

POVIJESNI PREGLED FIZIKE PLAZME

NAZIV „PLAZMA“

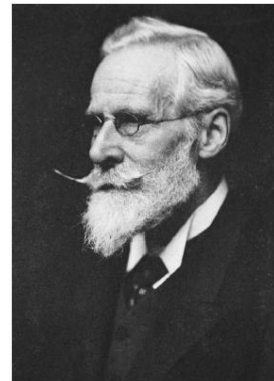


Oduvijek su se ljudi pitali od čega je sastavljen sav živi i neživi svijet oko nas. Tu su najveći utjecaj imali grčki filozofi. Tako je grčki filozof **Empedoklo** prepoznao je postojanje četiri "**elementa**", oblika materije: **zrak, voda, zemlja** i **vatra**, i tako uveo plazmu u daljnja razmatranja posredstvom vatre.

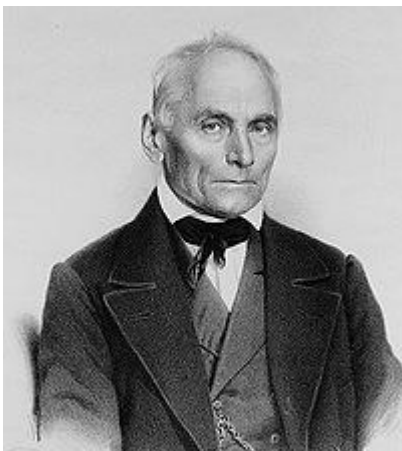
Slika 1: Empedoklo

Prema Wikipediji prvi je plazmu opisao na znanstveni način **Sir William Crookes** godine 1879. nazvavši je "**materijom koja zrači**", odnosno četvrtim stanjem materije.

Sir William Crookes (1832–1919) je bio kemičar i fizičar koji se bavio spektroskopijom. Smatra se pionikom vakuumskih cijevi – izumio je Crookesove cijevi (eksperimentalne električne izbojne cijevi u kojima su otkrivene katodne zrake – elektroni).



Slika 2: Sir William Crookes



Sredinom 19-tog stoljeća češki fiziolog **Jan Evangelista Purkinje** (1787-1869) upotrijebio je grčku riječ „**plazma**“ - **πλάσμα** („formed“ - formirana, modelirana, „molded“ - lijevana supstancija, jelly) kako bi opisao prozirnu tekućinu koja preostane nakon što se iz krvi uklone sve čestice.

Slika 3: Jan Evangelista Purkinje

Pola stoljeća kasnije (20-ih godina 20.st.) američki znanstvenik **Irving Langmuir** (1881.-1957.) 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 „tekući medij“ ne postoji za razliku od krvi koja stvarno predstavlja fluidni medij koji prenosi čestični materijal. Termin „**plazma**“ je ostao, kao i zbunjujuće nazivlje, plazma u fizikalnom smislu i krvna plazma pojam koji puno češće čujemo u svakodnevnom životu. Stoga fizičari, koji se bave plazmom uvijek objašnjavaju prijateljima i poznanicima da ne izučavaju krvnu plazmu.

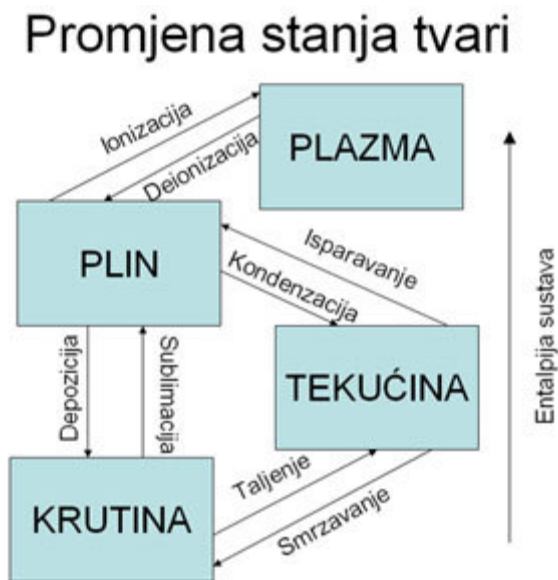
Irving Langmuir – američki kemičar koji je proučavao kemiju površina (i za svoj doprinos tom području dobio Nobelovu nagradu za kemiju 1932. godine); razvio plinom punjene volframove svjetiljke i postupak zavarivanja atomskim vodikom, te radio na visokotemperaturnim električnim izbojima.



Slika 4: Irving Langmuir

DEFINICIJA PLAZME

Plazma je u fizici naziv za **ionizirani plin** i uobičajeno je da se zbog različitih svojstava u odnosu na krutine, tekućine i plinove smatra posebnim agregatnim stanjem tvari.



