako nešto što je u početku kruto tijelo stavimo u dovoljno vruću okolinu, temeljna struktura se razara: kristali se tope (npr. led se pretvara u tekućinu), tekućina se pretvara u paru (u slobodne molekule koje se sudaraju), a molekule u plinu/pari se razdvajaju na atome koji ih sastavljaju (disociraju). Na isti način pri još većim termalnim energijama atomi se u sudarima rastavljaju na negativno nabijene elektrone i pozitivno nabijene ione. Te nabijene čestice u gibanju stvaraju električka i magnetska polja koja u povratu utječu na sve te čestice. Materija u takvom stanju je plazma.

Dakle općenito plazma nastaje dovodenjem energije plinu. Na primjer zagrijavanjem plina ili ubacivanjem visokoenergetskih čestica u plin. Samo klasično zagrijavanje i nije baš efikasno. Na primjer da bi ionizirali vodenu paru potrebna nam je energija od oko 12 eV, tj. temperatura od oko 12 000 stupnjeva. Visoko energetske čestice mogu biti na primjer elektroni, protoni, ioni i fotoni.

Jedan od osnovnih načina stvaranja plazme pod čovjekovom kontrolom je pomoću električnih izboja, po uzoru na ono što se neprestano odvija u prirodi (Slika 2). Plazma nastaje uz pomoć električne energije – električno polje prenosi energiju na elektrone u plinu (elektroni su najpokretljivije nabijene čestice, 1836 puta lakše od protona). Energija elektrona prenosi se na neutralne čestice u plinu putem sudara. Sudari mogu biti elastični (kinetička energija se ne mijenja) i neelastični (elektroni gube energiju koja se prenosi na česticu).

Kad je energija elektrona dovoljno velika u sudaru s neutralnom česticom dolazi do promjene elektronske strukture čestice. Što je energija sudara veća redom su vjerojatniji procesi pobude atoma/molekula (prijelaz vezanog elektrona atoma u višu atomsku orbitalu), razdvajanja (disocijacije) atoma koji čine molekulu, ili pak ionizacije (izbacivanja elektrona iz atoma

odnosno molekula). Energije pobude atoma iznose od minimalno cca 1.5 do 4-5 eV, dok se energije ionizacije kreću od cca 5- 15 eV. Energije vezanja atoma u molekulama su manje, pa tako u molekularnim plazmama prvo dolazi do raspada (disocijacije) molekula.



Slika 2: Prikazani niz fotografija dokumentira munju snimljenu u ljeto 2007. na Brijunima za vrijeme jedne kratke ljetne oluje. 15 fotografija odgovara vremenu jedne sekunde (snimljeno pomoću Olympus fotoaparata). Takva vrst ionizacije plina (zraka) dešava se na Zemlji vrlo često (oko 30 bljeskova u sekundi) a još uvijek nije u potpunosti razjašnjena! [6].

Plazma – materija koja zrači svjetlost

Pobuđeni atomi/molekule u pravilu kratko žive u takvom stanju, tipično nekoliko nanosekundi, tijekom kojih se atom vraća u osnovno (početno) stanje uz emisiju fotona. To „u pravilu“ znači da postoje i stanja atoma i molekula koja žive znatno dulje (metastabilna stanja), npr. mjereno mikrosekundama ili čak minutama. Npr. jedno stanje atoma helija živi 8000 sekundi (naravno to se može desiti samo ako u tom vremenu atom helija ne doživi nikakav sudar). I druga tako stvorena stanja atoma, molekula (radikala) i iona kratko žive. Pozitivni ioni se rekombiniraju, ponovno hvataju nedostajući elektron i tako nastaju atomi u visoko pobuđenom stanju koji zrače fotone. Radikali (npr. pojedinačni atomi kisika, vodika ili njihova molekula OH) brzo se rekombiniraju ponovo stvarajući izvorne stabilne molekule (npr. dvoatomsku molekulu kisika, vodika), također često u pobuđenom stanju koje zrači neke svoje karakteristične fotone. Ili se pak, takvi radikali, vežu s nekim drugim česticama u plazmi. Glavni rezultat je dakle, emisija fotona (svjetlosti) iz plazme. Iz te emisije može se iščitati što se u plazmi događa. Takva svjetlost iz plazme je osnovni izvor informacija o čitavom Svemiru.

Da bi se plin održao u stanju plazme potrebno mu je stalno dovoditi energiju. Ovisno o načinu dotoka energije i količini prenesene energije mijenjaju se svojstva plazme izražena preko gustoće elektrona i temperature čestica.

Plazma je općenito gledano manje ili više ionizirani plin. Sastoji se od elektrona, iona i neutralnih čestica koje mogu biti u osnovnom ili pobuđenim stanjima. Gledano iz daleka plazma je električki neutralna (jednak je broj pozitivno i negativno nabijenih čestica), no plazma sadrži slobodne nosioce naboja (elektrone, pozitivne i negativne ione) i električki je vodljiva. Na rubovima plazme (u doticaju s drugim agregatnim stanjima materije) neutralnost plazme je narušena. Plazmama na temperaturi ispod 1 eV dominiraju neutralne čestice (npr. čisto ionske plazme ili plazme atni-materije), plazme iznad 1 eV su djelomično ionizirane (ionosfera, tinjajući izboji, bijeli patuljci), u rasponu do 100000 eV i više potpuno ionizirane (magnetosfera, magnetska fuzija, inercijalna fuzija), a iznad 100000 eV do 10000000000 eV nalazimo relativističke plazme (plazma akceleratora ili plazme vezane uz crne rupe).

