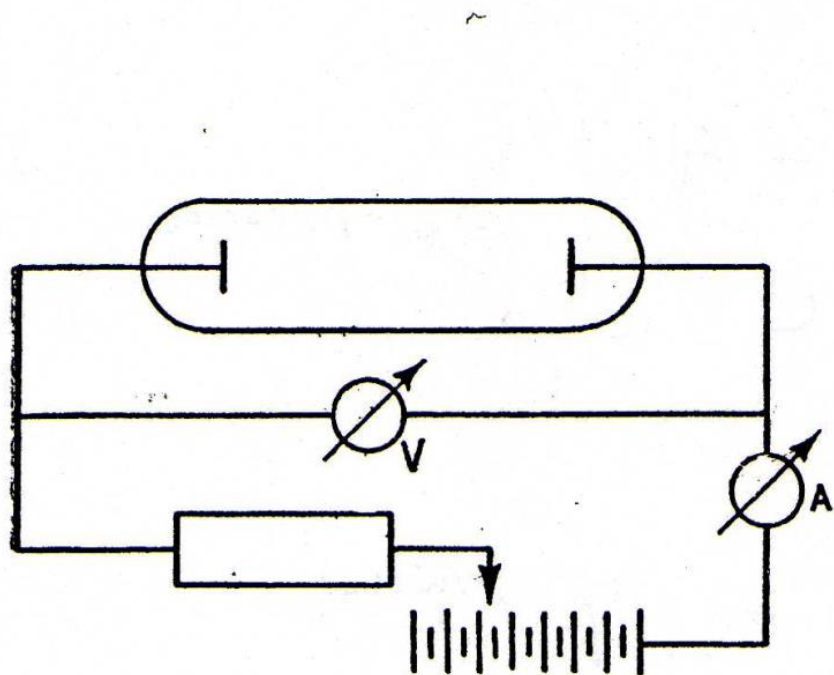


Dobijanje plazme u laboratorijskim uslovima
Električna pražnjenja u gasovima

Dobijanje plazme u laboratoriji

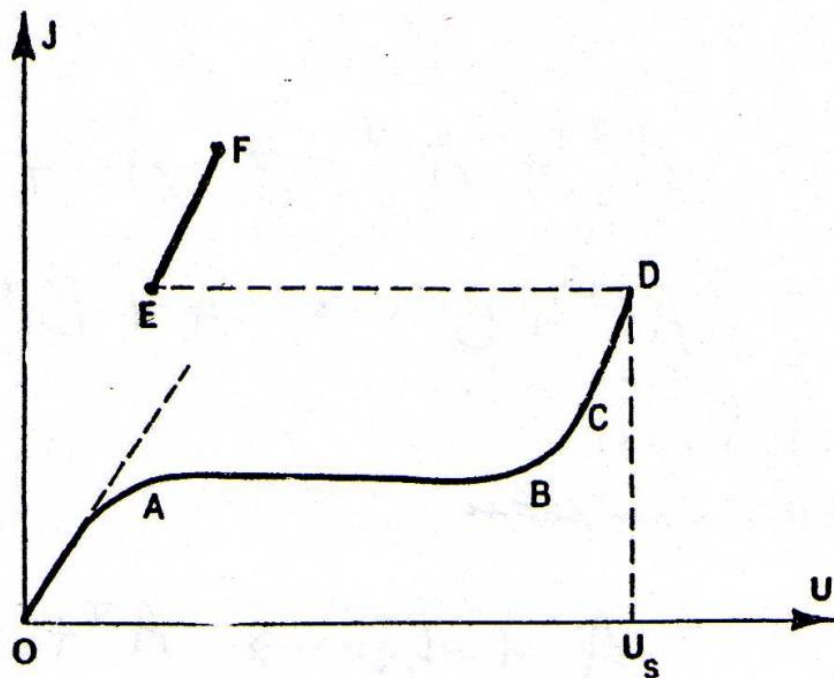
- Najuobičajeni način dobijanja plazme u laboratoriji je korišćenje električnih pražnjenja u gasovima.
- **Zašto?** U ovim pražnjenjima je bar izvestan procenat gasnih atoma (ili molekula) u jonizovanom stanju, a **radna supstanca se bar u izvesnim oblastima pražnjenja nalazi u stanju plazme.**
- Najjednostavniji slučaj kada je primenjeno spoljašnje električno polje konstantno.
- Osnovna karakteristika električnog pražnjenja u gasu je zavisnost jačine struje koja prolazi kroz gas od napona između elektroda, tzv. **volt-amperna karakteristika.**

Volt-amperna karakteristika gasnog pražnjenja niskog pritiska u konstantnom spoljašnjem električnom polju



Slika 1.7.

Shematski prikaz uređaja za snimanje volt-amperne karakteristike gasnog pražnjenja



Slika 1.8.

Tipičan izgled volt-amperne karakteristike gasnog pražnjenja u jednosmernom režimu. U_s je napon paljenja

Objašnjenje za I-V grafik

- Postoji nekoliko oblasti sa različitim fizičkim uslovima.
- Za svaki konkretan slučaj se može naći izvestan *napon paljenja* U_s koji zavisi od dijametra cevi za pražnjenja, prirode elektrode, prirode gasa i pritiska koji vlada u cevi.
- Kada se napon između elektroda povećava od nule do U_s , gas je u režimu *nesamostalnog pražnjenja*, tj. prolaz struje je moguć samo ako na gas deluje neki spoljašnji jonizator.
- Isključivanje spoljašnjeg jonizatora dovodi do prekidanja provođenja električne struje kroz gas.
- Pri naponu U_s pražnjenje postaje *samostalno*, tj. nastavlja se i ukoliko se ovaj jonizator ukloni.
 - Zašto se U_s naziva napon paljenja?

Detaljnje o režimu *nesamostalnog* pražnjenja

- Deo grafika OA: pri sasvim malim naponima, struja kroz gas je proporcionalna naponu, kao i kod metalnih provodnika. To je, dakle oblast važenja Om-ovog (Ohm) zakona.
- Pri tako malim naponima samo deo jona i elektrona nastalih dejstvom spoljašnjeg jonizatora dospeva do elektrode pod uticajem uspostavljenog električnog polja, dok ostatak rekombinuje.
- Kako napon raste, procenat jon-elektronskih parova koji uspevaju da rekombinuju postaje sve manji, tako da pri određenom napon ovaj procenat postaje jednak nuli i struja gas **dostiže zasićenje**.
- Deo grafika AB: dalje povećanje napona ne može dovesti do porata jačine struje, ali naelektrisane čestice između dva sudara sa atomima gasa dobijaju sve veću energiju od električnog polja.

Multiplikativni procesi

- Kad energija naelektrisanih čestica dotigne odeđenu vrednost, naelektrisane čestice (prvenstveno elektroni) počinju učestvovati i u neelastičnim sudarima sa atomima gasa.
- Javlja se niz elementarnih procesa i broj naelektrisanih čestica u gasu raste preko one granice koja je određena spoljnim jonizatorom.
- Ovi elementarni procesi se jednim imenom nazivaju *multiplekativni procesi*, a povećanje broja elektrona se označava *elektronska lavina*.

α , β i γ multiplikativni procesi

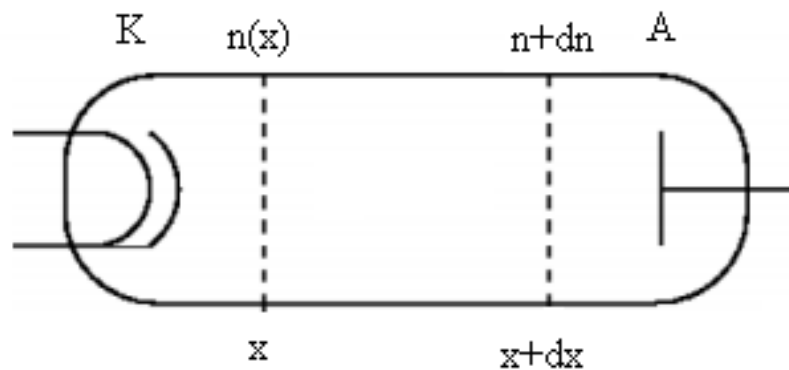
- Jonizacija elektronskim udarom: α -proces – broj elektrona i jona se povećava pri čemu se i novonastali elektroni ubzavaju u električnom polju pa učestvuju u daljem toku α - procesa.
- Svi drugi jonizacioni procesi u gasu se zajednički zovu β procesi (β_m , β_i).
- Multiplikativni procesi nastaju i na elektrodama, prvenstveno na katodi (tzv. γ procesi).
- γ_i procesi: izbijanje sekundarnih elektrona iz katode usled bombardovanja pozitivnim jonima.
- Pražnjenje postaje samostalno onda kad multiplikativni procesi obezbede takvo stanje da se na vaki elektron koji ode na anodu ili na zid cevi za pražnjenje u gasu pojavi bar jedan novi elektron.

Taunsend-ovo (Townsend) pražnjenje

- Pražnjenje pod niskim pritiskom i u konstantnom spoljašnjem električnom polju.
- Od multiplikativnih procesa uzimaju se u obzir α procesi (jonizacija elektronskim udarom);
 - β procesi se mogu zanemariti, a od γ -procesa uzeti u obzir samo izbijanje sekundarnih elektrona iz katode usled bombardovanja pozitivnim jonima (γ_i -procesi).

proračun

- Za kvantitativno karakterisanje α procesa uvodi se koeficijent α (tzv. “prvi Taunsend-ov koeficijent”) - koji definiše broj jonskih parova koje obrazuje jedan elektron prešavši kroz gas put jedinične dužine u pravcu anode.
- $\alpha = \alpha(p, E)$



- $dn = \alpha n(x)dx$
- $n(x) = n(0) \exp(\alpha x)$
- $n(0)$ ukupan broj elektrona koji u jedinici vremena polaze sa jedinice površine katode.
- Na jedinicu površine anode ($x=d$) u jedinici vremena stiže $n(0)\exp(\alpha d)$ elektrona

nastavak

- α procesi dovode do formiranja $n(0)(\exp(\alpha d)-1)$ elektron-jonskih parova u zapremini međukatodnog prostora koji pripada jedinici površine elektroda pri prolasku prvobitnih $n(0)$ elektrona.
- Nastali pozitivni joni odlaze prema katodi i ubrzavaju se usput, a prilikom udara u katodu izbijaju iz nje elektrone.
- Proces sekundarne emisije se karakteriše koeficijentom γ (tzv. “treći Taunsend-ov koeficijent”) koji daje broj elektrona izbijenih u srednjem iz katode pri udaru jednog jona (10^{-2} do 10^{-3}).
- Broj sekundarno emitovanih elektrona sa katode usled γ_i procesa će biti: $\gamma n(0)(\exp(\alpha d)-1)$

Ukupan broj elektrona emitovanih sa jedinice površine katode u jedinici vremena

$$n(0) = \gamma n(0) (e^{\alpha d} - 1) + n_0$$

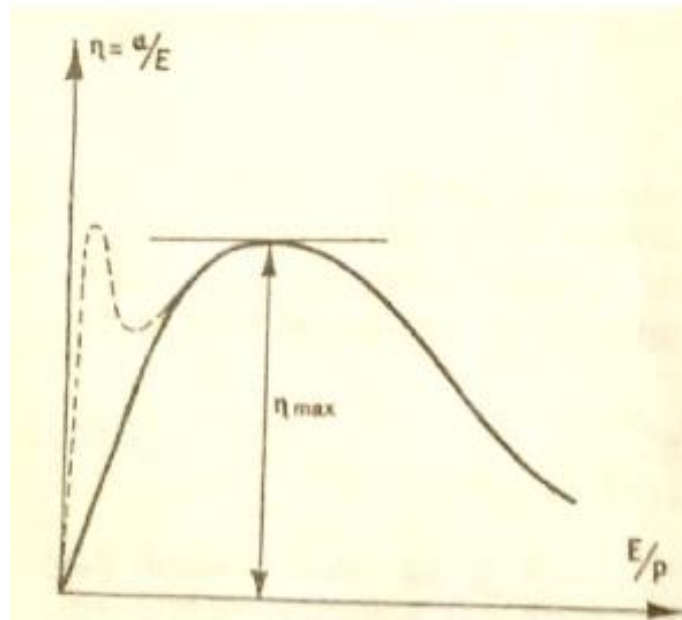
- n_0 označava broj elektrona emitovanih sa jedinice površine katode u jedinici vremena iz spoljnih uzroka
- Rešavanjem po $n(0)$, dobija se:

$$n(d) = n(0)e^{\alpha d} = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

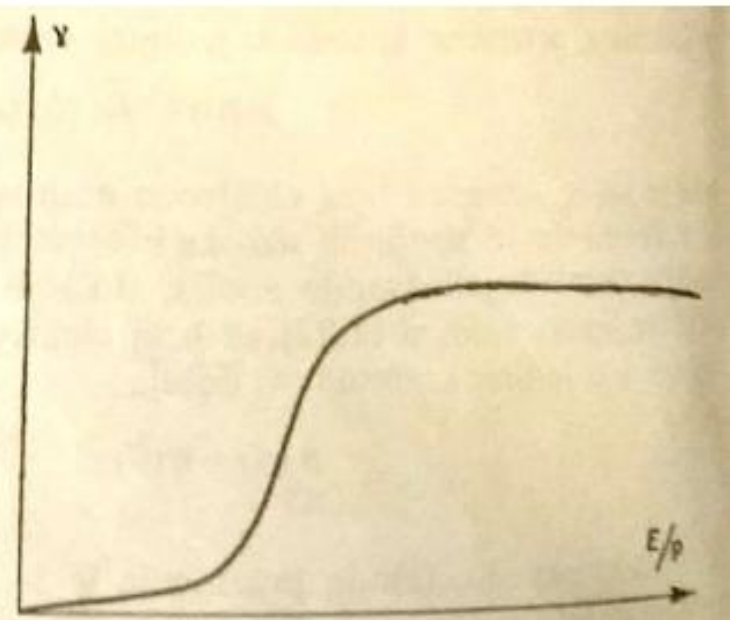
- U oblasti nesamostalnog pražnjenja je $1 - \gamma(\exp(\alpha d) - 1) > 1$, tj. na svai elektron koji ode na anodu emituje se iz katode manje nego jedan elektron.