Slika 5: Agregatna stanja

Ionizirani plin ima barem po jedan elektron odvojen od dijela svojih atoma ili molekula. Zbog slobodnih nabijenih čestica (iona i elektrona) plazma je **dobar vodič električne struje** i snažno reagira na električno i magnetsko polje. Plazmom se ne može nazvati bilo kakav ionizirani plin jer je svaki plin u nekom, makar vrlo malom stupnju, ioniziran. Npr. kozmičko zračenje ionizira čestice u Zemljinjnoj atmosferi tako da u zraku uvijek nalazimo određeni broj nabijenih čestica.

Obično kažemo za plazmu da je **kvazineutralni plin** sastavljen od ioniziranih (nabijenih) i neutralnih čestica, koji pokazuje **skupno (kolektivno) međudjelovanje** čestica zasnovano na Coulombovoj sili. Kvazineutralan plin znači da je **makroskopski neutralan**, tj. da uzet u cjelini ne posjeduje električni naboj, ali su njegovi dijelovi električki nabijeni.

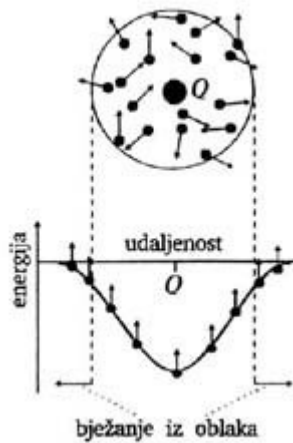
Kao i plin, plazma nema određen oblik ili volumen, osim ako se zatvori u posudu ili ograniči na neki način, a pod utjecajem magnetskog polja plazma može poprimiti vlaknastu strukturu.

Iako se plazma može opisati kao električki neutralno stanje materijala, s jednakim brojem negativnih i pozitivnih električki nabijenih čestica, premda nevezane te čestice nisu ni slobodne. Kada se električki nabijene čestice kreću, one stvaraju električnu struju i

magnetsko polje, i kao rezultat, međusobno djeluju s drugim električnim i magnetskim poljima.

Za razliku od plina sa zanemarivim brojem nabijenih čestica, u kojem čestice interagiraju praktički samo u sudarima (tzv. parno međudjelovanje), u plazmi zbog znatnog broja električki nabijenih čestica dolazi do elektromagnetskog djelovanja na znatno većim udaljenostima (Van de Waalsov potencijal kao najčešći oblik interakcije među neutralnim česticama plina opada kao $1/r^6$, a Coulombov potencijal opada kao $1/r$).

U svakom trenutku čestice tvore **zajedničko elektromagnetsko polje** i svaka čestica interagira istodobno sa svim ostalim česticama – **kolektivna interakcija ili skupno međudjelovanje**.



Slika 6: Debyejev oblak

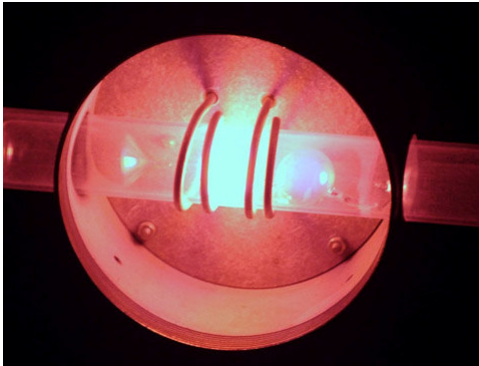
Zato električki nabijene čestice imaju kolektivna svojstva, te se plazma može definirati sljedećim uvjetima:

- električki nabijene čestice trebaju biti dovoljno blizu da bi mogle međusobno djelovati, a to se definira s **Debyeovom sferom** (dio prostora u kojem je prisutno električno polje nekog naboja) – **usklađenost plazme**
- u tzv. Debyeovoj sferi ima vrlo velik broj čestica, tj. dimenzije sustava su mnogo veće od polumjera Debyeve sfere (za procese koji se odigravaju na dimenzijama većim od Debyeve sfere vrijedi načelo elektroneutralnosti) – međudjelovanja unutar Debyeve sfere su puno važnija nego na rubovima pa se kaže da je **plazma kvazineutralna** (ima jednak broj pozitivnih i negativnih električki nabijenih čestica)
- **plazmena frekvencija** (učestalost kojom titraju elektroni ako su pomaknuti iz ravnotežnog položaja) je mnogo **veća od sudarne frekvencije** – elektrostatičko djelovanje prevladava nad procesima obične kinetike plinova

Za plazmu kažemo da je u **termodinamičkoj ravnoteži** ako sve vrste čestica (uključivši i fotone) imaju istu temperaturu te ne postoje temperaturni gradijenti i gradijenti gustoće.