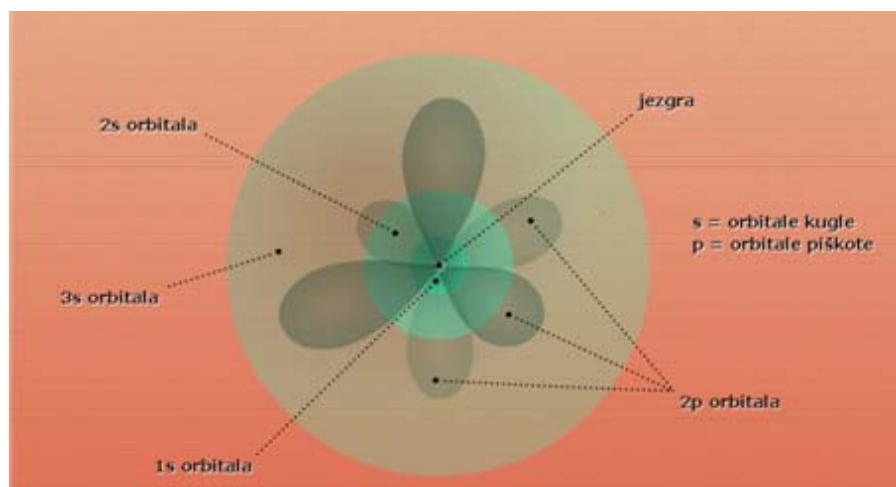
Svjetlost

Što je to svjetlost? U srednjoškolskim udžbenicima s početka 20. stoljeća piše jednostavno, svjetlost je ono što čini objekte oko nas vidljivima. Jednostavno i prihvatljivo mnogima ali ne i fizičarima. Danas piše, svjetlost je elektromagnetski val. Nakon toga, negdje na kraju školovanja, kaže se, svjetlost je i val i čestica, nimalo jednostavno za shvatiti. Vjerojatno ništa manje razumljivo je reći svjetlost je „izobličenje geometrije višedimenzionalnog prostora“. Možda će to pisati u udžbenicima 22. stoljeća, danas je vjerojatno prerano iako proizlazi iz matematičke apstrakcije (teorije) koja je vjerojatno točnija (elegantnija) i sveobuhvatnija od valno-čestičnog opisa. Pisati o tome više unutar ove teme odvelo bi nas predaleko. Ipak nedavno na našem tržištu pojavile su se dvije vrlo dobre knjige koje pružaju dobar uvod u tematiku: Hiperprostor Michio Kaku-a u izdanju (prijevodu) Algoritma (2006) [7] i Euklidov prozor Leonarda Mlodinowa u izdanju (prijevodu) Izvori (2007) [8]. Preporučam obje. Za svakog fizičara i studenta gotovo da bi trebalo biti pod preporukom „obavezno pročitati“, bilo da se radi o znanstveniku ili školskom profesoru. Niti tinejđerima neće biti strane. Posebno ova druga pročita se u jednom dahu (usprkos brojnim štamparsko-prevodilačkim greškama). Kod prve knjige ja sam malo zapeo iza polovice, jer autor prenapadno opisuje svoje vlastite rezultate i time gubi na tečnosti izlaganja. No prvi dio knjige je vrlo privlačan i zanimljiv. A obje knjige govore o razvoju ideje višedimenzionalnog poimanja Svemira od samih početaka razvoja znanosti pa do današnjih vrlo nedavnih dana. Od Euklida, preko Descartesa, Gaussa, Einsteina pa do Wittena najcitiranijeg živućeg znanstvenika. Ili drugim riječima priče su to za uvod u M-teoriju struna (1995), trenutno hit fizikalnu teoriju. Ona vjerojatno obuhvaća i odgovor na pitanje što je to svjetlost. Kako to lijepo opisuje Richard Dawkins na kraju svoje knjige „Iluzija o bogu“ (Izvori, 2007) [9] evolucijski razvoj ljudskog

mozga nije nas opremio intuicijom pomoću koje bi bilo lako shvatiti dualnost prirode svjetlosti ili višedimenzionalnost prostora iz koje ona proizlazi. Naprosto za to nije bilo potrebe. Do nedavno. Iako na početku navedena definicija plazme ne spominje svjetlost ona je njen neodvojivi dio. Svaka plazma zrači svjetlost i osim poznavanja gustoća svih vrsta čestica i njihovih temperatura, te magnetskog polja, nužno je, za njen potpuni opis, uzeti u obzir i samo zračenje (fotone) koje nastaje u plazmi. A to zračenje (svjetlost) je fascinantno, koliki samo put prevali od najudaljenijih zvijezda da bi nam pružilo informaciju o svojem porijeklu? Treba još napomenuti, doživljaji svjetlosti koje nazivamo bojama istovremeno stvaraju i sasvim određeni model Svemira svojstven samo ljudima. Taj model neprestano se nadograđuje širenjem područja elektromagnetskog zračenja koje možemo proučavati. Nismo više ograničeni vlastitim vidom.

