

Plazma - otkriće i pojam

Praktično celokupna materija na Zemlji postoji u tri agregatna stanja: čvrstom, tečnom i gasovitom. Majkl Faradej¹ iznosi, međutim, 1816. g. (tada je imao 24 godine), pretpostavku o postojanju četvrtog stanja materije kome daje i ime „Materija koja zrači“ („Radiant matter“) a u okviru serije predavanja koje tada drži pod nazivom „Opšte osobine materije“ jedno od njih ima i naziv „Materija koja zrači“. Šezdesetak godina kasnije Ser Viliam Kruks² koji se bavi proučavanjem fenomena pri električnom pražnjenju u gasovima, uočava da gas (obično pri niskom pritisku) u električnom polju dobija suštinski nova svojstva i to prepoznaje kao četvrto stanje materije, opisujući takvo stanje materije rečima:

“So distinct are these phenomena from anything which occurs in air or gas at ordinary tension, that we are led to assume that we are here brought face to face with matter in a fourth state or condition, a condition as far removed from the state of gas as a gas is from a liquid” ili u prevodu:

“Ovi fenomeni su toliko drukčiji od bilo čega što se dešava u vazduhu ili gasu pri običnim pritiscima, da smo prinuđeni da se suočimo sa činjenicom da je pred našim očima četvrto stanje materije, stanje koje je toliko drugačije od gasnog stanja koliko je gasno stanje udaljeno od tečnog”. Kruks 1879. godine obaveštava o ovome naučnu javnost na predavanju koje drži pod naslovom „O Materiji koja zrači“, pred Britanskom asocijacijom za naučna dostignuća (British Association for Advancement of Science), u Šefildu, Engleska [1]. Na početku predavanja Kruks podseća auditorijum na hipotezu Majkla Faradeja o četvrtom stanju materije ili o „Materiji koja zrači“. Podstaknuti Kruksovima i predavanjima, mnogi se naučnici okreću tada izučavanju različitih oblika električnih pražnjenja kroz gasove kao što su: tinjajuća pražnjenja, električni lukovi, varnice i sl. Pokazuje se da su električna pražnjenja kroz gasove od ogromne važnosti u spektroskopiji, jer omogućavaju nastajanje spektara mnogih atoma i molekula. Izučavanjem ovih spektara i njihovom sistematizacijom otvara se tada put za postavljanje teorija o strukturi atoma. U tome bitnu ulogu ima otkriće elektrona. od strane Ser Džozefa Tomsona³ koji, proučavajući električno pražnjenje kroz gasove i „katodne zrake“ [2], otkriva elektron 1898. g.

Sam naziv *plazma* prvi koristi 1928. g. Irvin Langmir⁴ u radu pod nazivom „Oscillations in ionized gases (*Oscillations in Ionized Gases*)“ [3]: na engl.: „Except near the electrodes, where there are sheaths containing very few electrons, the ionized gas contains ions and electrons in about equal numbers, so that the resultant space charge is very small. We shall use the name *plasma* to describe this region containing balanced charges of ions and electrons“. U prevodu: „Izuzev u blizini elektroda, gde postoje slojevi sa malo elektrona,

¹ Michael Faraday, 1791-1867, britanski fizičar i hemičar; jedinica za kapacitet nazvana je *Farad*, u njegovu čast.

² Sir William Crookes, 1832-1919, izučavao električno pražnjenje kroz gasove koji su uvođeni u staklene cevi. Kruks je bio jedan od pionira u izradi i konstrukciji ovakvih cevi koje se i danas nazivaju po njemu „Kruksove“ cevi. Otkrio je da se pri sniženju pritiska u cevi, sa katode emituje zračenje, tzv. „katodni zraci“ (pokazaće se kasnije da su to elektroni). Bavio se i spektroskopijom otkrivši element talijum na osnovu analize njegovog spektra.

³ Sir Joseph John Thomson, 1856-1940, britanski fizičar koji je otkrio electron. Dobio je Nobelovu nagradu za fiziku 1906. „za teorijska i eksperimentalna istraživanja provođenja elektriciteta kroz gasove“.