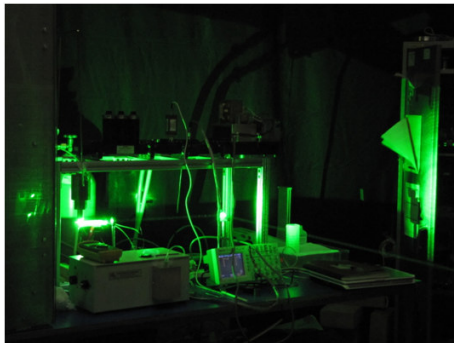
Kada neki dio sustava tek malo odstupa od termodinamičke ravnoteže, onda se za opisivanje procesa koristi aproksimacija **lokalne termodinamičke ravnoteže (local thermodynamic equilibrium – LTE)**. Plazma je **izotermna** ako sve čestice imaju jednaku temperaturu no vrlo često su plazmeni sustavi neizotermni – u većini takvih slučajeva je temperatura elektrona viša od temperature iona.

Ako je plazma u termodinamičkoj ravnoteži, a u Debyejevoj sferi se nalazi vrlo veliki broj čestica, plazma se ponaša gotovo **kao idealni plin** – takvu plazmu nazivamo **termodinamički slabo neidealnom plazmom**.

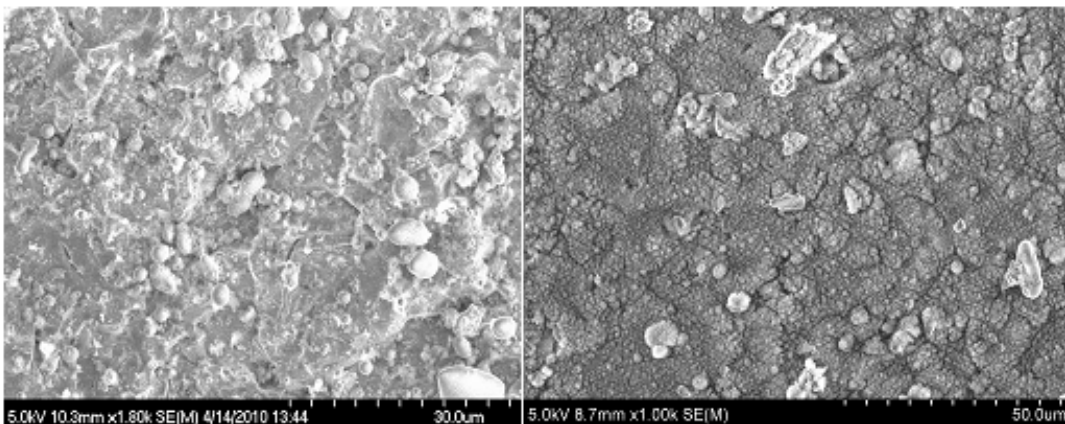


Kada plazma ima relativno nisku temperaturu, tako da su samo vanjske ljuske atoma i iona aktivne te sudjeluju u procesima, kažemo da je to **niskotemperaturna plazma**.

U **visokotemperaturnoj plazmi** aktivne su i unutrašnje elektronske ljuske, a odvijaju se i termonuklearne reakcije.



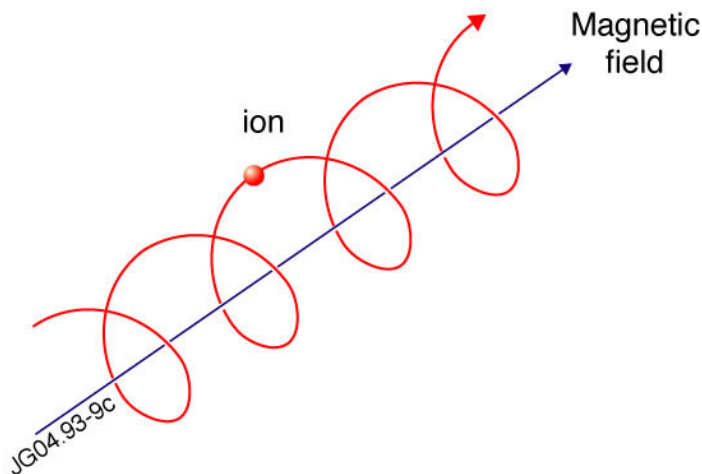
Slika 7: High Temperature Plasma (~1,000°C) Assisted Laser Ablation YSZ is rotating at 2 rpm



Slika 8: Low Temperature Plasma Deposition (~100°C) High Temperature Plasma Deposition (1,000°C)

U tzv. **hladnoj plazmi** možemo zanemariti termička gibanja elektrona.

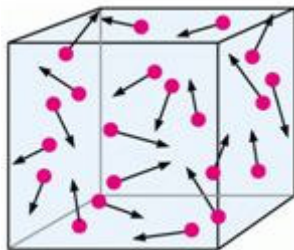
Slika 9: An experimental treatment that relies on cold plasma, which is created by introducing electricity into a gas until free electrons are liberated, may one day keep fresh produce like apples and almonds safe from potentially harmful bacteria such as *Salmonella*, *Listeria* and *E. coli*. Photo courtesy of Paul Pierlott.