Atom u plazmi – izvor svjetlosti

Atom se sastoji od jezgre, koju čine protoni i neutroni, te elektrona. Ukoliko se radi o neutralnom atomu, a ne ionu, tada je broj elektrona jednak broju protona, i ukupan naboj je nula. U kvantno-mehaničkom modelu atoma kaže se da postoji vjerojatnost nalaženja elektrona negdje unutar orbita. Ne možemo točno reći gdje je elektron u okolini jezgre. Možemo samo govoriti o vjerojatnostima da se nalazi u nekom području. Područja najveće vjerojatnosti nalaženja atoma ovise o energiji koju ima elektron.



Slika 3: Shematski prikaz litijevog atoma. Različite animacije procesa izmjene fotona unutar atoma možete naći u Ref. [2].

Na slici 3 je prikazana shema litijevog atoma. Tri protona i tri neutrona nalaze se u jezgri, a u elektronskom omotaču tri elektrona. Slika prikazuje područja u kojima se najvjerojatnije nalazi elektron ukoliko ima energiju koja odgovara 1s, 2s, 2p ili 3s orbitali. Ako atom nije pobuđen tada se svi elektroni nalaze u orbitalama s najmanjom energijom. Dakle, u slučaju litija, dva će se elektrona nalaziti u 1s podljusci i jedan još elektron u 2s podljusci. U svaku podljusku stanu najviše dva elektrona. Bitno je naglasiti da energije elektrona u podljuskama također ovise i o atomu o kojem je riječ, tj. o tome kakva je jezgra. Npr. energija elektrona u 2p ljusci ugljika nije

ista kao energija elektrona u 2p ljusci bizmuta, kalcija, ili bilo kojeg drugog elementa. Ta razlika u energijama podljusaka od elementa do elementa osnova je njihovog spektroskopskog raspoznavanja i neka vrsta atomskog „otiska prstiju“.

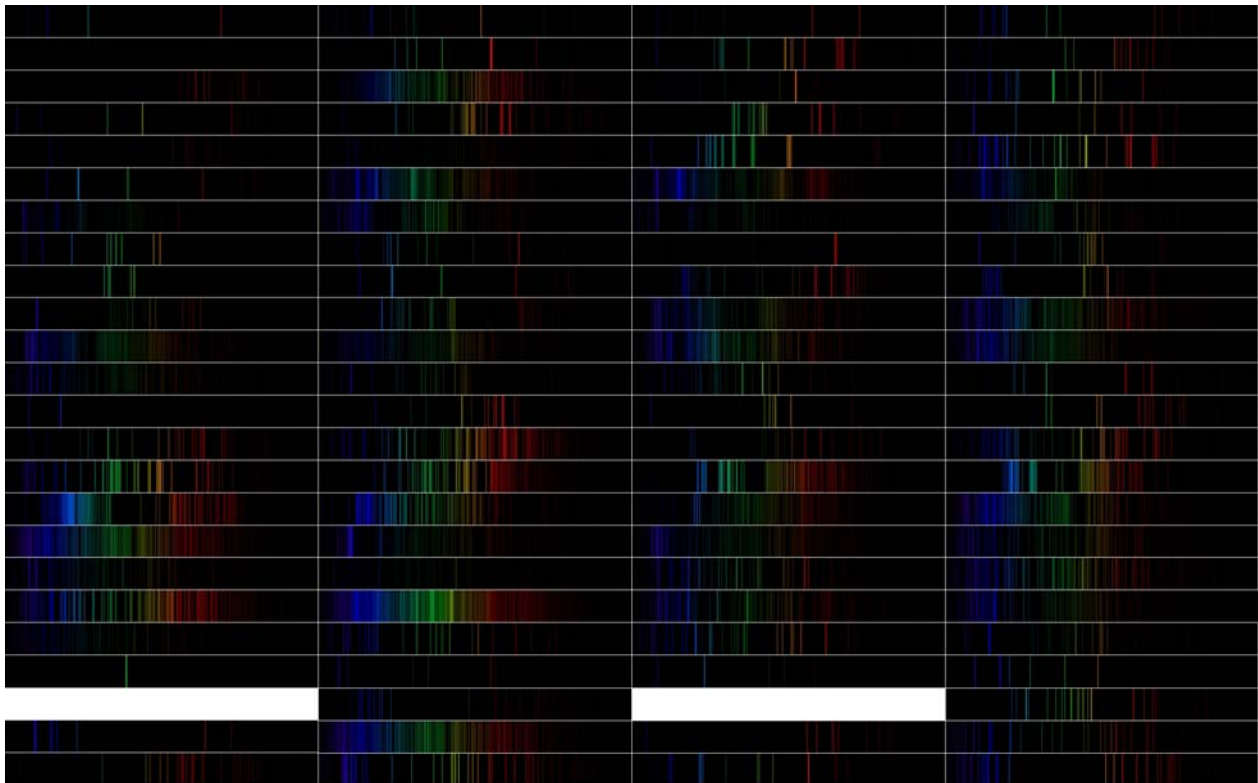
Razlikujemo tri osnovna procesa u atomu: stimulirana apsorpcija, spontana emisija i stimulirana emisija. Putem njih svjetlost nastaje i nestaje. *Stimulirana apsorpcija* - ako atom obasjamo svjetlošću čiji fotoni energetski odgovaraju nekom mogućem prijelazu elektrona iz jedne orbitale u drugu, doći će do apsorpcije fotona, elektron prelazi u orbitalu više energije - atom je pobuđen. *Spontana emisija* - u pobuđenom atomu, slobodnom u prostoru, nakon nekog vremena doći će do prijelaza elektrona iz pobuđene orbitale u nižu, manje energetsku. Takav prijelaz nije u potpunosti spontan, kako to naziv ukazuje već ga induciraju svugdje prisutne fluktuacije vakuuma. (opaska: izoliranjem modova vakuuma npr. u optičkom rezonatoru moguće je produljiti vrijeme unutar kojeg će doći do spontane emisije). Tipična vremena života pobuđenih stanja su reda veličine nekoliko desetaka nanosekundi (jedna nano sekunda je 0.000000001 sekundi). *Stimulirana emisija* - ako pobuđene atome obasjamo svjetlošću, foton koji nailazi može inducirati "otpuštanje" istog takvog fotona iz atoma. Taj proces osnova je za stvaranje koherentnog - laserskog svjetla. Procese stimulirane apsorpcije i emisije, i spontane emisije u atomu prvi je razumio i objasnio Albert Einstein u svojim radovima iz 1917. godine.