Taunsend-ovi koeficijenti

- Koeficijenti α i γ nisu konstantni, već funkcije parametara E/p , gde je E intenzitet soljašnjeg električnog polja a p pritisak u gasu.



Slika 1.9.
Zavisnost prvog Townsend-ovog koeficijenta od E/p . Tačkasta linija se odnosi na slučaj kad postoji Penning-ov efekt



Slika 1.10.
Zavisnost trećeg Townsend-ovog koeficijenta od E/p

Proboj kod Townsend-ovog pražnjenja. Pašenov (Paschen) zakon

- Uslov proboja (prelaza nesamostalnog pražnjenja u samostalno) u Taunsend-ovoj teoriji ima oblik

$$\gamma_s \left(e^{\alpha_s d} - 1 \right) = 1$$

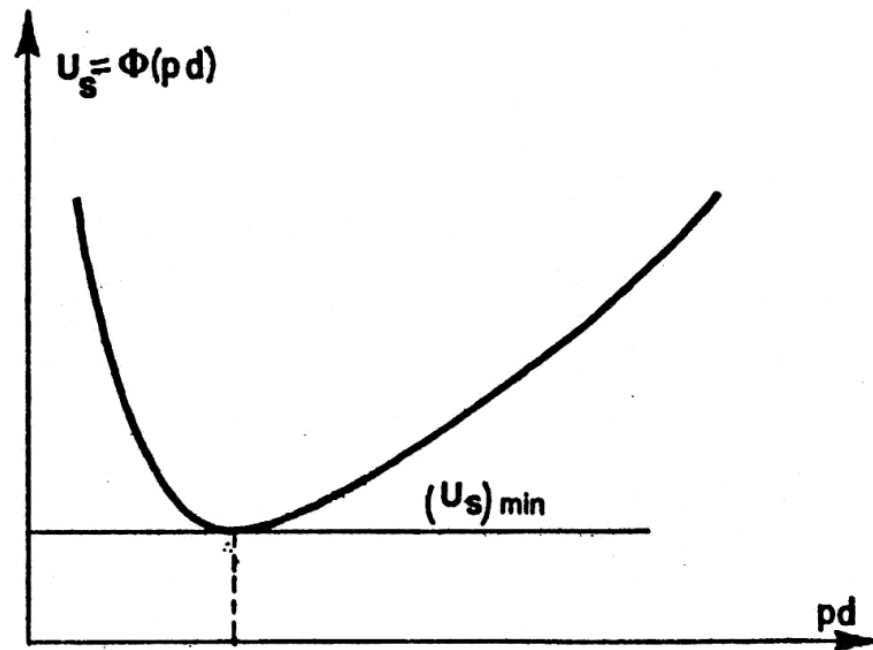
- Indeks s označava da se za Taunsend-ove koeficijente uzimaju vrednosti koje odgovaraju električnom polju $E_s = U/d$

$$\frac{\alpha}{E} = F\left(\frac{E}{p}\right), \quad \gamma = f\left(\frac{E}{p}\right)$$

$$f\left(\frac{U_s}{pd}\right) \left[e^{U_s F\left(\frac{U_s}{pd}\right)} - 1 \right] = 1$$

Pašenov (Paschen) zakon

- Činjenica da je $U_s = \Phi(pd)$ predstavlja Pašenov zakon i tipičan igled funkcije $\Phi(pd)$ je dat na slici.

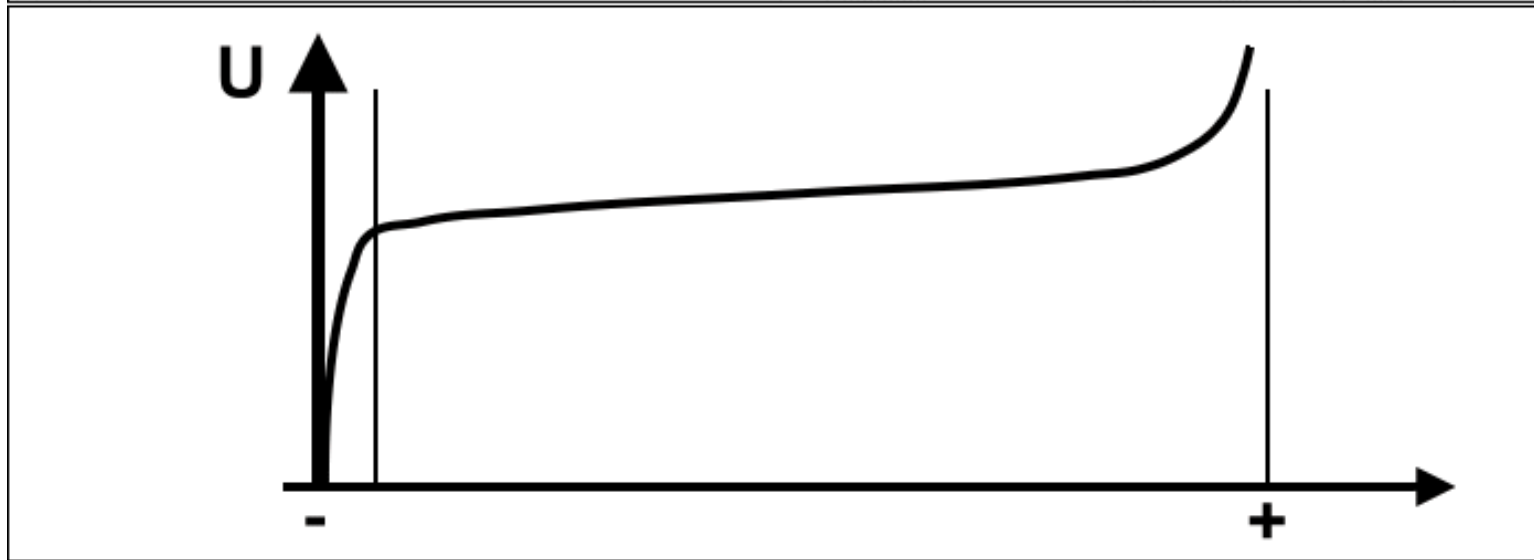
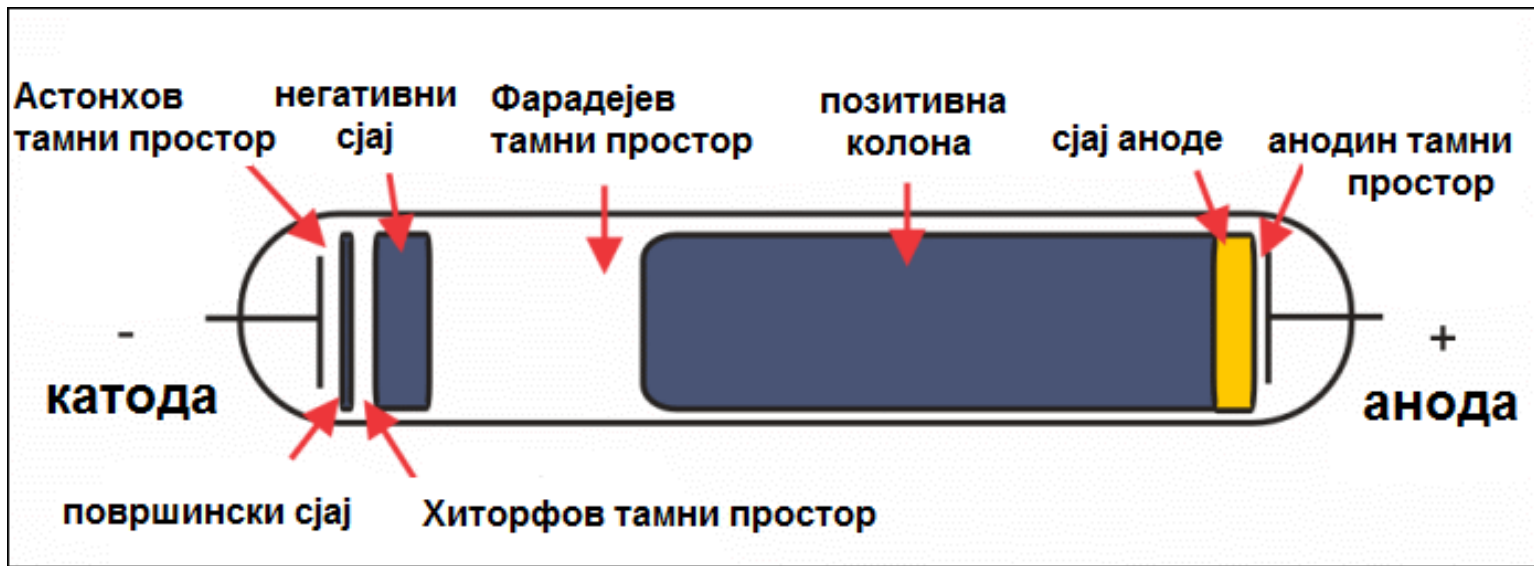


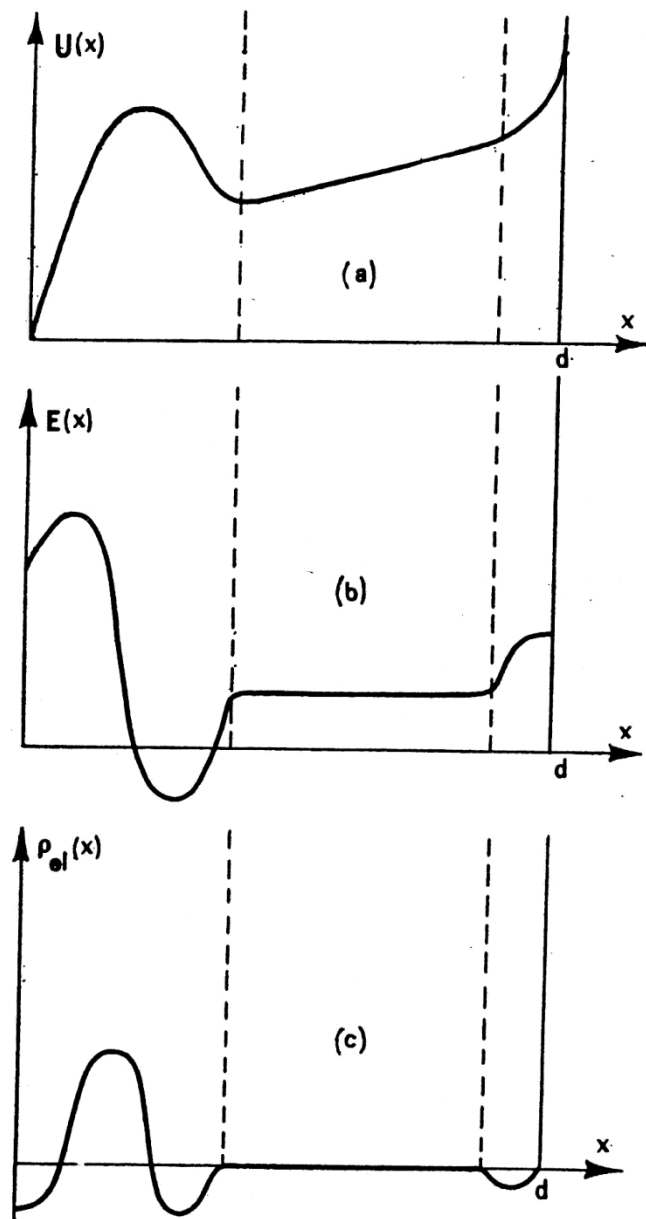
Slika 1.11.

Ilustracija Paschen-ovog zakona: napon paljenja u funkciji proizvoda pd

Tinjavo pražnjenje

- Eksperimenti iz fizike plazme se uglavnom vrše sa *tinjavim pražnjenjem i lukom*.
- Tinjavo pražnjenje se po pravilu uspostavlja pri malim pritiscima (reda veličine 1 mmHg pa i manje). Za njega su od presudnog značaja *multiplikativni procesi u gasu* (α i β procesi).
- Naizmenično raspoređene tamne i svetle zone u idući od katode ka anodi.
- Najveći deo cevi za pražnjenje je ispunjen intenzivno svetlećim *pozitivnim stubom*.
- U pozitivnom stubu ***jonizovani gas je u stanju plazme***.
- Osnovni jonizacioni procesi u pozitivnom stubu su jonizacija elektronskim udarom.
- Važna karakteristika plazme pozitivnog stuba tinjavog pražnjenja je njena *neizotermnost*.





Osnovne karakteristike tinjavog
pražnjenja

Rasodela potencijala $U(x)$ između katode i
anode – nije linearna, jačina električnog
polja $E(x)$ i prostorna gustina
anelektrisanja $\rho_{el}(x)$

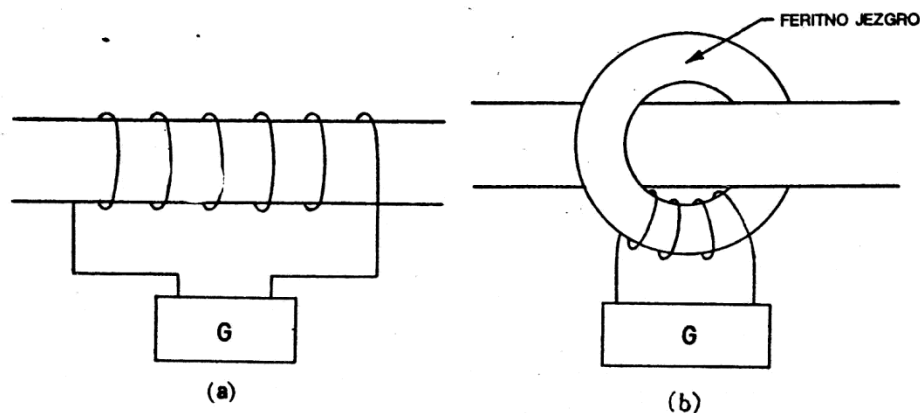
(vertikalnim isprekidanim linijama je
izdvojena oblast pozitivnog stuba)

Slika 1.12.