Slika 10: Cyclotron motion of a plasma ion around a magnetic field line

Plazma je **magnetizirana** ako je **sudarna frekvencija mnogo manja od ciklotronske frekvencije**, tj. frekvencije

kojom nabijena čestica kruži u magnetskom polju. Gibanje nabijenih čestica pretežito je ciklotronsko jer se sudari dešavaju tek nakon više ciklotronskih rotacija pa se pomicanje središta vrtnje i mijenjanje polumjera kruženja dešava rijetko.



U obrnutom slučaju kada su **sudari vrlo česti**, ciklotronsko gibanje je prikriveno pa je gibanje čestice vrlo blisko običnom **termičkom nasumičnom gibanju**. Za procese koji se odvijaju u vremenu mnogo manjem od vremena između dva sudara kažemo da su nesudarni.

Slika 11: Termičko nasumično gibanje

KRATKA POVIJEST FIZIKE PLAZME

20-ih i 30-ih godina prošlog stoljeća nekoliko istraživača koji su zasebno djelovali, svaki motiviran rješavanjem specifičnih praktičnih problema, je počelo izučavati ono što se danas zove **fizikom plazme**.

Taj rad je bio prvenstveno usmjeren na razumijevanje:

- utjecaja ionosferne plazme na širenje kratkih radiovalova na većim udaljenostima
- plinskih elektronskih cijevi koje su se koristile za ispravljanje, prebacivanje i regulaciju napona u eri elektronike koja je prethodila poluvodičima

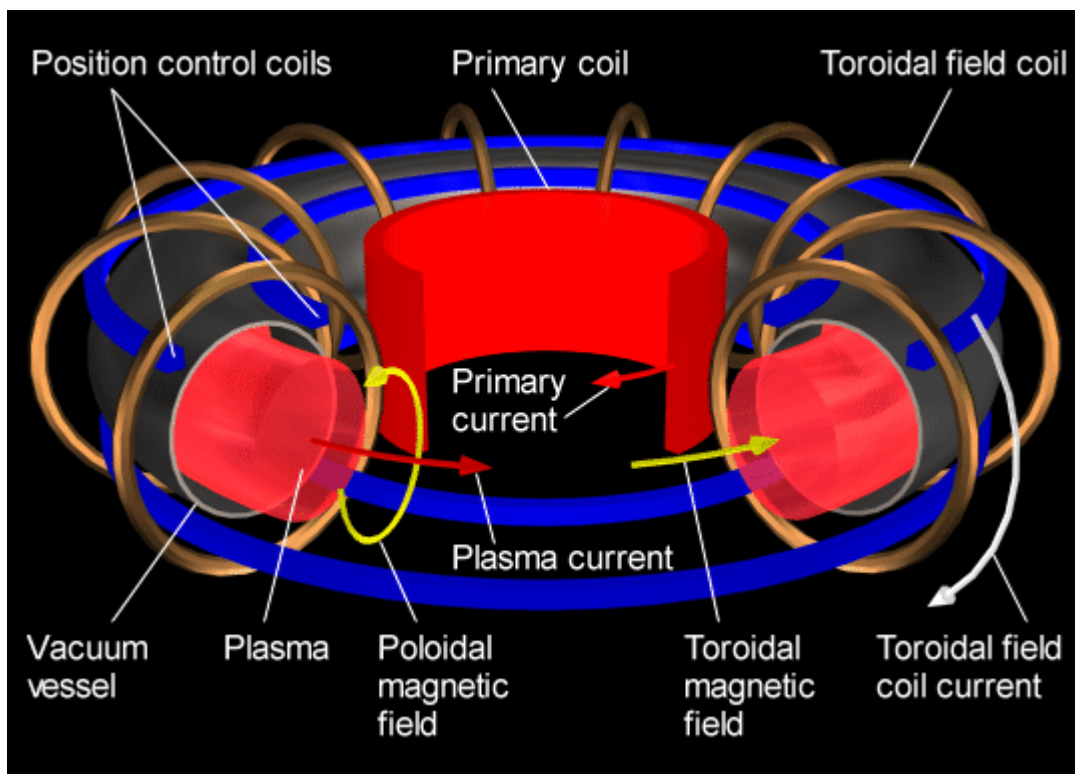
Razvoj radijskog emitiranja je doveo do otkrića **Zemljine ionosfere** – sloja djelomično ioniziranog plina u gornjoj atmosferi koji reflektira radio valove. Brojni znanstvenici su proučavali ionosferu. Ovdje ćemo istaknuti E.V. Appletona i K.G. Buddena koji su razvili teoriju o širenju elektromagnetskih valova kroz neuniformno magnetiziranu plazmu.