⁴ Irving Langmuir, 1881-1957, američki fizičar i hemičar, Nobelova nagrada za hemiju 1932. g. za otkrića i istraživanja u Hemiji površina.

jonizovani gas sadrži jone i elektrone u otprilike jednakim brojevima, tako da je rezultujuće prostorno naelektrisanje vrlo malo. Mi ćemo koristiti naziv *plazma* da opišemo prostor u kome su izjednačena naelektrisanja jona i elektrona”. Imenica *plazma* je grčkog porekla (πλάσμα), u prevodu: „(neka) tvorevina ili kreacija”.

Četvrto stanje materije ili *plazma* javlja se u Zemljinoj atmosferi na visinama iznad 60 km od Zemljine površine, i naziva se *jonosfera*. I pojave kao što su *munja* kao i *aurora borealis* (oko severnog pola) i *aurora australis* (oko južnog), koje se povremeno javljaju iznad polova (na oko 90km i više iznad površine Zemlje) u vidu fantastičnih prizora obojene svetlosti (zeleno, crveno, ružičasto itd.), predstavljaju materiju u stanju plazme. Tako npr. zelena boja *aurore* na 557,7 nm nastaje zračenjem atoma kiseonika, prelaz: $O (^1S_0 \rightarrow ^1D_2)$, dok se u višim slojevima *aurore* javlja svetlost crvene boje na 630,3 nm, koja takođe nastaje od pobuđenih atoma kiseonika: $O (^1D_2 \rightarrow ^3P_2)$. U oba slučaja se radi o tzv. zabranjenim prelazima [(kod prvog je $\Delta L=2$ (što je zabranjeno) gde je L orbitni kvantni broj dok je u drugom slučaju prelaz spinski zabranjen)], tj. o prelazima sa znatno manjom verovatnoćom prelaza. Ovakvi prelazi se ipak događaju ako postoji dovoljno veliki broj pobuđenih atoma. Vazduh [(koji je smeša od oko 79mol% N_2 i 21% O_2 (ne računajući primese))] se u ovom slučaju dovodi u stanje plazme, po teoriji koju je postavio poznati norveški naučnik Kristian Birkeland⁵, pod uticajem naelektrisanih čestica velike energije (pretežno elektrona) koje dolaze sa Sunca u obliku tzv. Sunčevog vetra i/ili Sunčevih oluja. Ove naektrisane čestice formiraju struje duž magnetnih linija sila interplanetarnog magnetnog polja (one će biti kasnije nazvane ”Birkelandove prema polju uređene struje”), bivaju zatim zahvaćene magnetnim poljem Zemlje i njime usmerene ka polovima, gde sudarima sa molekulima N_2 i O_2 izazivaju njihovu disocijaciju, ekscitaciju i jonizaciju, stvarajući tako *Auroru*. Za vreme *Aurore* dolazi i do poremećaja Zemljinog magnetnog polja što se detektuje na Zemlji. Ovi su