Raspedela napona (a), intenziteta električnog
polja (b) i gustine prostornog naelektrisanja (c)
kod tinjavog pražnjenja

Pražnjenje u VF električnom polju

- Vremenski promenljivo električno polje
- Elektroni i joni nastali pod dejstvom spoljašnjeg jonizatora ne kreću se ka katodama već samo (prinudno) osciluju oko svojih prvobitnih položaja, sa frekvencijom spoljašnjeg električnog polja.
- Kad energija oscilovanja elektrona dostigne dovoljno visoku vrednost, započinje proces multiplikacije elektronskim udarom.
- Umesto rekombinacije i odlaska na elektrode, ovde se broj elektrona u gasu smanjuje uglavnom njihovom difuzijom na zidove cevi.

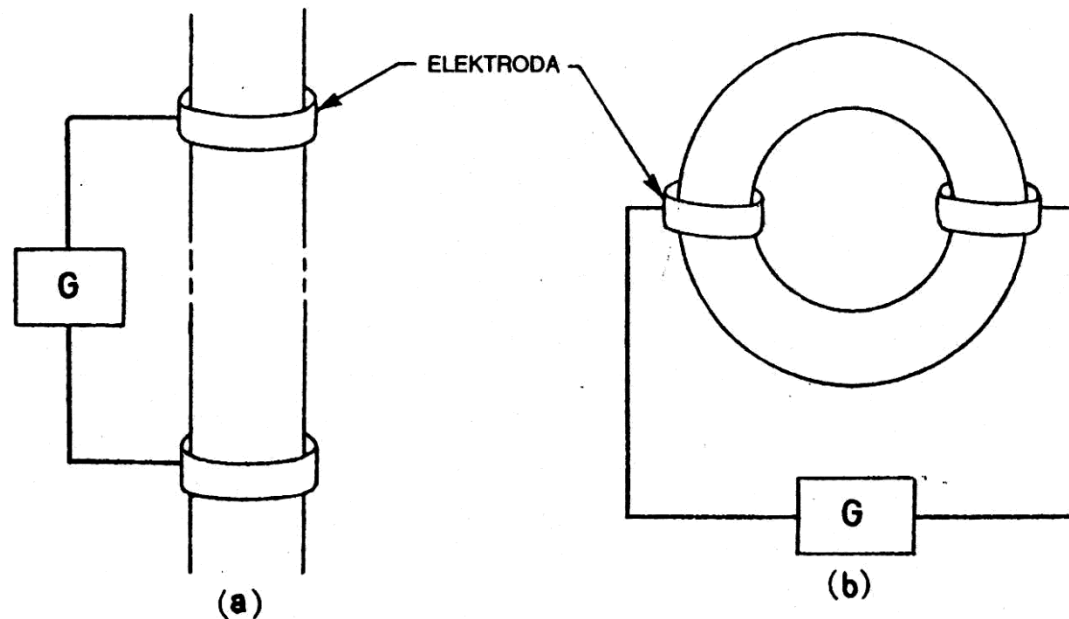


Slika 1.13.

Dve varijante induktivnog proboja u gasu niskog pritiska, koji se nalazi u cevi postavljenoj kao sekundar jednog transformatora čiji je primar vezan za generator G visokofrekventnog napona

VF proboj sa spoljašnjim elektrodama

Proboj nastupa onda kad udarna jonizacija obezbedi pojavljivanje bar jednog elektrona u masi gasa na svaki elektron koji se izgubi usled difuzije i zahteva. Obično se primenjuju frekvencije negde oko 100 kHz do nekoliko MHz sa potencijalnom razlikom od oko 100 V.



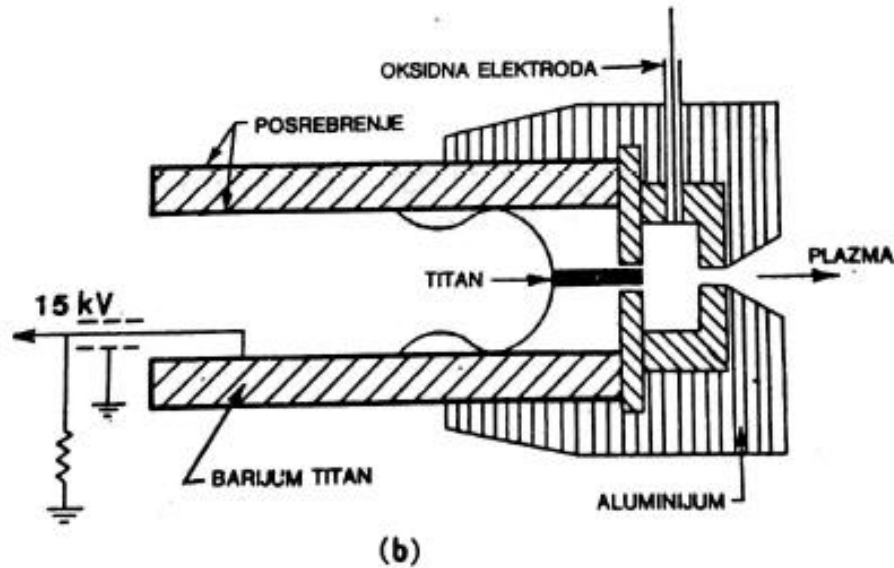
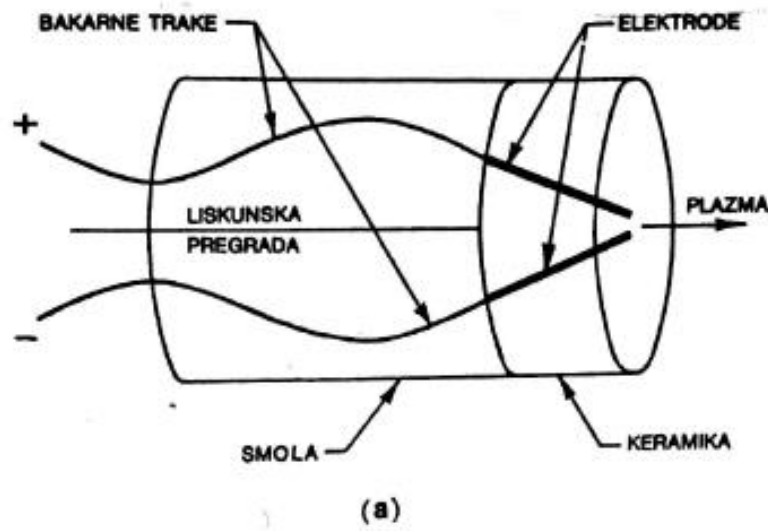
Slika 1.14.
Visokofrekventni proboj sa spoljašnjim elektrodama

Lučno pražnjenje

- Pražnjenje koje nastaje pri većim pritiscima (reda veličine atmosferskog, pa i više).
- Za njega su vrlo bitni procesi koji se odigravaju na elektrodama (γ – procesi) dok su α – procesi (multiplikacija elektronskim udarom) bez većeg značaja, jer pri povišenim pritiscima elektron između dva sudara ne može da nakupi dovoljno energije za jonizaciju.
- Kod lučnog pražnjenja katoda je često usijana, te se termoelektronska emisija iz nje javlja kao bitan faktor pražnjenja.
- U lučnom pražnjenju je gas u stanju plazme.
- Plazma luka je izotermna, katodni pad potencijala je mali, gustina struje je velika.

Plazmeni izvori

- Često je potrebno proizvesti plazmu odvojeno (i, ponekad, dobijene jone i elektrone ubrzati) a zatim ubrizgati plazmu u eksperimentalni uređaj, gde će naelektrisane čestice biti “zahvaćene” magnetnim poljem pogodne geometrije. Za takvo formiranje plazme koriste se posebni uređaju, tzv. Plazmeni izvori (ili plazmeni “topovi”).
- Izvori izbacuju plazmu u impulsima, u vidu “oblačića”, sa trajanjem impulsa oko 0.1 do 0.5 mikrosekunde.
- **Plazmoid** (10^{15} do 10^{18} jona po impulsu) i ima brzinu kretanja do 10^4 do 10^5 m/s.
- Ostali načini dobijanja plazme u laboratoriji:
 - - **prolaz snopa elektrona kroz neutralni gas** (Astron): dolazi do udarne jonizacije
 - - **prolaz laserskog zračenja kroz neutralni gas** (dolazi do forojonizacije i termalne jonizacije u gasu)
 - - **Udarni talasi**
 - **Termojonska emisija** (efekat izbacivanja jona sa usijane metalne površine (Q mašine)

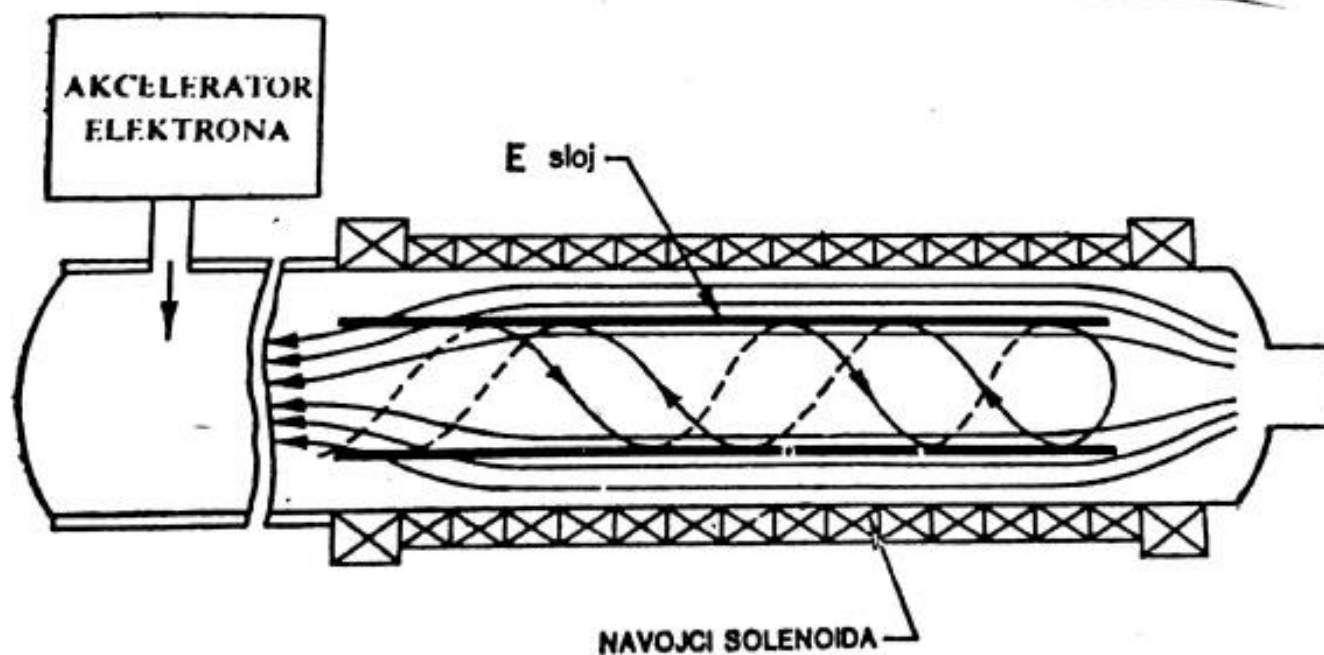


Slika 1.16.
 Shematski prikaz dve varijante plazmenih izvora sa impulsnim režimom rada. (a) Izvor za dobijanje niskenergetskih plazmoida; (b) izvor za dobijanje visokoenergetskih „oblačića“ plazme

Ostali načini dobijanja plazme

- Prolaz snopa elektrona kroz neutralan gas
- Snop elektrona, ubrzan do potrebne energije, usmerava se u neutralni gas. Pri prolazu snopa elektrona kroz gas, dolazi do udarne jonizacije, slično situaciji u gasnom pražnjenju.
- Posebna varijanta ovakvog načina formiranja plazme je uređaj “Astron”. Njegov glavni deo je duga cilindrična cev ispunjena željenim gasom (na primer deuterijum) stavljena u jako magnetno polje sa linijama sila paralelnim njenoj osi.
- Na krajevima cevi je magnetno polje sa konvergentnim linijama sile, tzv. magnetno ogledalo.
- Snop elektrona energije oko 50 keV ubacuje se u sistem na jednom kraju cevi, krećući se kroz gas vrše udarnu jonizaciju gas.

Astron



Slika 1.18.

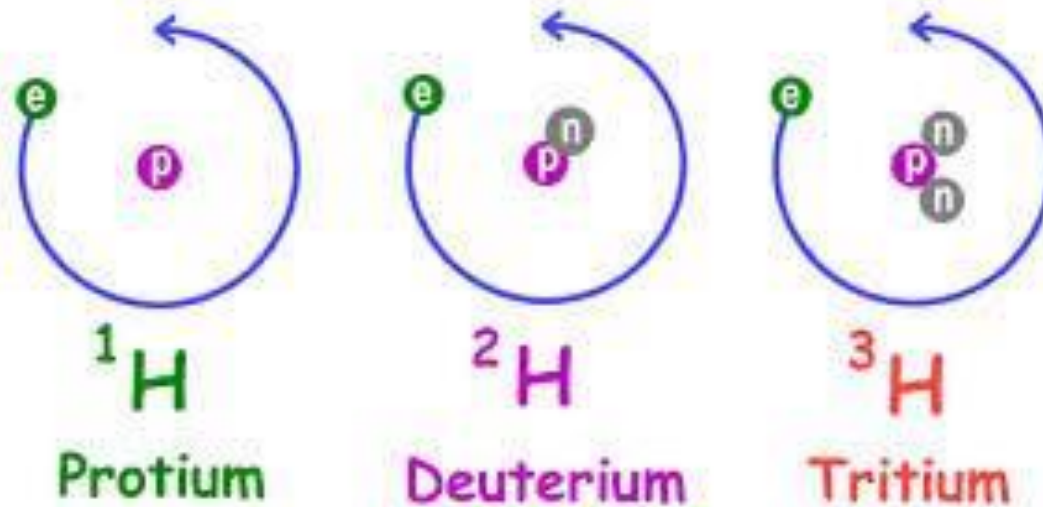
Shema „Astrona“. Prikazano je nekoliko linija sile magnetnog polja, jedna tipična trajektorija elektrona kao i položaj *E*-sloja

Prolaz laserskog zračenja

- Propuštanjem laserskog zračenja se u neutralnom gasu izazivaju dva efekta koji dovode do formiranja jona : fotojonizacija.
- Apsorpcija elektromagnetnog zračenja - dolazi do zagrevanja gasa praćeno termalnomjonizacijom.
- Veliko interesovanje izaziva obrazovanje vrlo guste deuterijumove plazme na taj način što se vrlo mali kristalići leda teške vode (ivice oko 1 mm ili manje) izlože dejstvu laserskog snopa, usled nastupa naglo (z amanje od 0.1 mikrosekunde) topljenje i isparavanje teške vode, zatim termalna disocijacija njenih molekula i jonizacija deuterijuma.