Svaki atom ima svoju strukturu, određenu popunjenost mogućih orbitala. Dovođenjem energije atomu (npr. u sudaru s nekom česticom), elektron u najdaljoj orbitali od jezgre, prelazi u neku dalju (energetskiju). Nakon toga elektron može prijeći (skočiti) u neku orbitalu niže energije. Pritom se emitira jedan foton, djelić svjetlosti, točno određene frekvencije (energije). Za svaki atom moguć je poseban niz takvih skokova, koji rezultiraju karakterističnim nizom spektralnih linija (spektrom). Po takvom nizu svaka vrst atoma se može jednoznačno prepoznati.

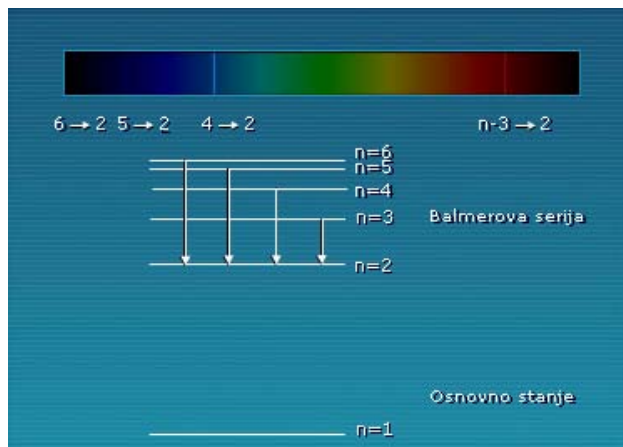
Na primjer, ako svjetlost koja dolazi od neke udaljene zvijezde razložimo u spektar, možemo saznati kakvih sve atoma u njoj ima, makar ona bila udaljena od nas desecima svjetlosnih godina. Naravno, spektar svakog atoma moramo vrlo dobro upoznati u laboratorijskim mjerenjima. Na slici 4 prikazan je periodni sustav na malo neuobičajen način, pomoću spektara. Možete primijetiti da što je atom teži (ima više elektrona) njegov niz spektralnih linija postaje sve složeniji. Primjećujete li možda i kakvu dodatnu strukturu u stupcima? Važno je reći da svi atomi imaju i značajne atomske linije u području od 200 nm do 400 nm.

Energetska stanja u atomu često se prikazuju u vidu term dijagrama. Na slici 5 je prikazan dio term dijagrama vodikovog atoma. Strelicama su ilustrirani (dipolno) dozvoljeni prijelazi između energetskih stanja koji daju čuvenu Balmerovu seriju. Vodik je najjednostavniji atom. Svaki slijedeći atom ima sve složeniju strukturu. Danas je moguće doći do term dijagrama svakog atoma putem interneta pristupom NIST-voj bazi podataka [10] (NIST je američki institut za

standarde i tehnologiju). I to nije sve, za mnoge atome moguće je izračunati spektar na određenoj elektronskoj temperaturi.



Slika 4: Periodni sustav prikazan preko atomskih spektara. Prvi red: H, He, Li, Be, drugi red: B, C, N, O itd. Prikazani su vidljivi dijelovi spektra od 380 nm do 780 nm. Treba napomenuti da je ovo samo RGB prikaz spektara. Više o tome kako su ovi spektri napravljeni možete naći u ref. [2] i [11], kao i „pravi“ periodni sustav sa pripadnim spektrima atoma.



Slika 5: Djelomični term dijagram vodikovog atoma, koji ilustrira čuvenu Balmerovu liniju. Potpuni term dijagram znatno je složeniji, pogotovo za teže atome, ali lako dostupan putem interneta [8].