Astrofizičari su spoznali da se svemir velikim dijelom sastoji od plazme. Začetnik u tom području je bio **Hannes Alfvén** koji je 1942. godine razvio **teoriju magnetohidrodinamike (MHD)** u kojoj se plazma smatra električki vodljivom. Izveo je teoriju širenja MHD valova (koji se danas po njemu zovu **Alfvenovi valovi**) i pretpostavio njihovu važnost u astrofizičkoj plazmi. Za taj rad je 1970. g. dobio Nobelovu nagradu. Teorija se koristila u istraživanju Sunčevih pjega, Sunčevog vjetera, nastanka zvijezda i mnogih drugih tema u astrofizici.

Ranih 1950-ih istraživanja u fizici plazme bazirana na **magnetskoj fuzijskoj energiji** su se počela simultano provoditi u Americi, Velikoj Britaniji i Sovjetskom Savezu. S obzirom da je taj rad bio grana u istraživanju **termonuklearnog oružja** (nastanak **hidrogenske bombe** 1952. godine), sve je bilo obavljeno velom tajne da bi se kao zaštitili nacionalni interesi. Ipak se pokazalo da su istraživanja kontrolirane fuzije daleko od nečeg što bi imalo vojnu vrijednost već **moгуći izvor energije budućnosti** pa su sve 3 zemlje skinule tajnost i 1958. počele suradnju na tom području. Kasnije su se i druge zemlje počele u to uključivati.

Tijekom 1960-ih su nastavljena istraživanja fuzije, ali su Rusi tek krajem dekade empirijski došli do **tokamak konfiguracije** i počeli proizvoditi plazmu sa značajno boljim svojstvima. **Tokamak** je stroj za proizvodnju toroidalnog magnetskog polja za razgraničenje plazme. To je jedan od najviše istraživanih kandidata za proizvodnju **kontrolirane termonuklearne fuzijske energije**. U novije se vrijeme uređaji ovakvog tipa nazivaju zajedničkim imenom **fuzijski reaktori**.

Pojam **tokamak** je transliteracija ruske riječi **токамак** koja je sama po sebi kratica od ruske riječi: "**тороидальная камера в магнитных катушках**" - *toroidal'naya kamera magnitnoi katushki* – toroidalna komora s magnetiziranim zavojnicama (vjerojatno *tochamac*).

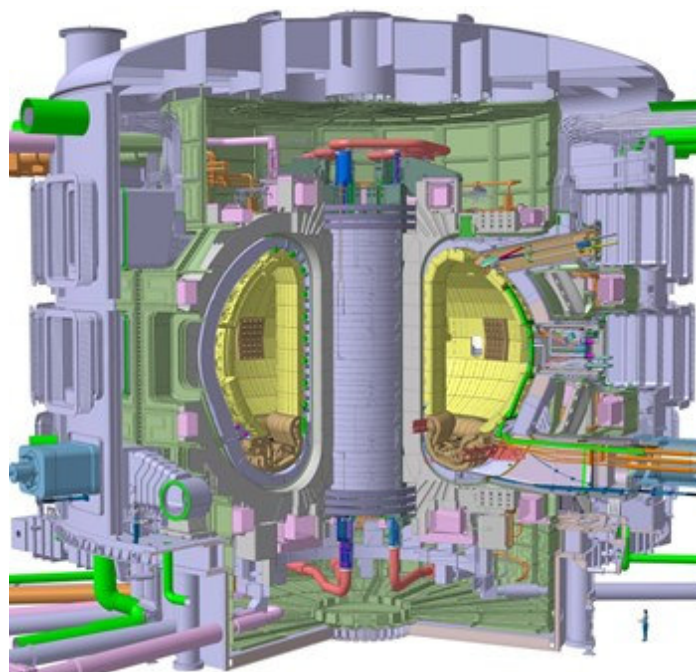


Slika 12: Tokamak

Do kraja 20. stoljeća je postignut značajan napredak u istraživanju fuzije u tokamaku pa je početkom 21. stoljeća došlo do međunarodnog dogovora o gradnji Međunarodnog termonuklearnog eksperimentalnog reaktora – **International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)**.

ITER će biti najveće na svijetu eksperimentalno fuzijsko postrojenje dizajnirano da se vidi znanstvena i tehnološka izvedivost korištenja fuzijske snage za energetske svrhe. Istraživanja fuzije imaju za cilj razvoj prototipne fuzijske elektrane koja bi bila sigurna i pouzdana, odgovorna kad je u pitanju okoliš i ekonomski održiva, i s bogatim i široko rasprostranjenim izvorima goriva.

ITER projekt je smješten u Cadarache-u na jugu Francuske u kojem s pola financiranja sudjeluje Europa, a druga polovica sredstava dolazi od 6 članica koje su se pridružile ovom međunarodnom pothvatu – Kina, Indija, Japan, Koreja, Rusija i SAD.