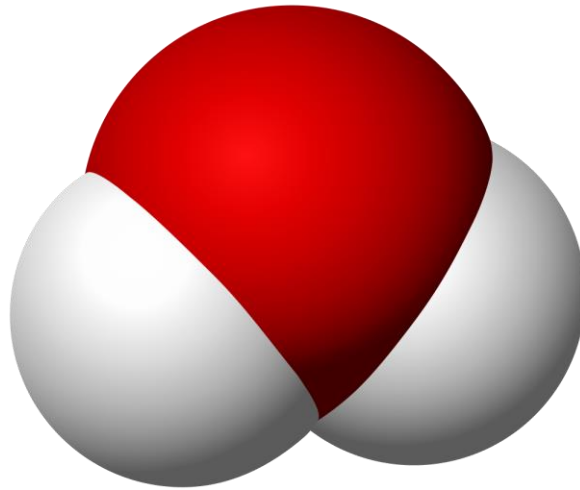
Šta je deuterijum

Three Isotopes of Hydrogen



Teška voda

- https://sr.wikipedia.org/sr-el/Тешка_вода





Princip detaljne ravnoteže i stepen jonizacije



Stepen jonizacije X

$$X = \frac{n_{A^+}}{n_A^0} = \frac{\text{broj jonizovanih atoma po jedinici zapremine}}{\text{broj prvobitno prisutnih neutralnih atoma u istoj jedinici zapremine}}$$

- $X=0$ neutralni gas
- $X=1$ potpuno jonizovana plazma
- $X < 10^{-4}$ slabo jonizovana plazma
- $X > 10^{-1}$ jako jonizovana plazma
- Koncentracija neutralnih atoma n_A u stanju sa stepenom jonizacije X možemo pisati

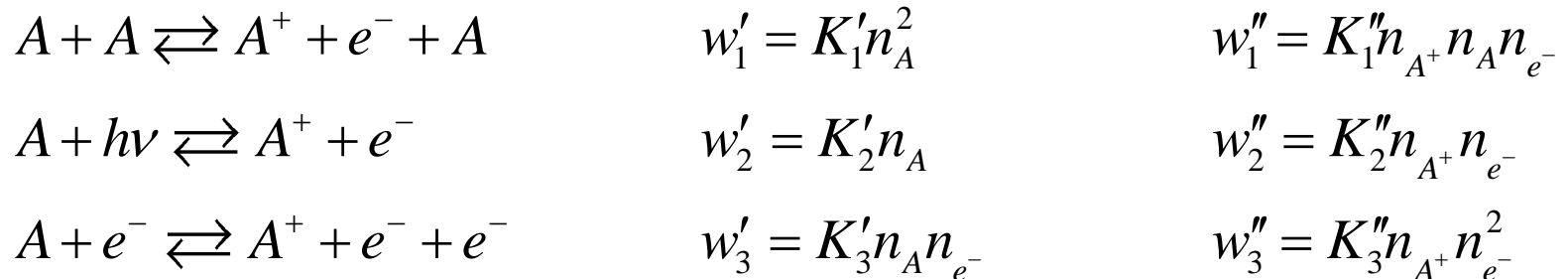
$$n_A = n_A^0 - n_{A^+} = n_A^0 (1 - X)$$

$$\frac{n_{A^+}}{n_A} = \frac{X}{1 - X}$$

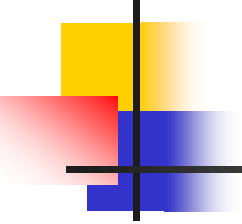


Stanje jonizaciono-rekombinacione ravnoteže

Posmatrajmo plazmu koja se sastoji od samo jedne vrste neutralnih atoma A , jednostruko pozitivno naelektrisanih jona A^+ i elektrona e^- .
Procesi koji dolaze u obzir su:



Princip detaljne ravnoteže: svaki mikroskopski proces koji je moguć u nekom fizičkom sistemu ima i svoj a priori jednako verovatan inverzni proces, i stanje termodinamičke ravnoteže se postiže tek onda kad, u izolovanom sistemu, brzina svakog mikroprocesa ponaosob postane jednaka brzini korespondentnog inverznog procesa.


$$w'_1 = w''_1, w'_2 = w''_2, w'_3 = w''_3$$

$$\frac{n_{e^-} n_{A^+}}{n_A} = K(T) \quad \text{ili} \quad \frac{X^2}{1-X} n_A^0 = K(T)$$

$$p = (n_{A^+} + n_{e^-} + n_A) kT = (1+X) n_A^0 kT$$

$$\frac{X^2}{1-X^2} \frac{p}{kT} = K(T)$$

Nuklearna fuzija

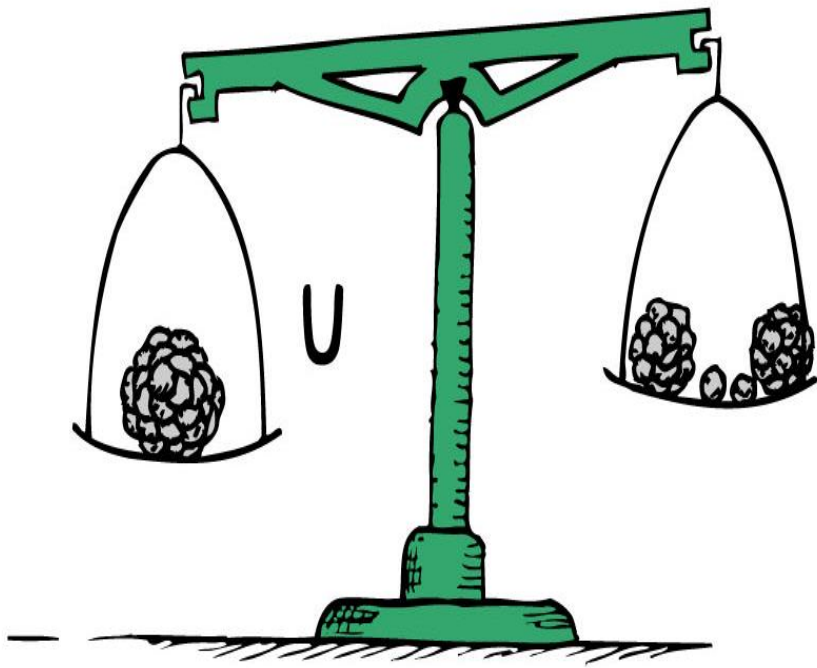
Nuklearne reakcije

- Fisija
 - Nuklearna reakcija cepanja jezgra atoma na dva dela (fisijski fragmenti) pri čemu se oslobađa velika količina toplotne energije

Fuzija

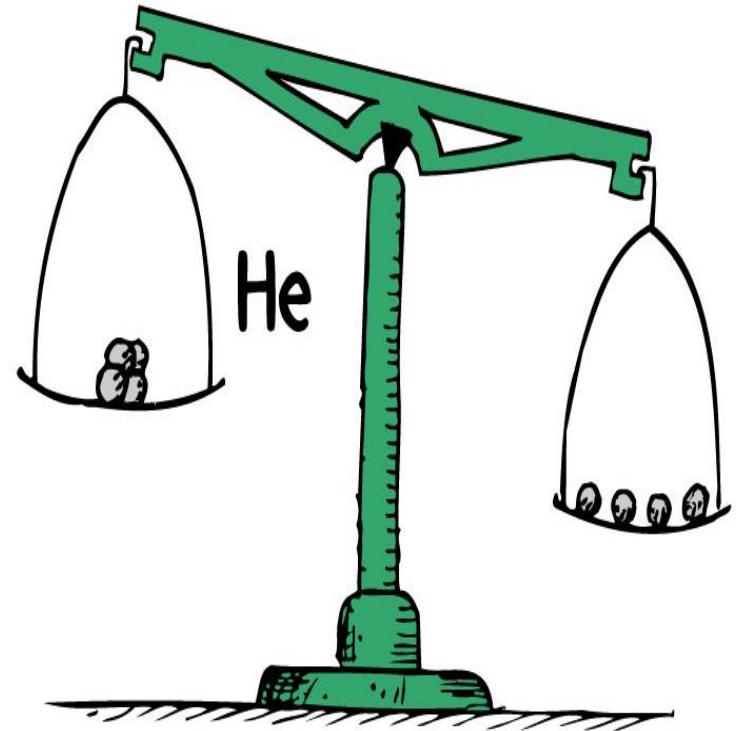
- Nuklearna reakcija spajanja jezgara atoma pri čemu nastaje teže jezgro uz oslobodenje toplotne energije

Energija iz jezgra



(a)

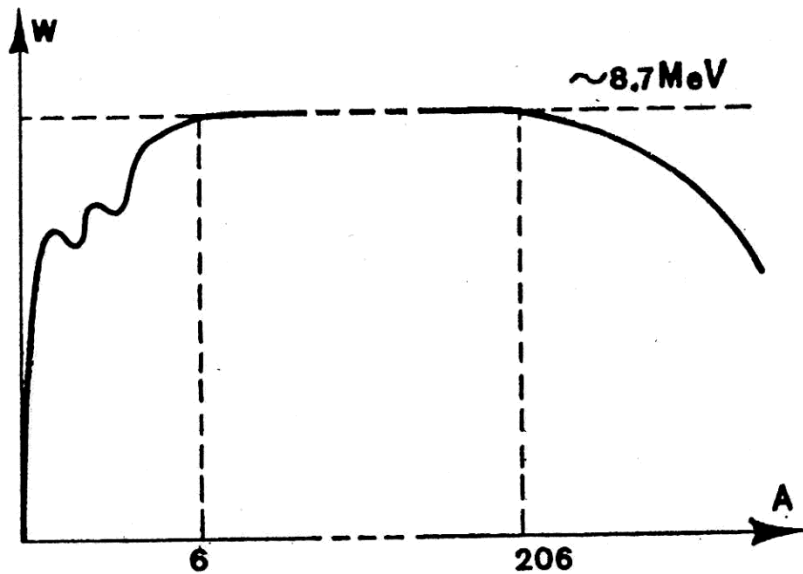
Fisija



(b)

Fuzija

Kontrolisane termonuklearne reakcije u zemaljskim uslovima



Slika 1.19.