⁵ Kristian Birkeland, 1867-1917. je norveški naučnik koji je bio i astrofizičar i plazma fizičar pre nego što se plazma kao pojam uopšte pojavila u nauci, prepoznavši da se Sunce nalazi u stanju plazme kao i interplanetarni prostor a takođe i *Aurora*, postavivši hipotezu o nastanku ove pojave prema kojoj *Aurora* nastaje pod dejstvom naelektrisanih čestica koje se oslobađaju sa Sunca a zatim formiraju usmereni strujni tok duž magnetnih linija sila interplanetarnog magnetnog polja da bi bile povučene Zemljinim magnetnim poljem do polova. Do tada se smatralo u naučnoj javnosti da je *Aurora* isključivo ”Zemaljska” pojava. Da bi svoju teoriju potkrepio sa što više argumenata, K. Birkeland je je predvodio tri arktičke ekspedicije između 1899 i 1903g.. tokom kojih su, na različitim mestima (izgrađene su bile posmatračke stanice), i u vremenu pre, za vreme i posle pojave *Aurore* vršena merenja Zemljinog magnetnog polja kao i sva druga moguća fizička merenja i posmatranja. Bilo je poznato i od ranije da se fluktuacije Zemljinog magnetnog polja javljaju kada i *Aurora*, ali ih je Birkeland sada povezao sa jakim (čak do milion ampera) horizontalnim strujama kao posledicom toka naelektrisanih čestica sa Sunca. Merenjima je tada takođe ustanovljeno da se *Aurora* pojavljuje na oko 80-100 km iznad Zemljine površine, mada se nekad može uočiti i na većim visinama, npr. na 250 km. *Birkeland* je takođe i u laboratoriji izvodio eksperimente kojima je hteo da simulira pojavu *Aurore*. To su u osnovi bili eksperimenti električnog pražnjenja kroz gasove a u ovom slučaju nazivani su i ”terrella” (terrella – mala Zemlja) eksperimenti u kojima je Zemlja bila predstavljena u vidu male namagnetisane kuglice (koja je bila na pozitivnom ili negativnom potencijalu; u jednoj vrsti eksperimenata na kuglice je bila nanesena fluorescentna supstancija) a koja je bila izložena katodnim zracima (elektronima). U cevi se nalazila i mala količina nekog inertnog gasa a oko kuglice (”terrelle”) bi se javljalo svetljenje. Birkenland je takođe objavio sam ili u saradnji sa drugim naučnicima (C. Strömer) i teorijsku interpretaciju pojave *Aurore* a i čuveni matematičar H. Poenkare (H. Poincaré) je podstaknut Birkelandovim istraživanjima odredio rešenje jednačine kretanja naelektrisane čestice u magnetnom polju magnetnog monopola. U osnovi, Birkelandova teorija o nastanku *Aurore* i o postojanju ”prema magnetnom polju uređenih struja” koje potiču od naelektrisanih čestica sa Sunca potvrđena je merenjima koja su u 60. tim godinama (i kasnije) 20. veka, vršena sa različitih satelita.

poremećaji izazvani intenzivnim (horizontalnim) strujnim tokovima u oblasti Jonosfere a nadovezuju se na struje naelektrisanih čestica koje dolaze sa Sunca [4].

Transformacija materije – od čvrstog stanja do plazme

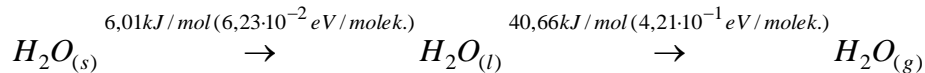
Plazma se najčešće definiše kao jonizovan gas [5]. Jonizacija je inače proces pri kome dolazi do oslobađanja elektrona iz atoma ili molekula. Ne moraju, međutim, sve čestice plazme biti jonizovane, pa stepen jonizacije plazme Y može imati vrednost od maksimalno 1, kada su sve čestice jonizovane, pa do npr. nekih niskih vrednosti kao što je 10^{-8} . Stepem jonizacije se definiše kao količnik koncentracije ili gustine (a to je broj čestica po jedinici zapremine) pozitivnih jona i koncentracije neutralnih čestica u posmatranom gasu pre nego što se dogodila jonizacija gasa. Pozitivni joni plazme mogu biti jednom ili više puta pozitivno naelektrisani. Dakle, plazma, pored neutralnih čestica (atoma, molekula koji se mogu nalaziti kako u svojim osnovnim tako i u pobuđenim stanjima energije), za razliku od gasa sadrži i slobodne elektrone kao i pozitivno i negativno naelektrisane jone. Tako da su specifičnosti plazme kao stanja materije uslovljene postojanjem u njoj naelektrisanih čestica i njima pridruženih lokalnih (ali i ukupnih) električnih i magnetnih svojstava i polja.

Plazma, kao četvrto agregatno stanje materije, sadrži, u odnosu na ostala tri stanja materije, najveću energiju. Da bismo ovo objasnili bolje, podsetićemo se bitnih karakteristika tri uobičajena agregatna stanja, čvrstog, tečnog i gasovitog. Naime, materija u čvrstom stanju (na nekoj temperaturi T) zadržava pored zapremine i određeni oblik. Kod kristalnih čvrstih tela i okom je vidljiva njihova pravilna geometrijska struktura. Čestice koje čine kristal [npr. ugljenik (C) kod grafita ili dijamanta, joni natrijuma (Na^+) i hlora (Cl) kod kristala natrijum hlorida itd.] gusto su pakovane, pa se njihovo kretanje svodi na vibracije oko ravnotežnog položaja. Srednja energija po čestici, ϵ_{sr} , ovakvog kretanja se kreće u opsegu $10^3 < \epsilon_{\text{sr}} < 10^2$ eV i zavisi od temperature.