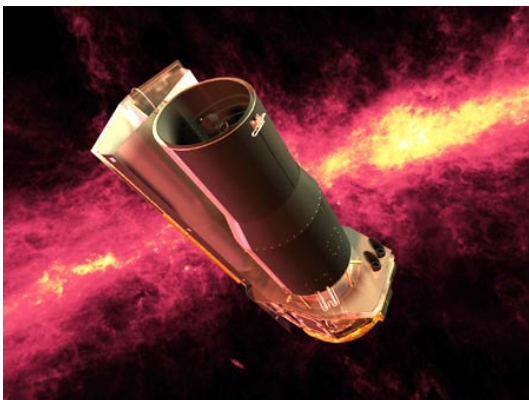


Slika 13: ITER (<http://www.iter.org/factsfigures>)

Što se tiče daljnjih istraživanja fuzije koja se nisu zasnivale na principu tokamaka, moglo se reći da su se odvijala s više ili manje uspjeha. Mnoga su i dalje koristila magnetsko ograničavanje plazme kao što se koristilo u tokamaku no razvijale su se i sheme inercijskog ograničavanja. U njima su se laserima visoke snage ili sličnim snažnim izvorima bombardirale tablete (pellets; milimetarskog promjera) termonuklearnog goriva s ultrakratkim, ekstremno snažnim impulsima jako fokusirane usmjerene energije. Intenzivna upadna snaga je djelovala na površinu peleta tako da je došlo do ablacije i radijalnog zračenja iz peleta, a na drugu stranu se javila sila djelujući radijalno natrag u pelet tako da ga komprimira adijabatski, stvarajući pri tom veću gustoću i temperaturu. S dovoljno velikom adijabatskom kompresijom, uvjeti za odvijanje fuzije bili su postignuti.

Simultano s istraživanjem fuzije, počela se sve opsežnije proučavati **plazma u svemiru**. Izvedena su mjerenja plazme blizu Zemljine površine (aurora - zora, ionosfera) i to pomoću instrumenata na samoj površini Zemlje. 1958. godine je astrofizičar **James A. Van Allen** (1914-2006) otkrio pojaseve zračenja koji okružuju Zemlju. Oni su tada nazvani **Van Allenovi pojasi**. Nakon tog otkrića su sateliti U.S. Explorer počeli istraživati Zemljinu magnetosferu i to je otvorilo područje fizike plazme svemira.

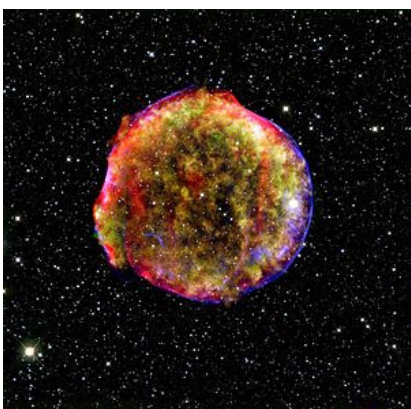
Kako se razvijao svemirski program, tako su sve rutiniranija postajala **mjerenja plazme in situ**: Zemljina magnetosfera, solarni vjetar i magnetosfere drugih planeta. Kasnije se izučavala i solarna korona, kompleksne strukture i dinamika eksplozija. Razvojem interferometara, pa kasnije i teleskopa poput **Hubble**-a i **Spitzer**-a, sve detaljnije su se počele proučavati svemirske strukture, materija i slično (zvijezde, aktivne galaktičke jezgre, crne rupe...). No shvatilo se da su svojstva svemirske plazme jednaka svojstvima laboratorijski proizvedene plazme samo što se radilo na mnogo većoj skali.



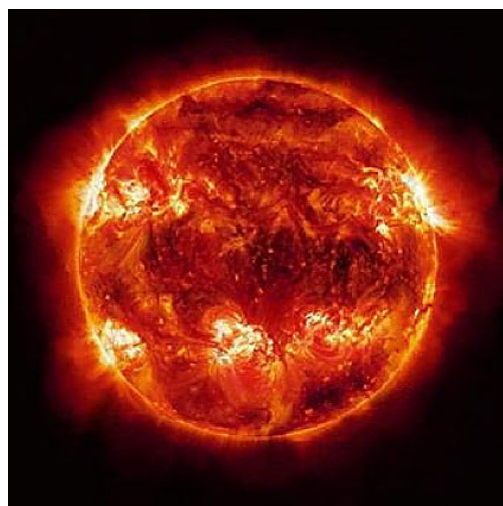
Slika 14: Spitzer Space Telescope



Slika 15: Hubble Telescope



Slika 16: The remnant of "Tycho's Supernova", a huge ball of expanding plasma. The outer shell shown in blue is X-ray emission by high-speed electrons.