Energija vezivanja po jednom nukleonu u funkciji masenog broja A

$$D(d,n)He^3 \quad (3.25 \text{ MeV})$$

$$D(d,p)T \quad (4.0 \text{ MeV})$$

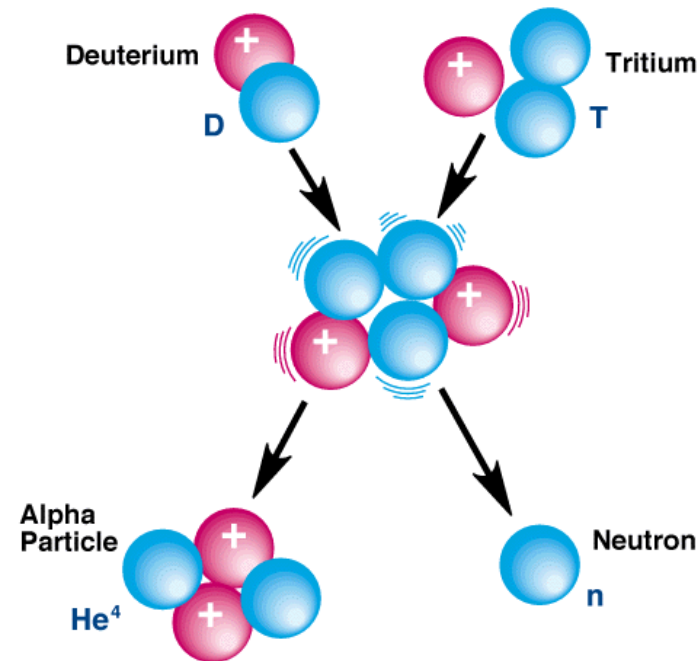
$$T(d,n)He^4 \quad (17.6 \text{ MeV})$$

$$He^3(d,p)He^4 \quad (18.3 \text{ MeV})$$

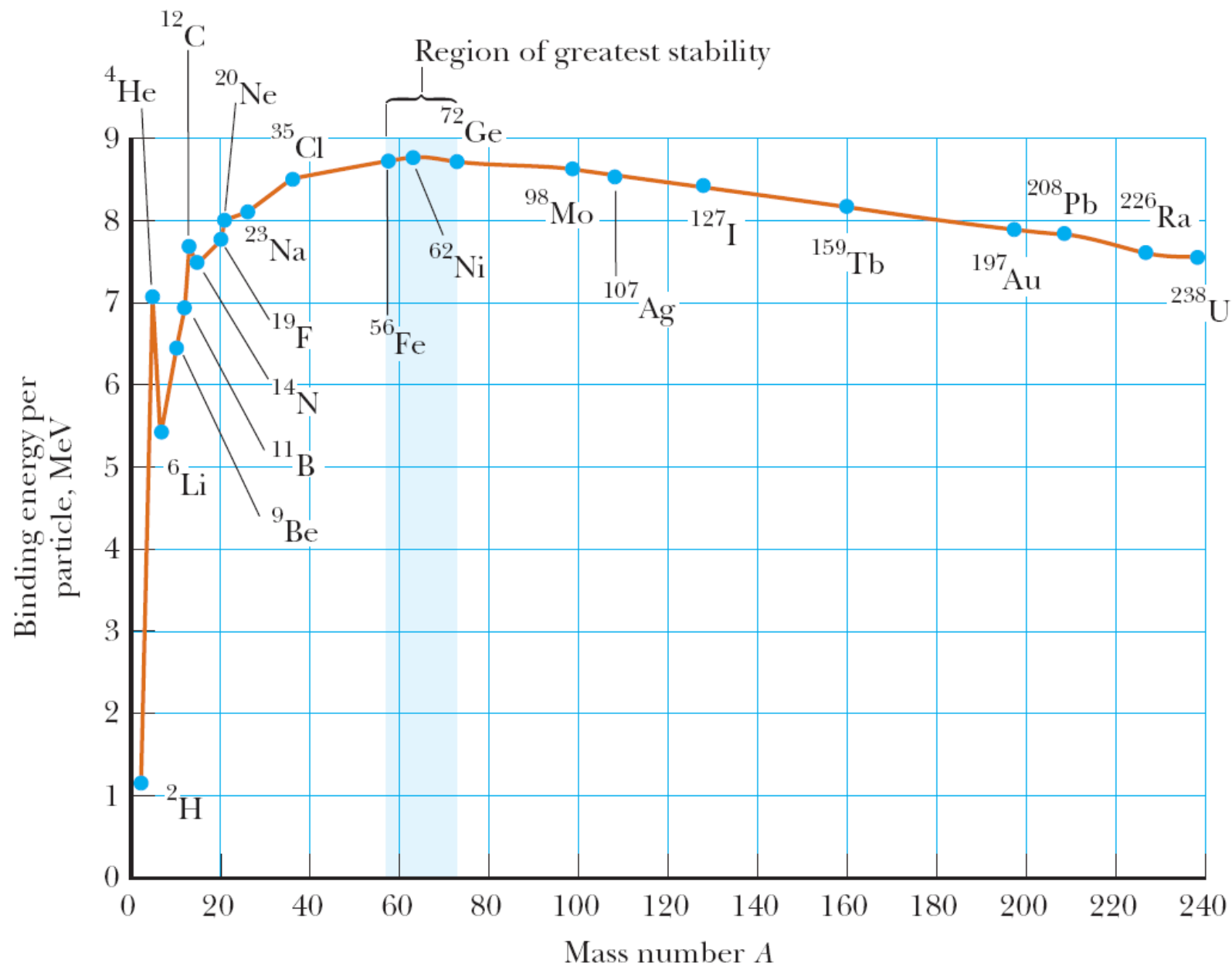
$$Li^6(d,\alpha)He^4 \quad (22.4 \text{ MeV})$$

$$Li^7(p,\alpha)He^4 \quad (17.3 \text{ MeV})$$

Deuterium-Tritium Fusion Reaction

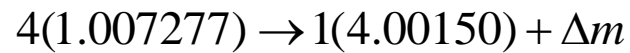
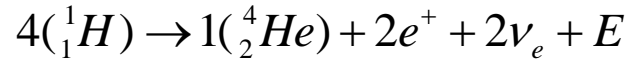


**ENERGY MULTIPLICATION
About 450:1**



Energija veze

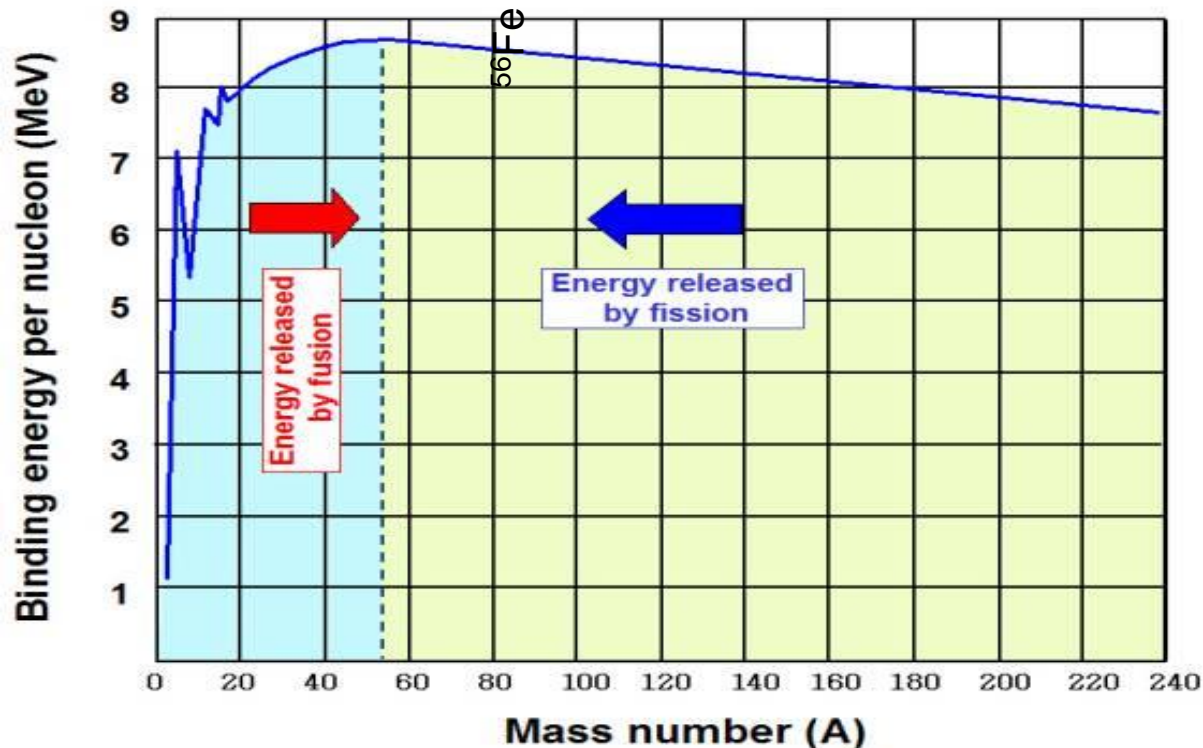
Kada se četiri protona udruže da formiraju jezgro ${}^4\text{He}$:



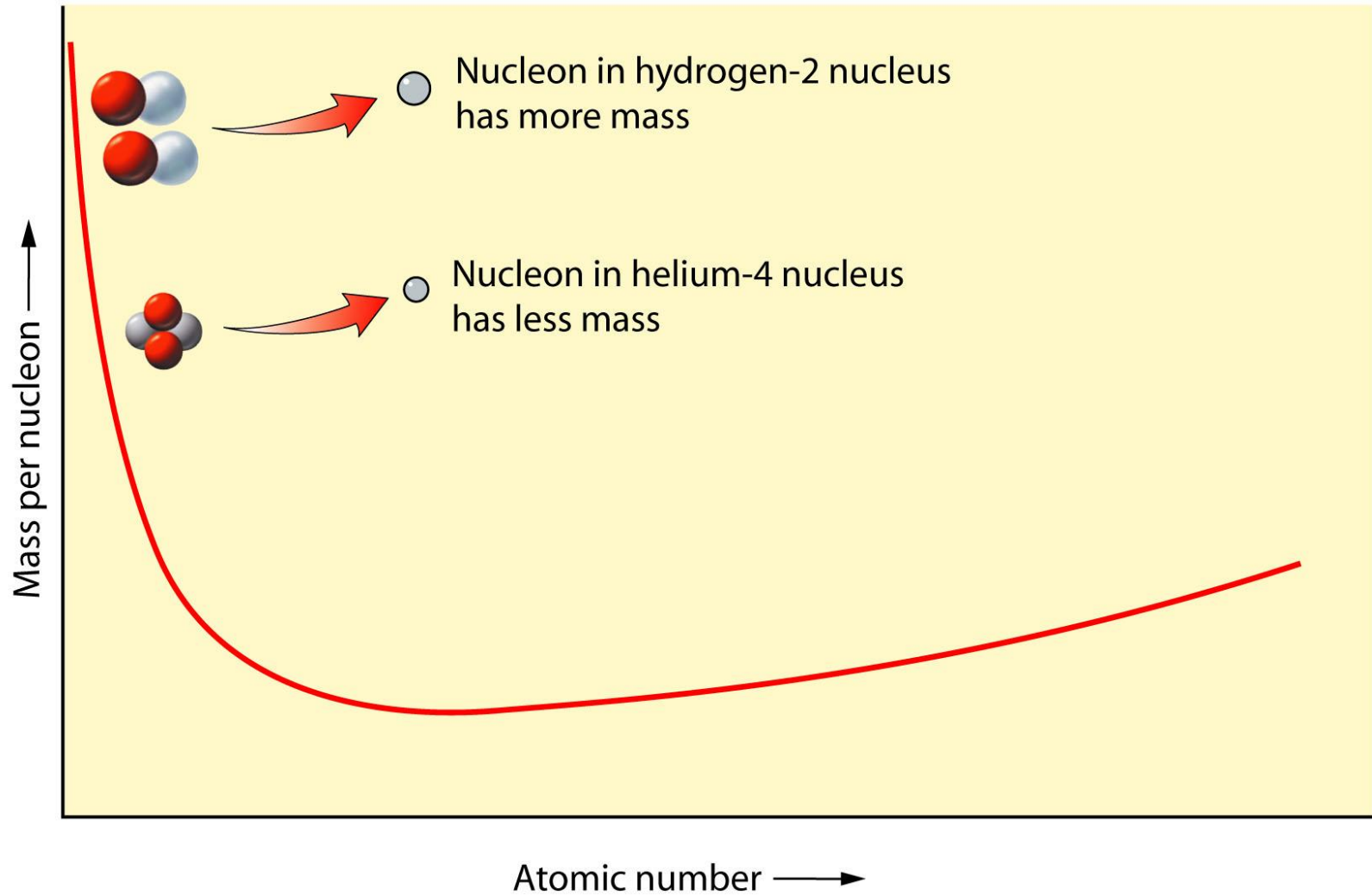
**nastaje defekt mase*

$$\Delta m = 0.02761\text{amu}$$

Defekt mase predstavlja ogromni iznos energije koji se računa po Ajnštajnovoj relaciji, $E=mc^2$, i obično se izražava u Mev-ima



Defekt mase po nukleonu



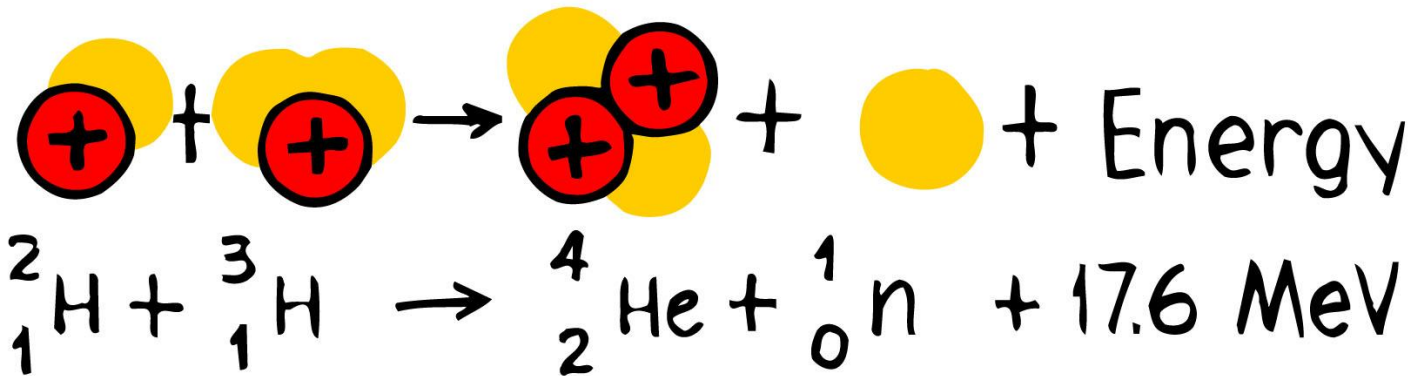
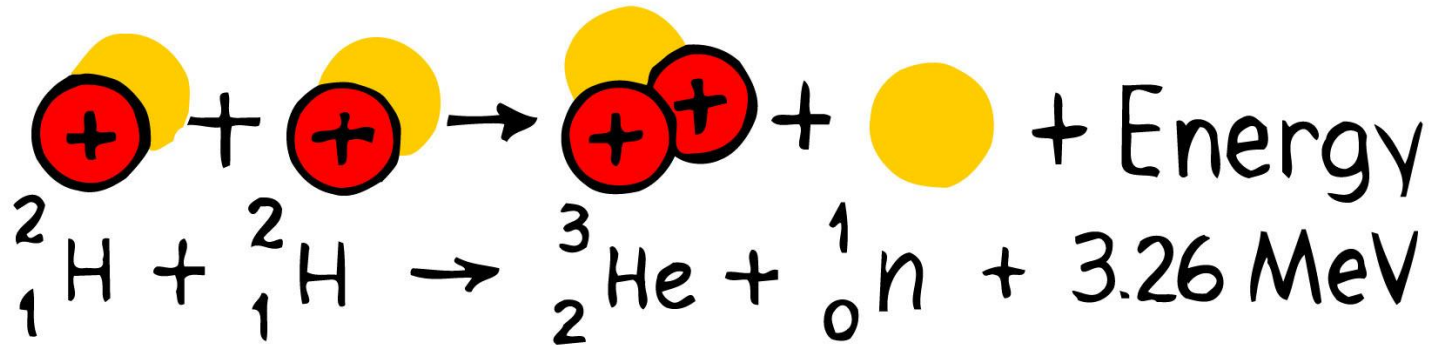
Malo istorije o fuziji

- 1934. god. Cockroft i Walton prvi put demonstrirali oslobađanje energije fuzije
- 1936. god. Lord Rutherford prevideo nuklearnu reakciju fuzije između deuterijuma i tricijuma
- 1950 – ih god. hidrogenska bomba