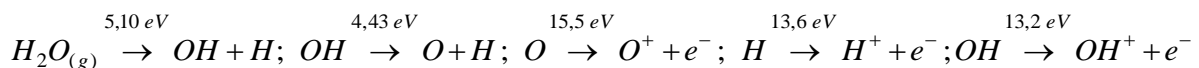
Dodavanjem energije, čvrsta supstancija se topi, tj. prelazi u tečno stanje. Tako je npr. za topljenje jednog mola leda na temperaturi prelaza (0° C tj. 273 K) i na atmosferskom pritisku (1atm ili $1,01325 \cdot 10^5$ Pa), potrebna energija od 6,01 kJ, [6] ili kada se obračuna po molekulu $6,23 \cdot 10^{-2}$ eV. Tečnosti imaju određenu zapreminu ali ne i oblik, koji prilagođavaju obliku posude u kome se nalaze. Između molekula (ili atoma ako su oni izgrađivačke čestice) tečnosti postoje privlačne međumolekulske sile, međutim molekuli tečnosti imaju dosta prostora i energije (kinetičke) da se kreću. Tako je interesantan primer vode (tečne) gde kretanje molekula vode neprekidno dovodi i do "kidanja" i do ponovnog uspostavljanja vodoničnih veza između molekula vode. Pošto se zna da energija vodonične veze iznosi oko 20 kJ/mol (0,21 eV/molekul) možemo zaključiti da energija termalnog kretanja znatnog broja molekula vode prevazilazi ovu vrednost.

Za prelaz supstancije iz tečnog u gasno stanje potrebna je takođe energija. Tako je npr. za isparavanje jednog mola vode na temperaturi prelaza (100° C tj. 373 K) i na atmosferskom pritisku, potrebna energija od 40,7 kJ/mol ili kada se obračuna po molekulu 0,42 eV. U gasu su molekuli slobodni da se kreću (za gas se kaže i da predstavlja neuređeno stanje materije), i oni se, prema kinetičkoj teoriji gasova, ponašaju kao krute sfere, između kojih nema ni privlačnih ni odbojnih sila. Osobine (idealnog) gasnog stanja se definišu jednačinom idealnog gasnog stanja koja povezuje pritisak gasa (p), zapreminu (V) (to je

zapremina suda u kome se gas nalazi a zapremina molekula gasa se zanemaruje), temperaturu (T) i količinu gasa tj. broj molova (n): $pV=nkT$. Molekuli gasa se nalaze u neprestanom kretanju i putem elastičnih sudara (kod elastičnih sudara izmenjuje se energija u formi kinetičke, pri čemu su ispunjeni uslovi održanja kinetičke energije i impulsa, pre i posle sudara) izmenjuju međusobno energiju. Kada je gas u termodinamičkoj ravnoteži, temperatura T je merilo srednje kinetičke energije molekula ε_{sr} koja je $\sim kT$ (videti preciznije u sledećem odeljku). Prikazujemo i šematski transformaciju agregatnih stanja vode od leda (čvrsta faza) u tečnost pa zatim iz tečnosti u gas, pri čemu je iznad strelice koja pokazuje pravac reakcije označena vrednost energije koja je potrebna za njeno odvijanje:



Dalje, dodavanjem energije gasu, npr. zagrevanjem, određeni broj molekula stiče energiju koja prevazilazi energiju disocijacije molekula gasa (kada se molekul sastoji iz više atoma), energiju ekscitacije atoma (ili molekula) i što je najvažnije energiju jonizacije atoma ili molekula. Tako da se sada stvaraju uslovi i za neelastične sudare (pored elastičnih) između čestica, pa se u jednom neelastičnom sudaru dve čestice, kinetička energija jedne čestice transformiše u neki vid potencijalne energije (disocijacije, ekscitacije ili jonizacije) druge čestice. Vrednosti energija disocijacije, ekscitacije ili jonizacije su uporedive međusobno, a zavise od prirode atoma ili molekula. Najveću energiju jonizacije ima helijum (He) i to 24,6 eV, argon 15,8 eV, dok vodonik (H) kiseonik (O) imaju energije jonizacije od 13,6 eV i 15,5 eV, respektivno. Najniže su energije jonizacije alkalnih atoma, npr. kalijum (K) ima energiju jonizacije od 4,3 eV, natrijum (Na), 5,1 eV itd. Ove se energije nazivaju i prvi jonizacioni potencijali i predstavljaju energiju koja je potrebna da se periferni (najslabije vezani elektron) elektron oslobodi iz atoma, čime takav atom postaje jednom pozitivno naelektrisan jon. Energije disocijacije iznose nekoliko elektron volti a tolike su i prosečne energije ekscitacije. Prikazujemo sada šematski neke od elementarnih procesa bitnih za nastajanje plazme polazeći od npr. vode u gasnom stanju. To su i reakcije disocijacije pored reakcija jonizacije koje su ključne za nastajanje plazme. Iznad strelice koja pokazuje pravac reakcije označena je vrednost energije koja je potrebna za njeno odvijanje.