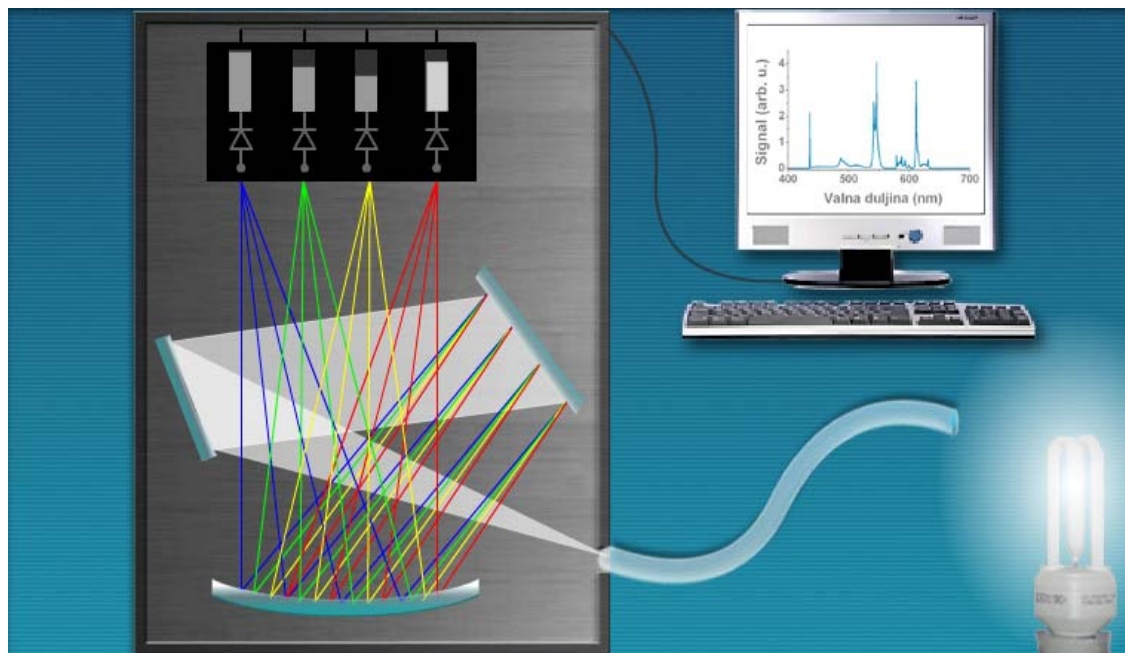
Spektroskopija plazme

Gotovo sve što znamo o Svemiru, a nije vezano uz naš planet Zemlju, naučili smo na daljinu. Zasad ne možemo (osim u Zvezdanim stazama) neposredno mjeriti zvijezde osim našeg Sunca, niti nabaviti djelić njihova materijala da bi ga proučili u laboratoriju. Preostaje nam samo svjetlost koja dolazi do nas iz najudaljenijih dijelova prostora. Budući da je svjetlost (elektromagnetsko zračenje) proizvedena u običnoj materiji i međudjeluje s njom putujući kroz nju, ono što možemo učiniti je dešifrirati poruku svjetlosti i naučiti mnogo o izuzetno dalekim svemirskim objektima. To su samo neki zadaci kojima se bavi spektroskopija, jedna od temeljnih metoda suvremene znanosti. No, spektroskopija nije važna samo za proučavanje Svemira. Još je važnija u rješavanju sasvim zemaljskih problema.

Spektroskopski krug počinje u izvoru svjetlosti, činom stvaranja svjetlosti, njenim usmjeravanjem u spektrometar u kojem se razlučuje u sastavne boje, detektira, zapisuje u vidu spektra, analizira i simulira pomoću atomske, kvantne teorije. To sve pruža korisne, primjenjive informacije o izvoru svjetlosti i materiji kroz koju je svjetlost putovala. Spektroskopiju je "otvorio" Newton u prvoj polovici 17. stoljeća, kada je Sunčevo svjetlo razložio pomoću staklene prizme gledajući spektar na 6 metara udaljenom zidu. Danas je spektroskopija daleko odmakla, i što je najvažnije, osim u skupim laboratorijima, može se u njoj uživati i u svakom prosječnom domaćinstvu, uz kutiju od cipela, CD ili DVD, dva žileta, digitalnu kameru (ili mobitel), osobno računalo i internet.

Kako radi CCD spektrometar

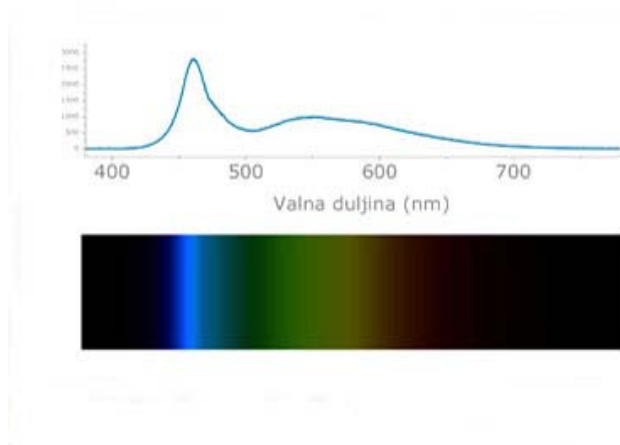
Svjetlost emitirana iz nekog izvora ulazi u spektrometar pomoću optičkog svjetlovoda. Tu upada najprije na sferno zrcalo da se od upadnog divergentnog snopa dobije usmjereni snop koji zatim upada na optičku rešetku gdje se razlaže po bojama (frekvencijama). Pomoću drugog sfernog zrcala svaka se razložena boja usmjerava na točno određeni dio CCD (engl. charged couple device) ploče. Na tom dijelu CCD ploče nalazi se fotodiode gdje se upadna svjetlost pretvara (fotoelektričnim efektom) u struju. Nakon fotodiode spojen je kondenzator koji se tada počinje nabijati. Struje će biti veća što je više fotona upalo na fotodiodu pa će se kondenzator više nabiti. Nakon nekog vremena (tzv. vrijeme integracije) zatvara se strujni krug te se pomoću A/D pretvarača očitava koliko je naboja na pojedinom kondenzatoru. Takvi digitalizirani podaci prikazuju se tada na računalo. Nakon što se iščitaju podaci kondenzatori se isprazne i ciklus kreće ispočetka. Što su ovi ciklusi kraći imamo bolju vremensku razlučivost, a što je više (sitnijih) fotodiode to je bolja razlučivost po valnim duljinama.