Reakcije fuzije

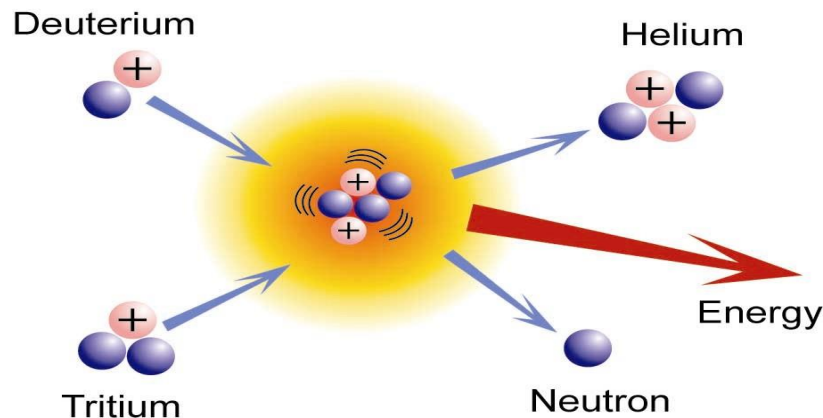
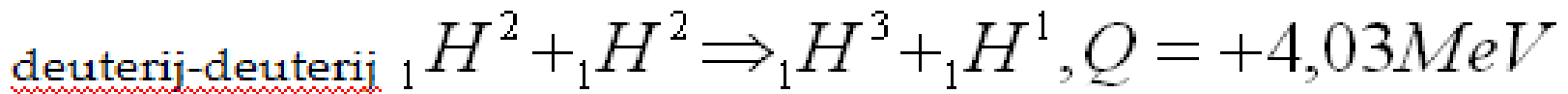
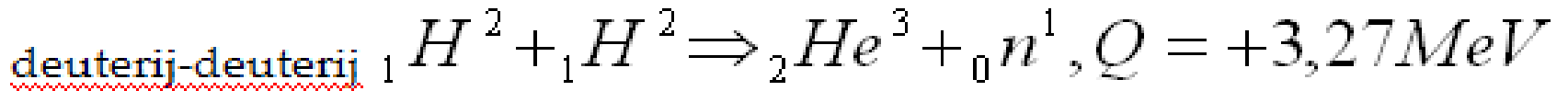
- ${}_1\text{H}^2 + {}_1\text{H}^2 \Rightarrow {}_1\text{H}^3 + {}_0\text{n}^1 + 3,27\text{MeV}$
 - ${}_1\text{H}^2 + {}_1\text{H}^2 \Rightarrow {}_1\text{H}^3 + {}_1\text{H}^1 + 4,03\text{MeV}$
 - ${}_1\text{H}^1 + {}_1\text{H}^2 \Rightarrow {}_1\text{H}^3 + 5,5\text{MeV}$
- Deuterijum, koji je osnovna sirovina za većinu nuklearnih reakcija fuzije, ima neograničen sirovinski potencijal jer ga ima u izobilju, jedan molekul deuterijuma na 6500 molekula obične vode.

Nuklearne reakcije fuzije



Fuzione reakcije

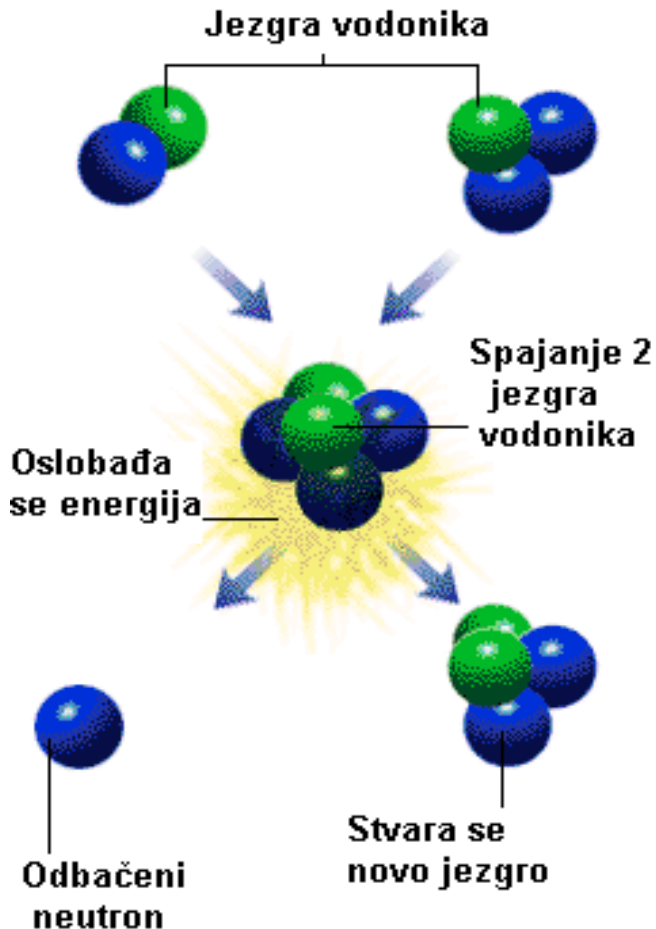
Na Zemlji, u laboratorijskim uslovima, su ostvarive fuzione reakcije tipa:



D-T fuziona
reakcija

Opšte o fuziji

- ✓ Nuklearna fuzija lakših elemenata oslobađa energiju koja uzrokuje sjaj zvijezda i eksploziju hidrogenske bombe.
- ✓ Energija koja se oslobađa u većini nuklearnih reakcija je mnogo veća od energije hemijskih reakcija.

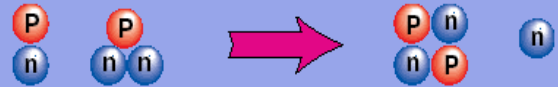

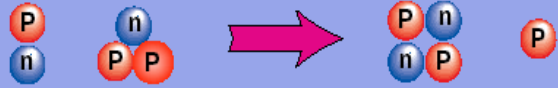

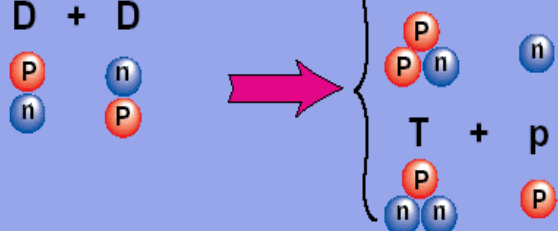




D-T fuziona reakcija smatra se najboljom reakcijom za dobijanje fuzione energije.

Opšte o fuziji

- ✓ Kad se dva lakša jezgra spoje u teže jezgro oslobađa se energija.
- ✓ Problem je kako jezgrama dati dovoljno kinetičke energije da savladaju odbojnu električnu silu.
- ✓ U unutrašnjosti Sunca temperatura je oko $1,5 \times 10^7 \text{ K}$, te je srednja kinetička energija na ovoj temperaturi dovoljna da nadvlada odbojnu nuklearnu silu - termonuklearna fuzijska reakcija. Snaga Sunca je $4 \times 10^{26} \text{ W}$.

Uslovi za fuziju

Reaction		Ignition Temperature		Output Energy
Fuel	Product	(millions of °C)	(keV)	(keV)
$D + T$ 	$4\text{He} + n$	45	4	 17,600
$D + {}^3\text{He}$ 	$4\text{He} + p$	350	30	 18,300
$D + D$ 	${}^3\text{He} + n$	400	35	 ~4,000
	$T + p$	400	35	 ~4,000

Reakcije od interesa za ostvarivanje kontrolirane fuzije zajedno s potrebnom početnom temperaturom i iznosom dobivene energije

Uslovi za fuziju

- Praktični problemi:
 - vrlo visoke temperature > 100 miliona K
 - svi materijali prelaze u stanje plazme
 - puno energije za zagrevanje goriva
 - zbog neutrona materijal reaktora postaje radioaktivan

Uslovi za fuziju

- ❑ **Visoka temperatura** $\sim 10^8$ K
 - nužna radi savladavanja Coulombove odbojne sile između pozitivnih jezgara.
 - na ovim temperaturama, svi atomi su ionizovani, sistem se sastoji od jezgara i elektrona – plazma.
- ❑ **Gustina jona plazme, n**
 - broj jona u plazmi mora biti visok kako bi što češće dolazilo do sudara jona (veća gustina jona - veći broj pokušaja fuzije), $n=2-3 \times 10^{20}$ jona/m³.
- ❑ **Plazma “confinement time”, τ**
 - Vremenski interval unutar kojeg su joni plazme na temperaturi koja osigurava fuziju, $\tau=1,2$ s.

Uslovi za fuziju:

- 1) Velika gustina čestica, npr. deuterijuma da bi se obezbedila velika verovatnoća sudaranja čestica reakcije tipa:
 - ${}_1\text{H}^1 + {}_1\text{H}^2 \Rightarrow {}_1\text{H}^3 + 5,5\text{MeV}$
- 2) Visoka temperatura plazme T
 - kT – kinetička temperatura
 - Kinetička temperatura Sunca je 1,3MeV-a ili $1,5 \times 10^7\text{K}$
 - Kinetička temperatura fuzione plazme koja se već ostvaruje u laboratorijama je 6,5MeV-a tj. $7,5 \times 10^7\text{K}$.
- 3) Dovoljno dugo vrijeme „konfiniranja“ τ : do sada postignuto je reda veličine 100ms.
- Lawsonov kriterij: $n\tau \geq 10^{20}\text{s/m}^3$

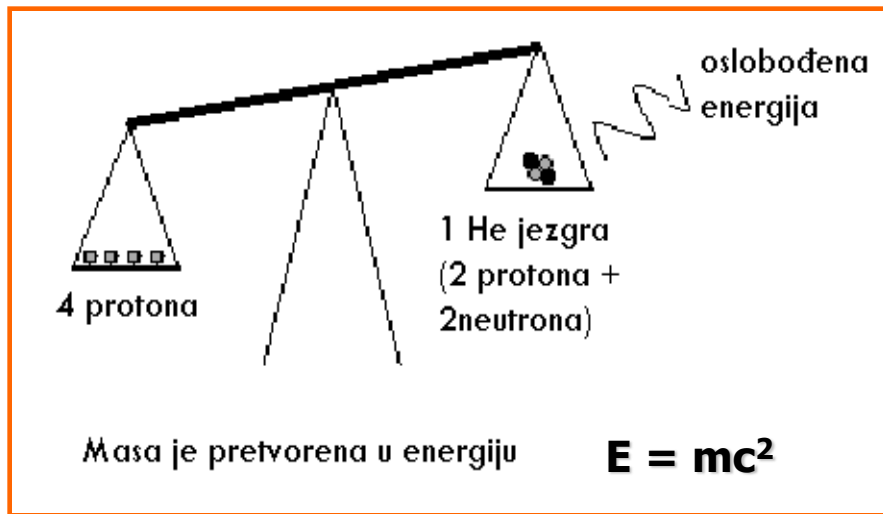
H – bomba (termonuklearna bomba)

- hiljadu puta jača od atomske (fisione) bombe
- zemlje koje posjeduju H – bombu:
SAD, Rusija, Francuska, Ujedinjeno Kraljevstvo, Kina i Indija
- atomska bomba kao upaljač H - bombe

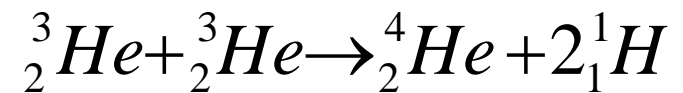
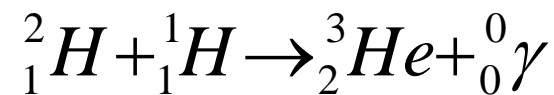
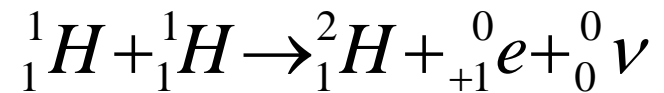
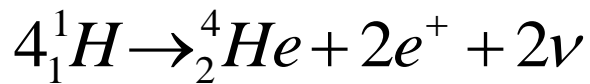
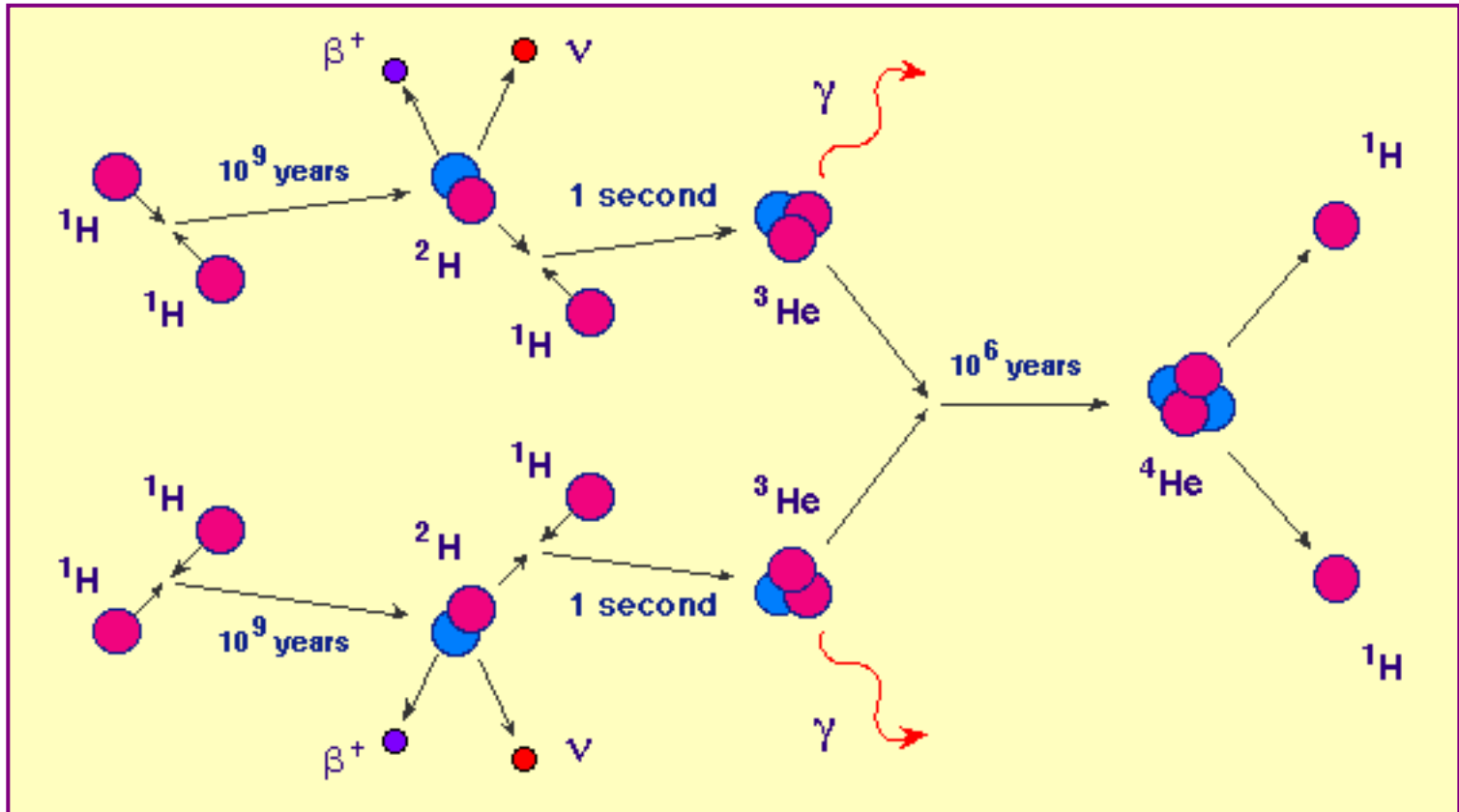