Sve reakcije se odvijaju u oba smera (zavisno od uslova sa različitim verovatnoćama odnosno brzinama) tako da se npr. u termalnim plazmama ili plazmama u (lokalnoj) termodinamičkoj ravnoteži, uspostavlja na temperaturi T stanje *dinamičke ravnoteže*, što znači da se održava **konstantnim** relativni odnos koncentracija atomskih, jonskih i molekulskih formi nastalih u u određenim hemijskim reakcijama i u procesima jonizacije odnosno rekombinacije. Tako da sada dolazimo i do pojma *sastav* plazme kojim definišemo koje čestice [(atomi, molekuli, joni (pozitivni i negativni), slobodni elektroni], i u kojoj količini sadrži konkretna plazma, pri određenom ukupnom pritisku i na određenoj temperaturi. Prisustvo različitih hemijskih vrsta plazmi može se dokazati eksperimentalnim putem npr. metodama spektroskopije i masene spektrometrije ali se sastav plazme

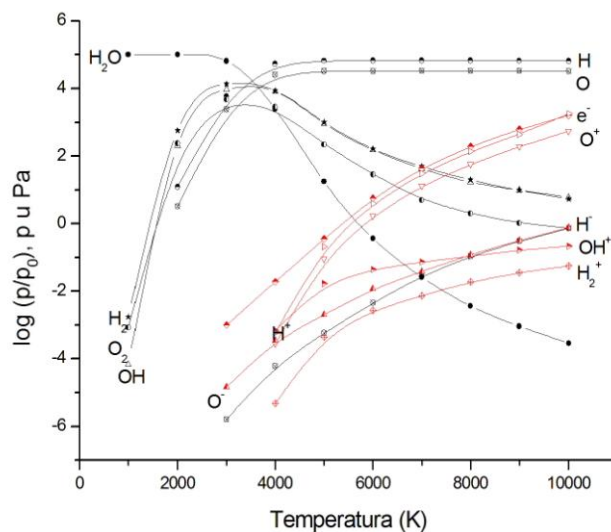
(analiziraćemo sada termalnu plazmu kako se često naziva plazma u termodinamičkoj ravnoteži)⁶ može i izračunati. Ravnotežni sastav dobija se iz uslova da je varijacija Gibsove slobodne energije G jednaka nuli što znači da je sistem u ravnoteži kada je u stanju najmanje energije:

$$\delta G = 0$$

gde je G ukupna Gibsova slobodna energija sistema. Ona predstavlja sumu hemijskih potencijala, μ_i , pojedinih hemijskih vrsta prisutnih u sistemu, pomnoženih sa odgovarajućim ravnotežnim brojem molova x_i , koji se uspostavlja u plazmi tako da uslov ravnoteže bude ispunjen:

$$G = \sum_{i=1}^n x_i \mu_i$$

Da bi se rešio problem $\delta G=0$ računskim putem, odnosno odredile ravnotežne vrednosti broja molova x_i , potrebno je poznavati standardne Gibsove energije svih ili bar svih relevantnih hemijskih vrsta (atoma, molekula radikala, jona i sl.) koji mogu nastati u datoj plazmi a na različitim temperaturama. Podaci za Gibsove energije mogu se pronaći u tablicama, npr. [7]. Podaci o Gibsovima energijama dobijaju se ili eksperimentalnim putem ili teorijskim. Za rešavanje $\delta G=0$ problema koriste se odgovarajući algoritmi kao što je [8] koji je dopunjen tako da važi i za sisteme sa naelektrisanim česticama [9]. Ovakvi se proračuni vrše tako da budu ispunjeni sledeći uslovi: uslov o održanju broja atoma prisutnih elemenata kao i uslov kvazineutralnosti plazme koji podrazumeva da je zbir pozitivnog i negativnog naelektrisanja jednak nuli, što je, kako ćemo videti i kasnije, bitna karakteristika plazme. Rezultate ovakvog proračuna prikazujemo na Sl.1.1, za slučaj plazme nastale od vode [(H₂O, dakle količnik H:O=2:1 i pri ukupnom pritisku od 1 atm (1 atm= 1,013·10⁵ Pa)]. Na ordinati se nanose parcijalni pritisci (logaritamska skala) a na apscisi je temperatura. Parcijalne pritiske možemo lako preračunati u (molarne) gustine čestica, na osnovu jednačine idealnog gasnog stanja: $pV=nkT \Rightarrow n/V=p/(kT)$.



Sl.1.1 Ravnotežni sastav plazme: H:O=2:1, p=1 atm (1,013·10⁵ Pa)

⁶ Plazme mogu biti neravnotežne ili npr. u stanju parcijalne termodinamičke ravnoteže o čemu će biti reči u narednim poglavljima.

Na nižim temperaturama, $T < 1000$ K, postoji samo gas koji čine molekuli H_2O . Sa porastom temperature sastav gasa (koji će postepeno preći u plazmu) postaje složeniji koji npr. na $T=2000$ K sadrži, pored molekula H_2O i molekule H_2 i O_2 čiji je parcijalni pritisak oko hiljadu puta manji od parcijalnog pritiska H_2O . Na $T=4000$ K se uspostavlja (slabo) jonizovana plazma sa stepenom jonizacije od oko 10^{-8} . U ovakvoj plazmi najzastupljeniji su kiseonik i vodonik u obliku atoma (O , H) dok desetak puta manje ima vodonika u obliku molekula (H_2), OH radikala i H_2O i nešto manje O_2 . Na $T=7000$ K, stepen jonizacije je oko $3 \cdot 10^{-4}$ dok je parcijalni pritisak elektrona oko 32 Pa ili $3,3 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ koliko otprilike ima i H^+ jona. Preovladavaju u plazmi atomski vodonik i kiseonik dok su oko 1500 manje zastupljeni OH i H_2 a O_2 i za još jedan red veličine manje. Molekula vode kao i da nema. Na 10000 K, dominantni oblici su kiseonik i vodonik u obliku atoma kao i u obliku jednom naelektrisanih jona kojih ima oko 100 puta manje u odnosu na broj atoma. Možemo, dakle zaključiti, da porast temperature favorizuje procese disocijacije i jonizacije tako da polazeći od vode, kao jednodimenzionalnog (u sva tri agregatna stanja, čvrstom, tečnom i gasovitom) sistema, stizemo, zagrevanjem, do plazme, koja se sastoji iz više hemijskih oblika, dakle ima više komponenata (na $T=10000$ K to su O , H , H^+ , H^- , O^+ , O_2 , H_2 , e^- itd.) koji su prisutni u plazmi sa odgovarajućim (ravnotežnim) parcijalnim pritiscima. Atomi, molekuli i joni mogu se u plazmi nalaziti u osnovnim ali i u pobuđenim stanjima energije. U ravnotežnim plazmama broj atoma npr. u pobuđenom stanju energije ε , izračunava se iz Maksvel-Bolcmanove relacije raspodele: $n = [n_0/Z(T)] \cdot \exp [(-\varepsilon/(kT))]$ gde je n – broj čestica u pobuđenom stanju, n_0 – ukupan broj čestica, k – Bolcmanova konstanta, T – temperatura a $Z(T)$ je particiona funkcija. Čestice (atomi, molekuli, joni) borave u pobuđenim stanjima relativno kratko vreme prelazeći u osnovno stanje uz emisiju kvantata svetlosti ili energiju gube kroz sudare sa drugim česticama. Tako da možemo zaključiti da plazma, generalno, sadrži neutralne čestice (atome, molecule, radikale), koji mogu biti u osnovnim i u pobuđenim stanjima ali i pozitivne i negativne jone (takođe i u pobuđenim stanjima energije) i elektrone kao i fotone svetlosti. Zato se i plazma često posmatra i kao *izvor različitih hemijskih oblika*, kao *izvor svetlosti* i kao *izvor energije* (termonuklearne plazme).