Slika 6: Ilustracija rada CCD minijaturnog spektrometra. Preuzeto iz reference [2].

Spektar

Tradicionalno, čovjek je prvo počeo opažati spektre okom i bilježiti dojmove (na primjer Newton je crtao i opisivao svoja opažanja u eksperimentu sa sunčevim svjetlom i prizmom). Zatim su se pojavile fotoploče, crnobijele, pa u boji. Danas se spektri bilježe tako da se signal iz detektora (CCD) direktno zapisuje u računalu i zatim iscrtava u obliku grafa u kojemu je na osi x valna duljina, a na osi y veličina koja je proporcionalna intenzitetu svjetlosti. Najčešće je intenzitet naveden u proizvoljnim jedinicama jer je apsolutno baždarenje detektora vrlo složen postupak, i često nepotreban. Na slici 6 su prikazana usporedno dva načina prikazivanja spektara.



Slika 6: Ilustracija spektra prikazanog u vidu x-y grafa i odgovarajućeg „foto“ zapisa. Spektar odgovara bijeloj svjetlećoj diodi [2].

Osnovni način je x-y graf u kojem je na osi x prikazana valna duljina a na osi y intenzitet svjetlosti na danoj valnoj duljini. Drugi način, možda atraktivniji po izgledu je direktni foto zapis u boji. Moramo napomenuti da su svi prikazani fotozapisi spektara ovisni o RGB proceduri i načinu na koji računalni monitori reproduciraju boju. A to je još uvijek daleko od one ljepote koju možete doživjeti ako sami direktno okom gledate u spektrometar.

Plazma kao izvor svjetlosti

Plazma kao izvor svjetlosti nam je vjerojatno najbliža, prisutna u svakodnevnom životu. Naime svaka fluorescentna odnosno „štedna“ lampa predstavlja hladnu plazmu. U principu fluorescentna lampa je relativno uska staklena cijev, sa zataljenim krajevima u kojima se nalaze elektrode (tanke žice). Po unutrašnjoj površini cijevi nanesen je fluorescentni prah, materijal koji ima svojstvo da ultravioletno zračenje pretvara u bijelu svjetlost. Iz cijevi je uklonjen zrak, i stavljen neki plin (argon ili neon, možda malo kripton) i jedna mala kapljica žive, jedinog tekućeg metala na sobnoj temperaturi koji ima visok tlak para. Tlak plina je relativno mali u odnosu na atmosferski (cca 10-50 Pa). Elektrode se spoje u strujni krug s izvorom napona i jednim „starterom“, elektroničkim sklopom koji u početnom trenutku osigurava visoki napon između elektroda. Taj visoki napon, odnosno električno polje, ubrzava elektrone u plinu (uvijek nešto slobodnih elektrona postoji koji su posljedica kozmičkog zračenja; elektroni također mogu poticati iz zagrijanih elektroda), elektroni ioniziraju plin, stvori se plazma kojom poteče struja.



Sudari s elektronima pobuđuju atome argona i žive koji zatim zrače svoje karakteristične linijske spektre. Posebno je važna emisija žive koja ima najizdašnijiu emisiju na 256 nm, duboko u, za ljudsko oko štetnom, ultravioletnom području spektra. No fluorescentni prah pretvara to zračenje u korisno vidljivo. Nove „štedne“ lampe samo su raznorazne varijante lampi sa

različitim fluorescentnim prahovima čija je efikasnost pretvorbe UV u vidljivo zračenje vrlo visoka. Osim što su korisne, jer štede energiju, takve lampe su izvrstan izvor svjetlosti za demonstraciju spektroskopije u školi, i pomoću njih je moguće izvesti niz pokusa u školi i kod kuće. Njihov spektar je kombiniran: linijski i kontinuiran. Drugi primjer plazme kao izvora

svjetlosti su takozvane visokotlačne živine ili natrijeve lampe koje najčešće susrećemo u javnoj rasvjeti. Spektrom takvih lampi dominiraju izuzetno proširene atomske linije.

Laserska plazma

Kada svjetlost Sunca pomoću staklene leće fokusiramo na papirić ili suhi list možemo toliko podići temperaturu u jednoj točki da dođe do požara. Jednako tako ako pomoću staklene leće fokusiramo lasersko svjetlo na malu površinu nekog materijala doći će zagrijavanja površine i kratkotrajnog izbacivanja (isparavanja) materijala. Najčešće se koriste snopovi kratkotrajnih pulseva svjetlosti (nanosekundni). Golema koncentracija fotona (djelića svjetlosti) unutar male površine na meti u kratkom vremenu, u međudjelovanju s metom, izbacuje elektrone iz krutog materijala. Meta se topi u tankom površinskom sloju i atomi i molekule izljeću iz mete. Elektroni apsorbiraju preostale fotone iz laserskog snopa i dodatno se ubrzavaju. Takvi energetski elektroni atomiziraju i ioniziraju čestice isparenog materijala. Nad metom se stvara plazma koja se brzo širi u prostor. Od vrlo vruće i guste plazme u prvim trenucima plazma prelazi u hladnu i rijetku nekoliko mikrosekundi nakon početnog pulsa. Taj proces nazivamo laserska ablacija ili laserom inducirana plazma.