Izvor energije na Suncu

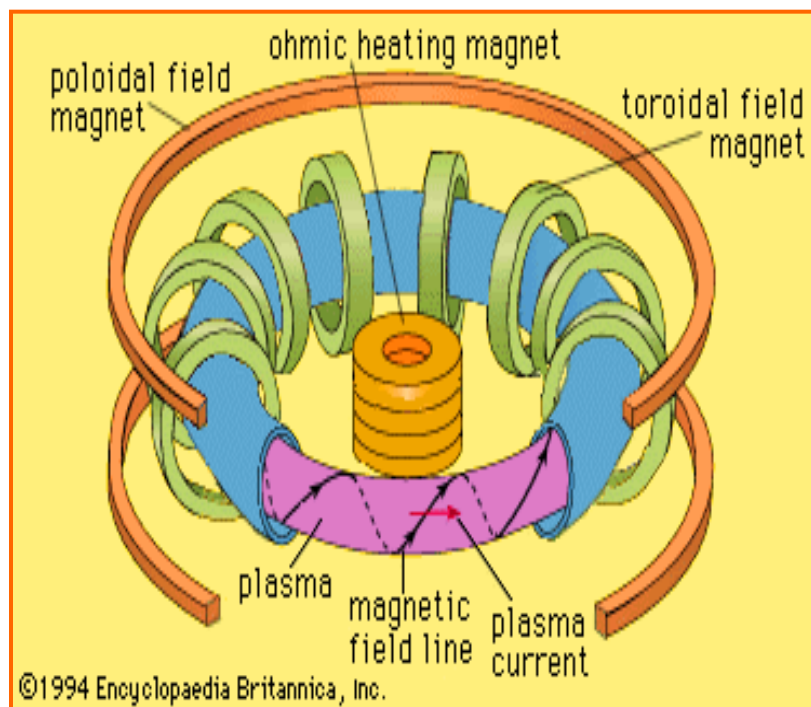
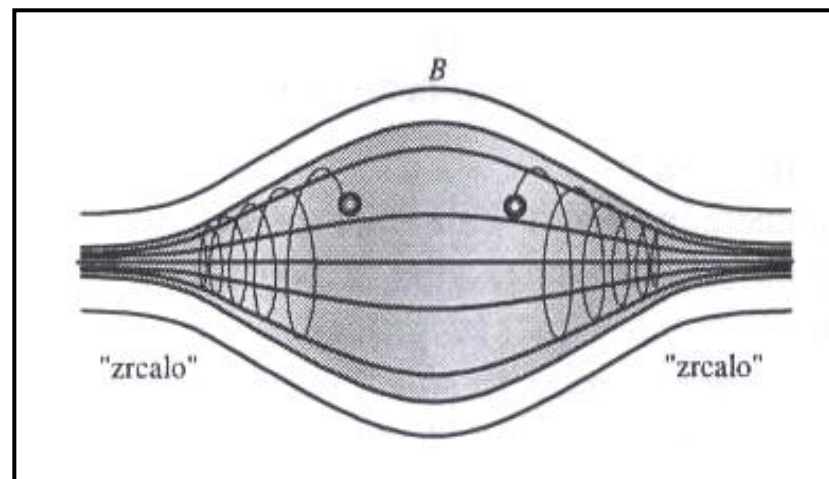
- energija Sunca je fuzionog porijekla
- temperatura Sunca: - površina 6000 K
- unutrašnjost $1.5 \cdot 10^7$ K
- spajanje 4 protona u α česticu uz oslobađanje energije



Nastajanje helijuma u Suncu



- **Magnetna boca** – magnetno polje u obliku boce, čestice se kreću spiralno i ne mogu “pobjeći”



- **Tokamak** – magnetno polje oblika torusa, sastoji se od dva magnetna polja koja daju rezultatno polje u kojem se kreće plazma

Primjer – fuzija (Coulombova barijera)

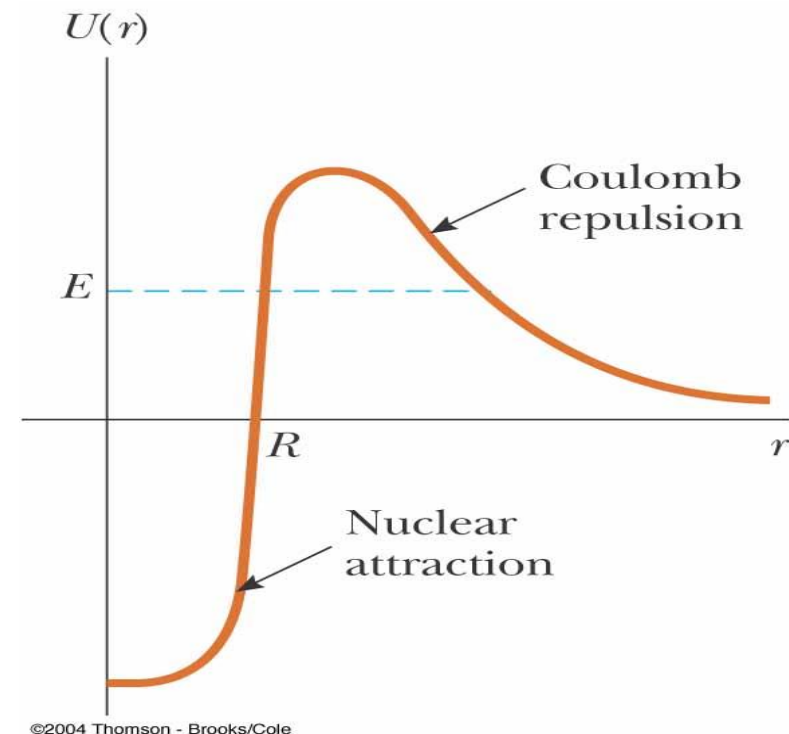
• Pretpostavimo da je proton sfera radijusa $R=1$ fm. Dva protona iste kinetičke energije lete jedan prema drugom.

a.) Kolika mora biti kinetička energija protona da bi nadvladala odbojnu Columbovu silu baš kad se protoni dodiruju.

$$2E_k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{2R} \quad E_k = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{16\pi(8,85 \cdot 10^{12} \text{ F/m})(1 \cdot 10^{-15} \text{ m})}$$
$$= 5,75 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 360 \text{ keV} \approx 400 \text{ keV}$$

b.) Kolika bi trebala biti temperatura plina protona (vodika) da bi srednja kinetička energija protona bila dovoljna da nadvlada Coulombovu barijeru kako bi došlo do fuzije.

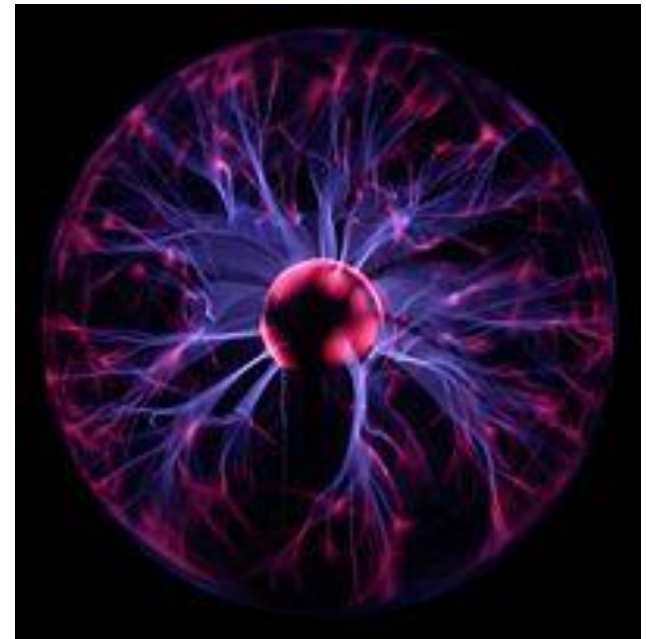
$$E_k = \frac{3}{2} kT \rightarrow T = \frac{2E_k}{3k} = \frac{2(5,75 \cdot 10^{-14} \text{ J})}{3(1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K})} = 3 \cdot 10^9 \text{ K}$$



Temperatura na Suncu je $1,5 \times 10^7$ K, tako da samo jedan od 10^{26} sudara protona rezultira fuzijom ($p+p \rightarrow d+e^++\nu$) $Q=0.42$ MeV

Četvrto agregatno stanje-PLAZMA

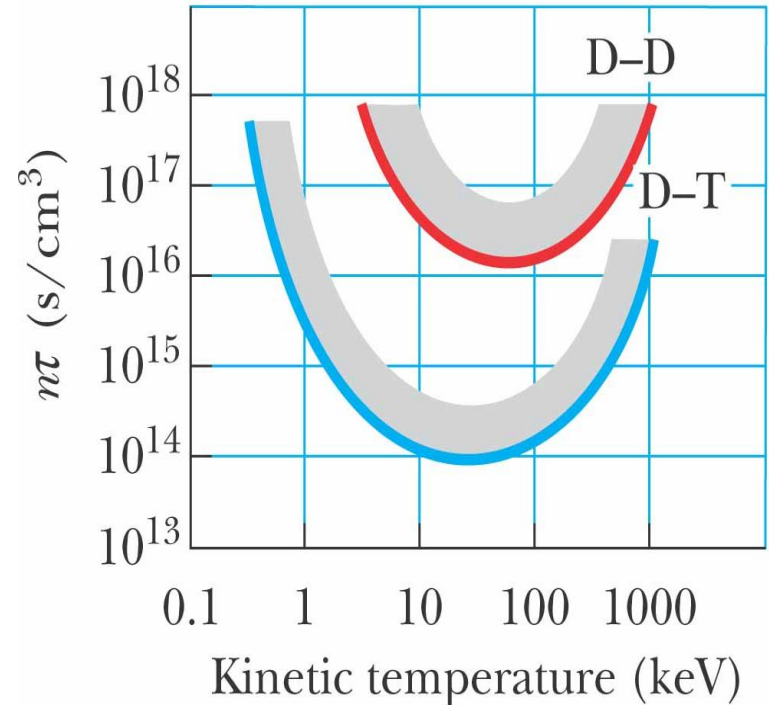
- Plazma je visoko ionizirani plin u kojem je naboj elektrona uravnotežen s nabojem pozitivnih iona.
- Temperatura plazme može dosegnuti od 10 000 °C do 15 000 °C.
- 99% vidljivog Svemira je u obliku plazme.



Plazmena lampa

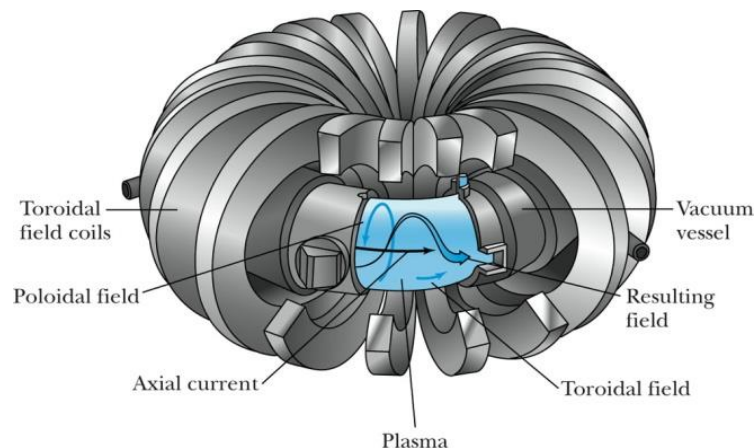
Lawsonov kriterij

- J. D. Lawson je pokazao da gustoća iona (n) i vremenski interval unutar kojeg je plazma na temperaturi koja osigurava fuziju τ (confinement time) moraju biti dovoljno veliki da osiguraju više energije proizvedene fuzijom nego što se utroši na zagrijavanje plazme.
- Lawson's kriterij glasi: *neto izlazna snaga u fuzijskom reaktoru je moguća ako su ispunjeni sljedeći uslovi:*
 - $n\tau \geq 10^{14} \text{ s/cm}^3$ za deuterij-tricij (D-T)
 - $n\tau \geq 10^{16} \text{ s/cm}^3$ za deuterij-deuterija (D-D)
 - ❖ Ovo su minimumi u krivulji koja prikazuje Lawsonov $n\tau$ broj u zavisnosti od temperature za D-T i D-D fuzijsku reakciju.