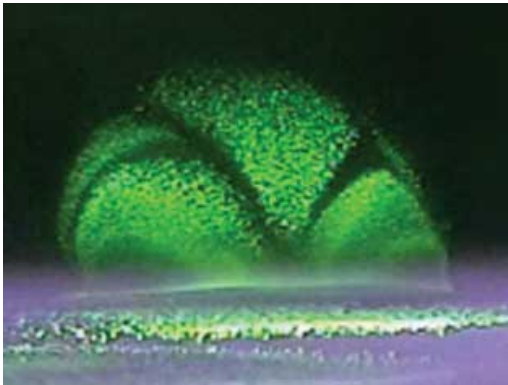


Slika 17: Solarni vjetar

Kasnih 1980-ih se počinju javljati nove primjene plazme – **procesiranje plazmom** - koje se javlja u proizvodnji sićušnih, složenih integriranih krugova koji se koriste u modernim elektroničkim uređajima. Ova primjena ima sve veću ekonomsku važnost.

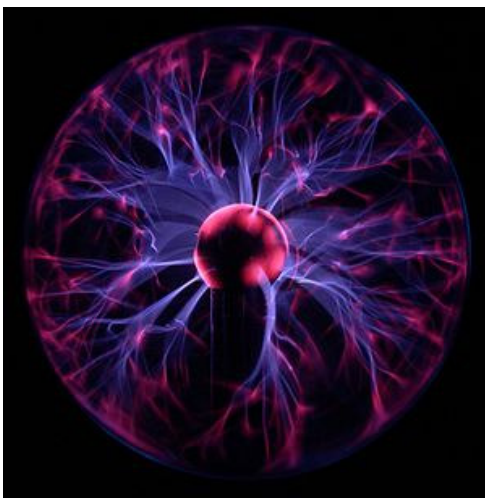
1980-ih počinje istraživanje **ne-neutralne plazme**. To je plazma koja se sastoji od naboja koji nisu neutralizirani, svi su istog predznaka, nije ih jednostavno dobiti u obliku plazme, a to su npr. plazme koje se sastoje samo od elektrona, ili samo od iona, samo od pozitrona. Zanimljive su zato što se mogu duže vrijeme ograničiti korištenjem samo statičkih električnih i magnetskih polja.

1990-ih se počinje istraživati **plazmena prašina (dusty plasma)**. To je plazma koja se sastoji od čestica nanometarskih ili mikrometarskih veličina koje su na neki način suspendirane u plazmi. One se mogu električki nabiti i onda se takve masivne zajedno s plazmom, sastavljenom od elektrona i iona, ponašaju kao „nova“ plazma slijedeći zakone elektromagnetizma, ali pri tom pokazujući i neka sasvim nova svojstva.



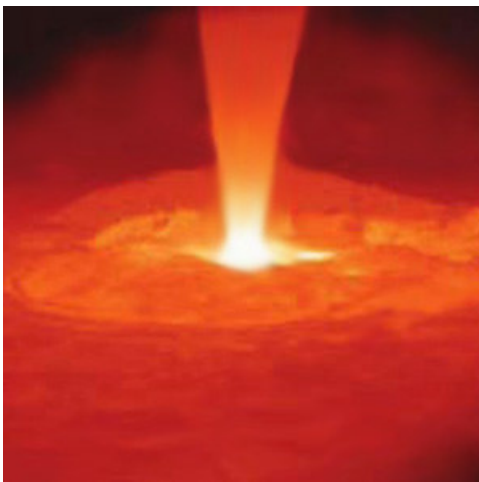
Slika 18: Example of complex structuring observed in DUPLEX dusty plasma clouds with 1-mm alumina microparticles.

I ne-neutralne i dusty plazme mogu stvarati bizarna, jako vezana kolektivna stanja u kojima se plazma vraća u čvrsto stanje npr. tvoreći kvazi-kristalne strukture.

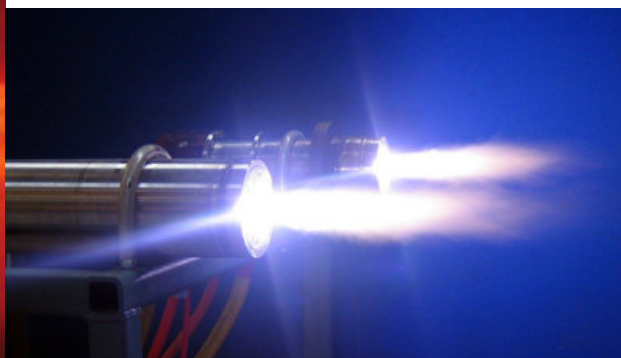


Slika 19: Plasma lamp, illustrating some of the more complex phenomena of a plasma, including *filamentation*. The colors are a result of relaxation of electrons in excited states to lower energy states after they have recombined with ions. These processes emit light in a spectrum characteristic of the gas being excited.