Podsetimo se, takođe, da je promena entalpije [$\Delta H=f(T)$] kao funkcija temperature, na granici faza (čvrsto-tečno stanje, tečno-gas) skokovita i izražava se vertikalnom linijom. Zagrevanje gasa, uz pojavu disocijacije i jonizacije njegovih molekula, dovodi do naglog skoka entalpija, ali prelaz nije vertikalalan.

U laboratoriji, plazma se generiše električnim pražnjenjem kroz gasove. Pri tome, svojstva plazme zavise od prirode unetog gasa, pritiska (koji može biti i vrlo nizak pa do više stotina ili hiljada atmosfera), temperature koja se definiše u odnosu na to da li je plazma u termodinamičkoj ravnoteži ili nije, vrednosti stepena jonizacije itd. Prve dobijene plazme, koje su bile formirane (u staklenim cevima) kao oblik električnog pražnjenja kroz gasove na niskim pritiscima, bile su korišćene i kao lampe za osvetljavanje. Bitan deo aparatura za električno pražnjenje bila je sama staklena cev povezana sa vakuum pumpom, u koju je uveden gas. I danas su poznate Gajslersove cevi (po H. Geissler⁷-u) koji je napravio i proizveo

⁷ Heinrich Geissler (1814-1879) je rođen u Bonu (Bonn), Nemačka. Od oca (koji je bio stakloduvač) nasledio je porodično preduzeće za izradu predmeta od stakla. Po tradiciji, H. Gajslar je preuzeo očevo preduzeće, ali je od 1852. započeo samostalan posao opredelivši se za izradu instrumenata za istraživanja u fizici i hemiji. Naročito se posvetio izradi i usavršavanju staklenih cevi za pražnjenje pa je nagrađivan za pronalazaštvo.

mного takvih cevi eksperimentišući sa oblikom, veličinom, vrstom stakla i koristeći pri tome različite gasove na raznim pritiscima. Ranije smo već pominjali i Kruksove cevi.

Plazme se takođe koriste i kao izvor različitih hemijskih formi (npr. radikala) što je važno kod sinteza u plazmi. Tako je prva eksperimentalna istraživanja o nastanku ozona iz O₂ ili vazduha u električnom pražnjenju sa dielektričnom barijerom objavio još davne 1857, W. Siemens⁸ [10]. Napomenućemo da se i danas ozon industrijski dobija u električnom pražnjenju ovoga tipa. I K. Birkeland (koga smo pominjali u vezi sa objašnjenjem pojave *Aurore*), bavio se istraživanjima sinteza i konverzija u plazmi napravivši plazmeni reaktor za oksidaciju azota iz vazduha.

Plazma je dominantno stanje materije, sa preko 99% zastupljenosti, u Univerzumu⁹ (Svemiru, Kosmosu). Tako se u stanju plazme nalaze zvezde (zbog gradijenata temperature i pritiska koji postoji kod zvezda, radi se o različitim tipovima plazme; u jezgru Sunca temperatura je oko $15 \cdot 10^6$ K dok se pritisak procenjuje na oko 10^{14} Pa ili 10^9 atm, a zatim i pritisak i temperatura opadaju sa rastojanjem od centra Sunca), međuzvezdani prostori, međuplanetarni prostori kao i galaksije (grčki γαλαξίας znači "mlečni") koje putem gravitacionih sila objedinjuju sisteme zvezda, međuzvezdanog gasa i prašine). Danas se zna da Univerzum čini oko 10^{10} galaksija od kojih se svaka sastoji između 10^9 i 10^{12} zvezda [11]. Udaljenost između galaksija je mnogo veća nego što su njihove dimenzije i taj međugalaktički prostor, koji predstavljaju vrući gas i prašina, je takođe u stanju plazme.

Paralelno, sistematski je proučavao električno pražnjenje kroz gasove pa je 1868. dobio počasni doktorat Univerziteta u Bonu.