Slika 7 prikazuje plazmu stvorenu laserom i različite zone plazmenog oblaka. Snop kratkotrajnih pulseva laserskog svjetla (nanosekundni Nd-YAG infracrveni laser) fokusiran je pomoću leće na metu (litij). Postoji niz primjena tog procesa u znanstvenim istraživanjima i tehnološkim procesima. Ovisno od svojstva materijala (npr. tvrdoće) energije laserskog pulsa i njegovog vremenskog trajanja, te boje lasera, moguće je sa neke mete skidati od samo slojeva atoma i molekula, do slojeva nano ili mikrometerske debljine samo jednim bljeskom. Kako energija pulsa raste laser buši metu, reže i najčvršće materijale, stvara plazmu u kojoj se čestice ubrzavaju do brzina zanimljivim za akceleratoru ili se stvara toliko gusta plazma da je u njoj moguće postići fuziju.

LIBS (engl. laser induced breakdown spectroscopy) je metoda koja se temelji na laserskoj ablaciji i brzom prikupljanju spektara unutar nekog vremenskog intervala (u jednoj sekundi može snimiti desetke spektara). Zbog toga se kaže da je to "real-time" spektroskopija. Laserski puls fokusiran preko leće pada na uzorak i isparuje malu količinu ispitivanog uzorka (reda veličine 1 mikrogram) koji se zagrijava i stvara oblak vruće plazme s temperaturom višom od 1000 K. Pri toj temperaturi ispareni materijal se atomizira i sadrži visoko pobuđene ione i atome. U vremenima kraćim od oko 100 ns plazma zrači kontinuum koji ne sadrži korisne informacije o uzorku koji se ispituje, no kroz vrlo kratko vrijeme plazma se širenjem hladi i rekombinira pri čemu se javlja karakteristično zračenje elemenata prisutnih u uzorku. Ta se emisija skuplja

pomoću optičkog svjetlovoda i odvodi na brzi CCD spektrometar, odakle se digitalizirani podaci mogu obrađivati na računalu. Budući da vrlo mala količina uzorka sudjeluje u procesu laserske ablacije LIBS se smatra relativno nedestruktivnom metodom. Jedan minijaturni LIBS uređaj planira se za buduću misiju na Mars, jer metoda također radi i na daljinu.



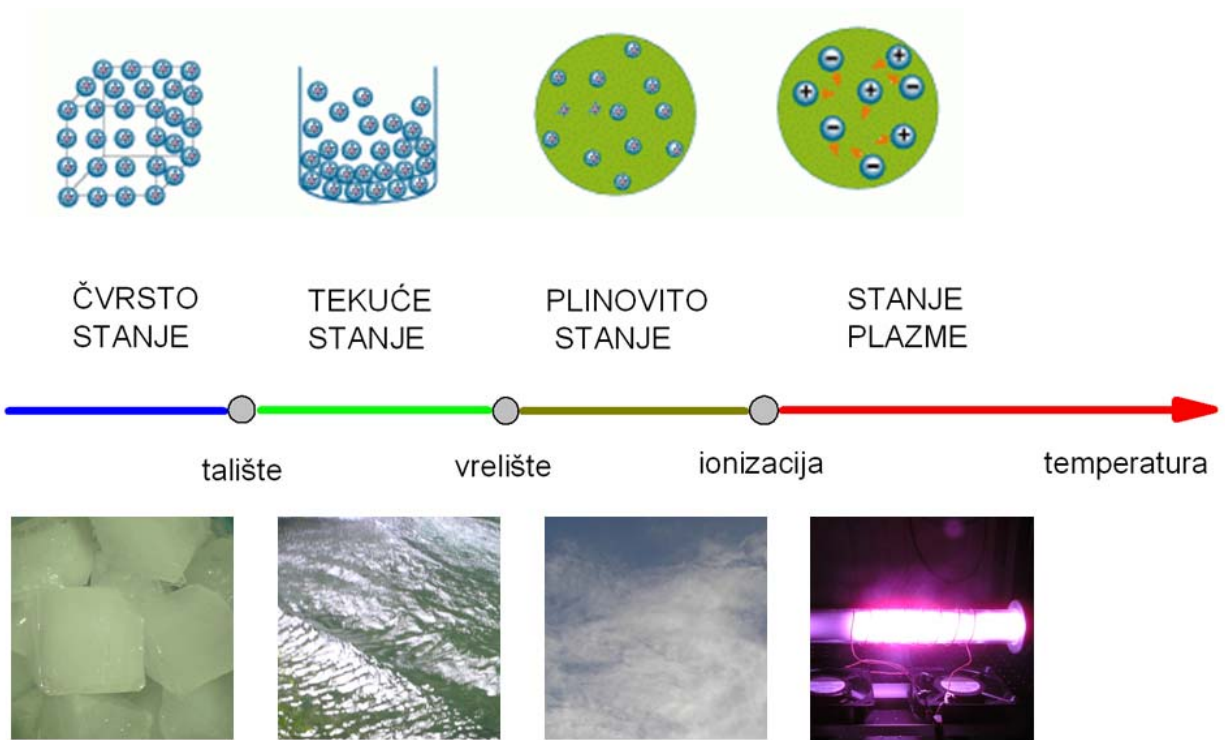
Slika 7: Ilustracija laserom inducirane plazme. U ovom slučaju, visoko energetske čestice koje zagrijavaju materiju su mnogobrojni fotoni u koherentnom laserskom snopu. Što kraće vrijeme trajanja pulsa to je veća energija [1].