Uz sve gore spomenute aktivnosti, odvijala su se kontinuirano istraživanja **industrijski relevantne plazme** poput **lukova (arcs)**, **plazmenih baklji (plasma torches)** i **laserskih plazmi**. Razvoj lasera velike snage 60-ih godina 20.st. otvorio je područje laserske plazme. Nakon što zraka lasera udari u metu, atomi i molekule izlijeću iz mete, a nad metom se stvori plazma koja se brzo širi u prostor. Vruća i gusta plazma nakon nekoliko mikrosekundi prelazi u hladnu i rijetku. Taj proces se naziva laserska ablacija.



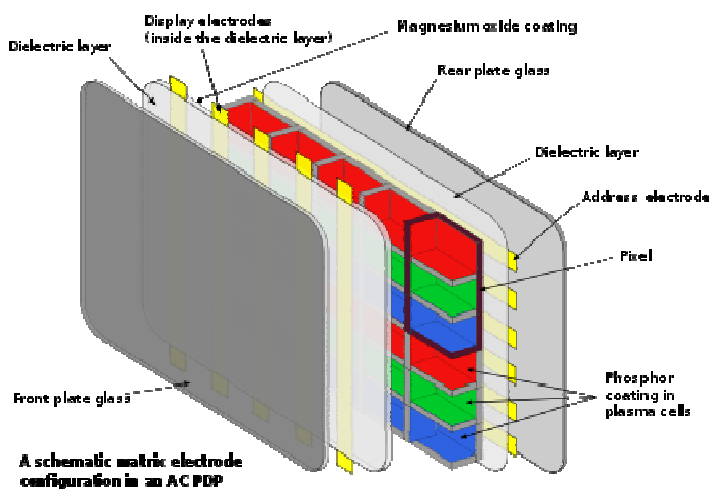
Slika 20: Plasma arc



Slika 21: Plasma torches



Slika 22: Image of Excimer laser produced plasma plume in lead silicate glass, in tellurite glass and lead germanate glass



Plazmeni displeji se koriste u **plazma-televizorima**, a imamo i prirodno javljanje **zemaljske plazme** u obliku **munje**.

Slika 23: Composition of plasma display panel

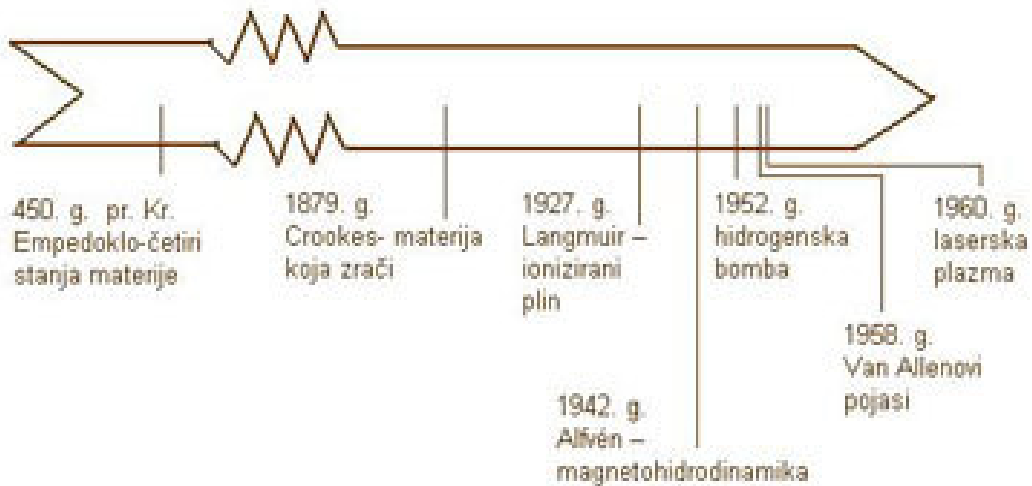


Prikazani niz fotografija dokumentira munju snimljenu u ljeto 2007. na Brijunima za vrijeme jedne kratke ljetne oluje. 15 fotografija odgovara vremenu jedne sekunde (snimljeno pomoću Olympus fotoaparata). Takva vrst ionizacije plina (zraka) dešava se na Zemlji vrlo često (oko 30 bljeskova u sekundi).



Slika 24: Lightning is an example of plasma present at Earth's surface. Typically, lightning discharges 30,000 amperes at up to 100 million volts, and emits light, radio waves, X-rays and even gamma rays. Plasma temperatures in lightning can approach ~28,000 kelvin and electron densities may exceed 10^{24} m^{-3} .

Danas, iako su blagodati svakodnevnog života neodvojive od plazme, postoji još uvijek potreba za stalnim jačanjem svijesti o postojanju i korištenju plazme. Potrebno je razumjeti znanost o plazmi i vidjeti koje su sve **tehnološke primjene plazme**. Premda se plazma smatra **četvrtim agregatnim stanjem**, nije nam nije očigledna kao zrak (plin), voda (tekućine), i zemlja (krute tvari).



Slika 25: Vremenska lenta