⁸ Ernst Werner von Siemens (1816-1892), bio je pronalazač u oblasti elektrotehnike i industrijalac, osnivač i danas poznate kompanije Siemens. Prva njegova kompanija bila je vezana za telekomunikacije i zasnivanja je bila na novoj varijanti telegrafa sa pokazivačem koga je sam Simens bio konstrisao. Takođe je patentirao princip električne železnice sa spoljašnjim izvorom napona, električni lift itd. Promovisao je princip konverzije mehaničke energije u električnu napravivši i prototip mašine (što se danas uveliko koristi). Jedinica Siemens (1S) za provodljivost (vodljivost) je nazvana tako njemu u čast. Titulu plemića dobio je 1888. g.

⁹ Obično se misli, prema Kosmologiji *Velikog praska* na Univerzum koji se principijelno može opaziti (observable Universe) tj. detektovati sa Zemlje putem signala (svetlosnih ili drugih) koji stižu na Zemlju od početka Kosmološke ekspanzije. Ovaj Univerzum je oblika sfere čiji je poluprečnik $46,6 \cdot 10^9$ svetlosnih godina [12] ili $4,40 \cdot 10^{26}$ m, gde se u centru nalazi posmatrač (na Zemlji). Astrofizičari imaju kao pojam i *vidljivi* (*visible*) Univerzum koji uključuju signale koji nastaju od trenutka (to je oko 379 000 g. od početka Kosmološke ekspanzije) kada, Univerzum (prema teoriji Velikog praska) postane transparentan za fotone (fotoni nastaju i ranije ali u različitim procesima nestaju tj. bivaju apsorbovani). Tako je poluprečnik sfere vidljivog Univerzuma nešto manji i iznosi $45,7 \cdot 10^9$ godina ili $4,32 \cdot 10^{26}$ m. Starost Univerzuma iznosi $13,798 \pm 0,037 \cdot 10^9$ g. [13].

LITERATURA

1. William Crookes, ``On Radiant Matter``, A lecture delivered to the British Association for the Advancement of Science, August 22, Sheffield, 1879.
2. J.J. Thomson, ``Cathode Rays``, Philosophical Magazine, **44** (1897) 293.
3. I. Langmuir, ``Oscillations in Ionized Gases``, Proc. Nat. Acad. Sci. **14** (1928) 627.
4. K. Rypdal and T. Brundtland, ``The Birkeland Terrella Experiments and their Importance for the Modern Synergy of Laboratory and Space Plasma Physics``, J. Phys. IV France. **7** (1997) C4-113.
5. Božidar S. Milić, *Osnove fizike gasne plazme*, Građevinska knjiga, Beograd, 1989.
6. P.W. Atkins, *Physical Chemistry*, fifth edition, Oxford University Press, 1994.
7. *JANAF Thermodynamical Tables*, Nat. Stand. Ref. Data Ser., US Nat. Bur. Stand. Vol. 27 (1971); *NIST–JANAF Thermochemical Tables, Journal of Physical and Chemical Reference Data*, fourth ed. Malcolm W. Chase Jr., 1999.
8. W.B. White, S.M. Johnson, G.B. Dantzig, ``Chemical Equilibrium in Complex Mixtures``, J.Chem. Phys. **28** (1958) 751.
9. J. Radić-Perić, M. Perić, ``Arc plasma in air with calcium and fluorine-I. Calculation of the plasma composition``, Spectrochim. Acta **35B** (1980) 297.
10. Werner von Siemens, ``Über die elektrostatische Induction and die Verzögerung des Stroms in Fläschendrähnen``, Poggendorff's Annal. Phys. Chem. **102** (1857) 66.
11. Wolfgang Demtröder, *Experimentalphysik*, Band 4, Springer, 1999.
12. J.R. Gott, M. Jurić, D. Schlegel, F. Hoyle, M. Vogeley, M. Tegmark, N. Bahcall, J. Brinkmann, *Astrophys. J.*, ``A map of the Universe``, **624** (2005) 463.
13. Planck collaboration, ``Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters``, *Astronomy&Astrophysics*, **571**, A16 (2014) 1.
14. D.J. Mullan, ``*Physics of the Sun*``, CRC series in Pure and Applied Physics, Chapman & Hall Book, 2010.