Kratki osvrt na curriculum – četvrto agregatno stanje

Plazma se kao pojam ne nalazi u školskom curriculumu niti za osnovne niti za srednje škole, iako se u nekim gimnazijskim udžbenicima posredno spominje. Najčešće to je u vezi narušavanja modela idealnog plina na visokim temperaturama, kod spominjanja fuzije (termonuklearna plazma), ili MHD generatora, polarne svjetlosti i zemljine magnetosfere.

No kako odgovoriti učenicima na pitanja: U kojem je agregatnom stanju naše Sunce? Zašto zvijezde svijetle? Gdje nastaje svjetlost (i nestaje)? Odakle znamo kemijski sastav zvijezda kad nikad nitko tamo nije bio? Itd.

Bilo bi prirodno pojam plazme uvesti prilikom navođenja agregatnih stanja (odnosno njihovih promjena, slika 8) (VII raz. OŠ i II. razred gimnazije), pa bi pri kasnijem spominjanju taj pojam puno bolje konceptualno odgovarao. Time se barem obuhvate visokotemperaturne plazme.



Slika 8. Ilustracija agregatnih stanja i njihovih promjena. Temperaturno područje plazme je namjerno nacrtano malo veće jer ono u stvari obuhvaća raspon temperatura od sobne pa do 10^{14} K, dok su čvrsto tijelo ili tekućina ograničeni na daleko manji raspon temperatura. Treba još reći da kao što npr. vodena para postoji i na temperaturama ispod vrelišta tako i plazma postoji na temperaturama daleko ispod ionizacijskih temperatura (čak i ispod mikro Kelvina kod ultrahladnih plazmi). I sam pojam temperature je kompleksan, jer se kod plazme (i para i plinova) govori o kinetičkoj temperaturi pojedine vrste čestica.

Planirani pokusi i rasprave (tentativna lista) (60 min):

- demonstracija rada CCD spektrometra na ispitivanju različitih plazma izvora svjetlosti: fluorescentne lampe, štedne lampe, plazmene kugle. Kako rade i od čega se sastoje ti izvori ...
- jednostavni plazma izvor uz multivibrator i bobinu (pokus za OŠ [12],[13])
- što je moguće pokazati u učionici, vezano uz plazmu i spektroskopiju?
- izrada DVD spektrometra (potrebni pribor: kutija, CD/DVD, par žileta, samoljepljiva traka, i mobitel kao detektor) i promatranje spektara plazmenog izvora.
- gdje je sve plazma prisutna u svakodnevnom životu? – razgovor
- neke posebno zanimljive tehnološke primjene plazme: medicina (sterilizacija i kirurgija), pročišćavanje voda i zraka, zavarivanje, spaljivanje otpada, fuzija,

Literatura i preporučeni linkovi:

- [1] S. Milošević, Plazma-osnovni oblik materije u Svemiru, http://eskola.hfd.hr/proc_za_vas/proc-21/proc21.htm
- [2] N. Čutić, N. Krstulović, S. Milošević, Spektroskopija u školi, <http://susbaza.ifs.hr/onlineverzija/>
- [3] I. Lisac, Polarna svjetlost, http://eskola.hfd.hr/polarna_svjetlost/polarna_svjetlost_2003.html; o magnetosferi
http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/earth/Magnetosphere/tour/tour_earth_magnetosphere_01.html
- [4] I. Lisac, Atmosferski elektricitet, http://eskola.hfd.hr/atmosferski_elektr/Grom2006a.htm
- [5] Grupa autora, Plasma Science - Advancing Knowledge in the National Interest
http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=11960&page=R1
- [6] Joseph Dwyer <http://www.sciam.com/article.cfm?id=experts-do-cosmic-rays-cause-lightning>
- [7] Michio Kaku, *Hiperprostor*, znanstvena odiseja kroz usporedne svemire, vremenska izobličenja i desetinu dimenziju, Algoritam (2006), prijevod Ruđer Jeni.
- [8] Leonard Mlodinow, *Euklidov prozor* – priča o geometriji od paralelnih pravaca do hiperprostora, Izvori (2007), prijevod Damir Mikuličić.
- [9] Richard Dawkins, *Iluzija o Bogu*, Izvori (2007), prijevod Žarko Vodinelić.
- [10] NIST database – atomski i ionski spektri <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/index.html>
- [11] Nino Čutić, vizualizacija atomskih spektara, <http://student.fizika.org/~nnctc/spectra.htm>
- [12] B. Milotić i B. Mikuličić, Otkrivamo fiziku, udžbenik za 8. razred OŠ. Školska knjiga, Zagreb 2007. str 42. munja:
- [13] Bartolić i dr. Čudesni svijet tehnike, udžbenik tehničke kulture za 8. razred, Školska knjiga, Zagreb 2007. – elektronički elementi, pasivni aktivni, multivibrator – strana 55.