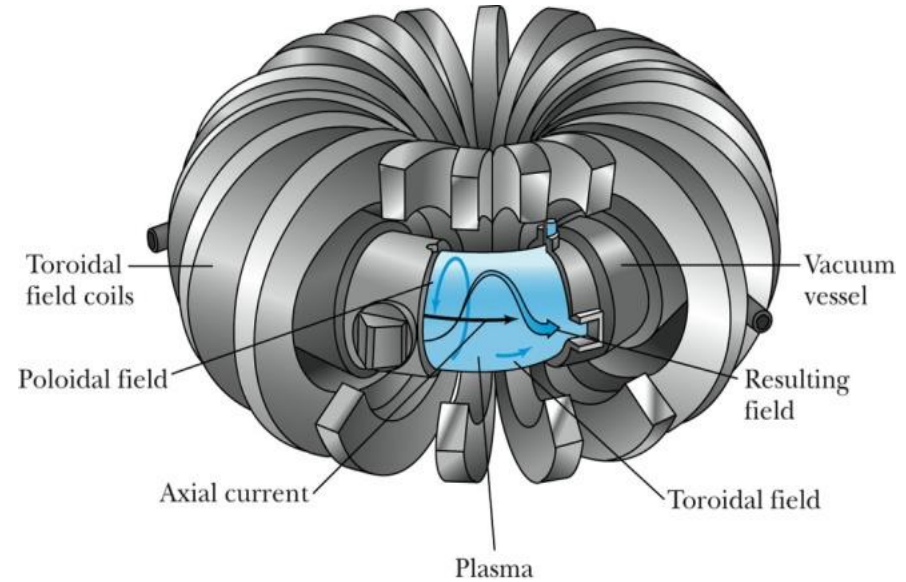
Problem “confinement-a”

- U čemu “držati” plazmu na visokoj gustoći i temperaturi od 100 miliona K za vrijeme od 1 sekunde.
- Dvije se tehnike koriste:
 - magnetski “confinement”
 - inercijalni “confinement”
- Tokamak – toroidalni uređaj
- prvo napravljen u Rusiji,
- kombinacijom dva magnetska
- polja prostorno ograničava i stabilizira plazmu.
- Inercijalni “confinement” – temelji se na ideji da se Lawsonov kriterij ostvari kombinacijom jako visoke gustoće iona a kratkog vremena “confinementa” oko 10^{-11} do 10^{-9} sekundi, pa se za tako kratko vrijeme ioni ne pomaknu znatnije od svog početnog položaja.



Problem “confinement-a”

- U čemu “držati” plazmu na visokoj gustoći i temperaturi od 100 miliona K za vrijeme od 1 sekunde.
- Dvije se tehnike koriste:
 - magnetski “confinement”
 - inercijalni “confinement”
- Tokamak – toroidalni uređaj prvo napravljen u Rusiji, kombinacijom dva magnetska polja prostorno ograničava i stabilizira plazmu.



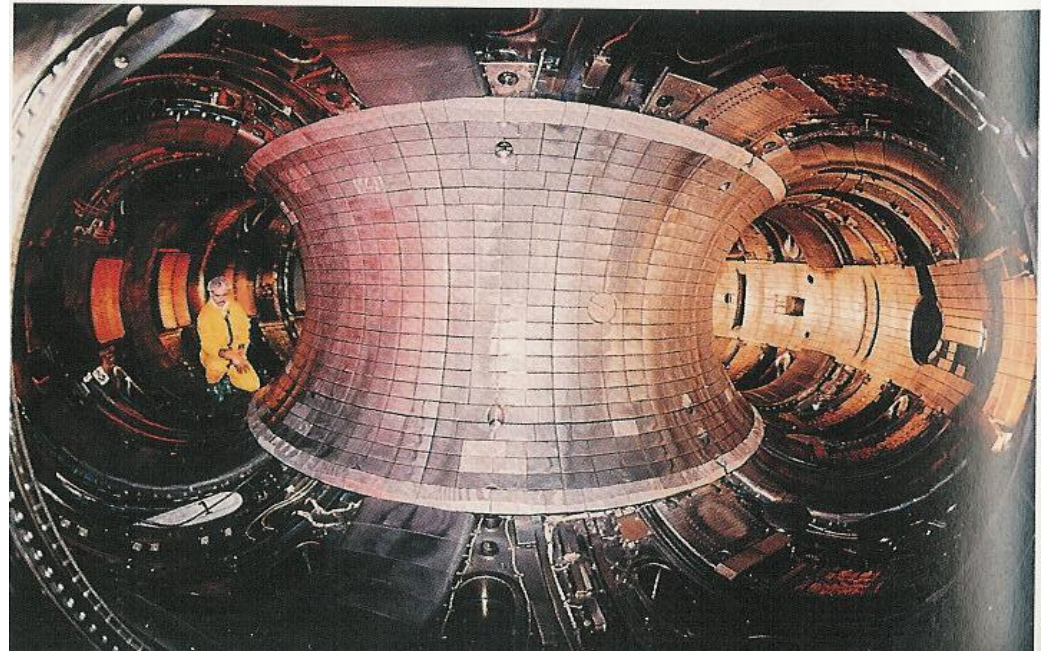
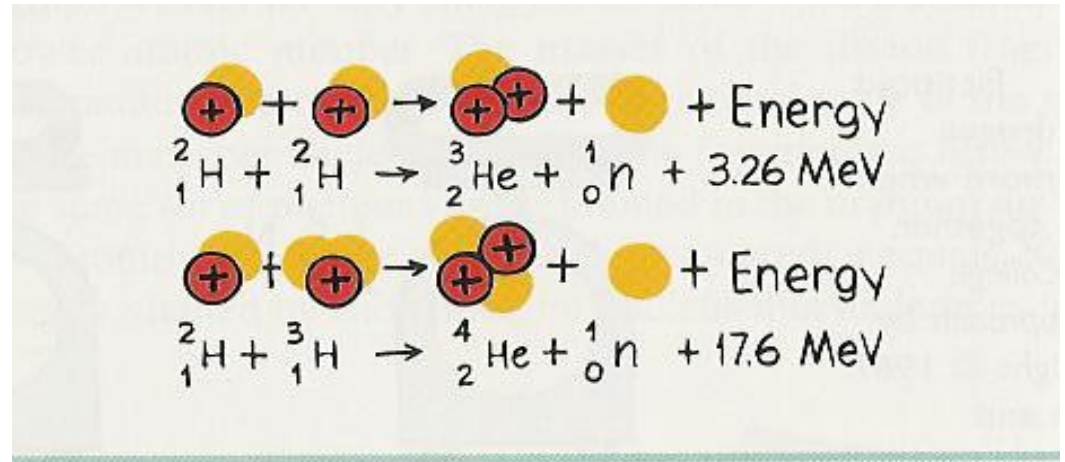
Inercijalni “confinement” – temelji se na ideji da se Lawsonov kriterij ostvari kombinacijom jako visoke gustoće iona a kratkog vremena “confinementa” oko 10^{-11} do 10^{-9} sekundi, pa se za tako kratko vrijeme ioni ne pomaknu znatnije od svog početnog položaja.

Fizikalne osnove fuzije

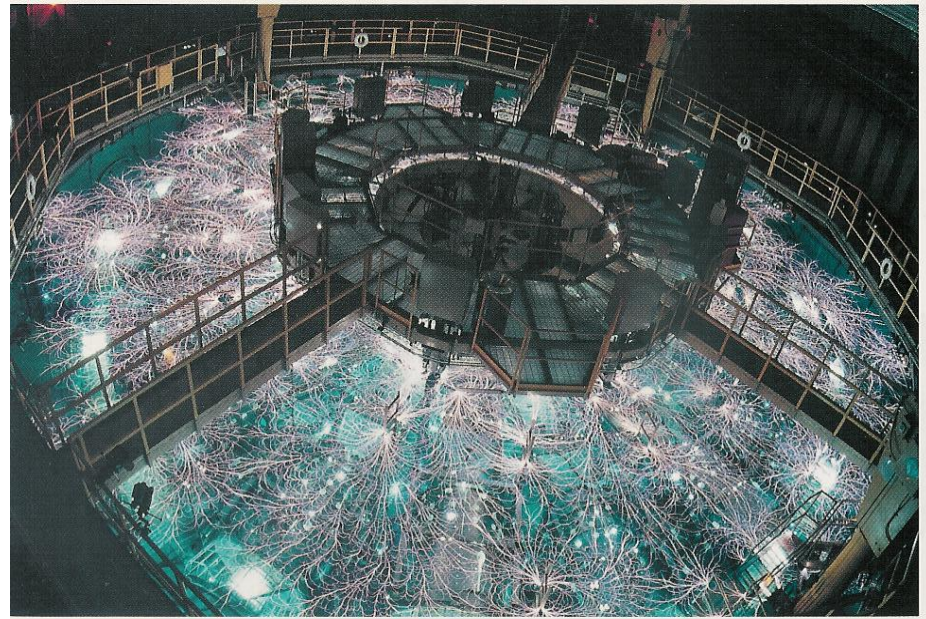
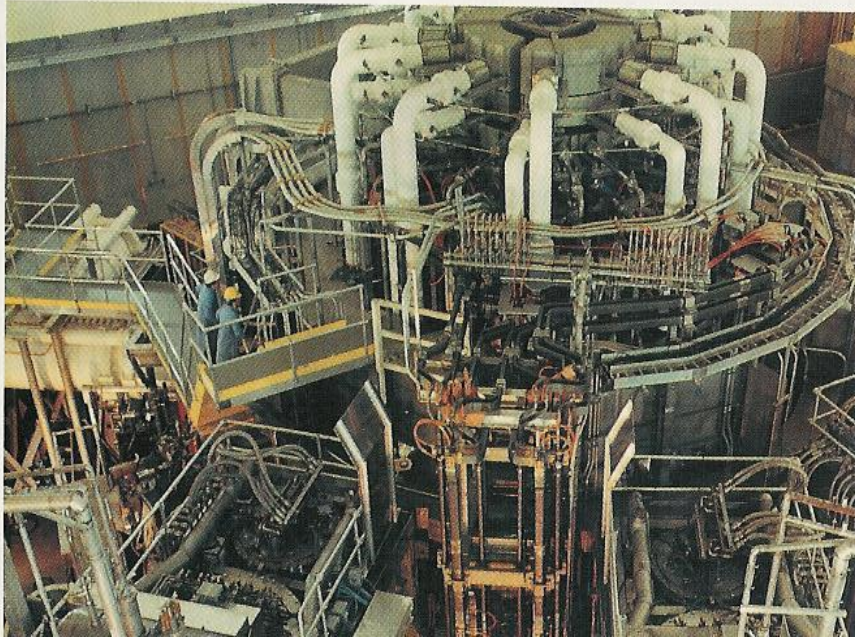
- PRITISAK PLAZME
- Zvijezde - plazmu na okupu drže snažne gravitacione sile
 - 1) fuzionii uređaji s magnetnim ograničenjem plazme
 - 2) fuzioni uređaji s inercijalnim ograničenjem plazme

Nuklearna fuzija

- Principi nuklearne fuzije su jasni.
- Tehnički i tehnološki problemi su za sada još nerješivi.
- Slika dole: Unutrašnjost Tokamak Fuzionog Test Reaktora (TFTR) u Princeton Plazma fizikalnoj laboratoriji



Nuklearna fuzija – tehnički problemi

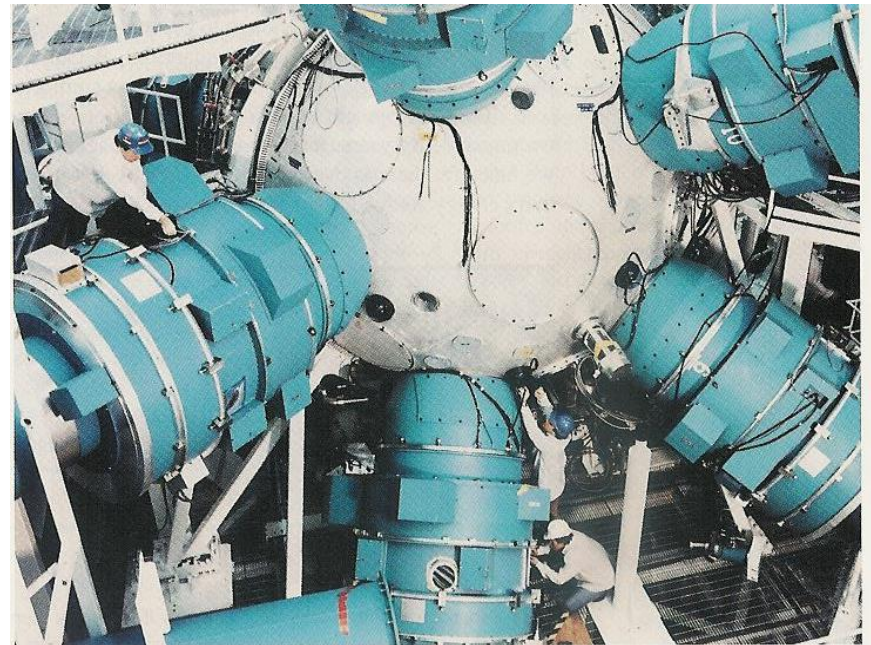
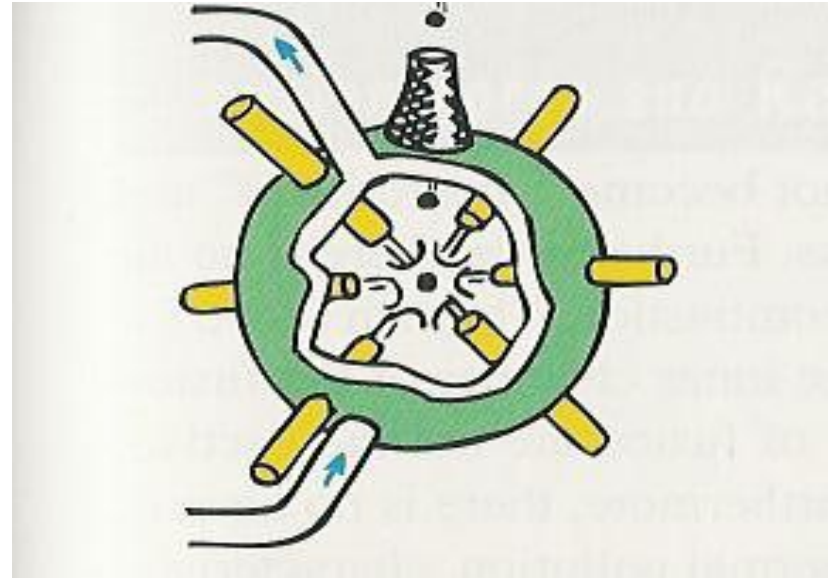


Fuel pellets are bombarded with ions in the Particle Beam Fusion Accelerator II at

- Tokamak Fuzionog Test Reaktora (TFTR) u Princeton Plazma fizikalnoj laboratoriji i
- Fuzioni akcelerator u Sandia Laboratoriji
- Uslovi potrebni za fuziju je velika koncentracija fuzionih elemenata, visoka temperatura i velika gustoća

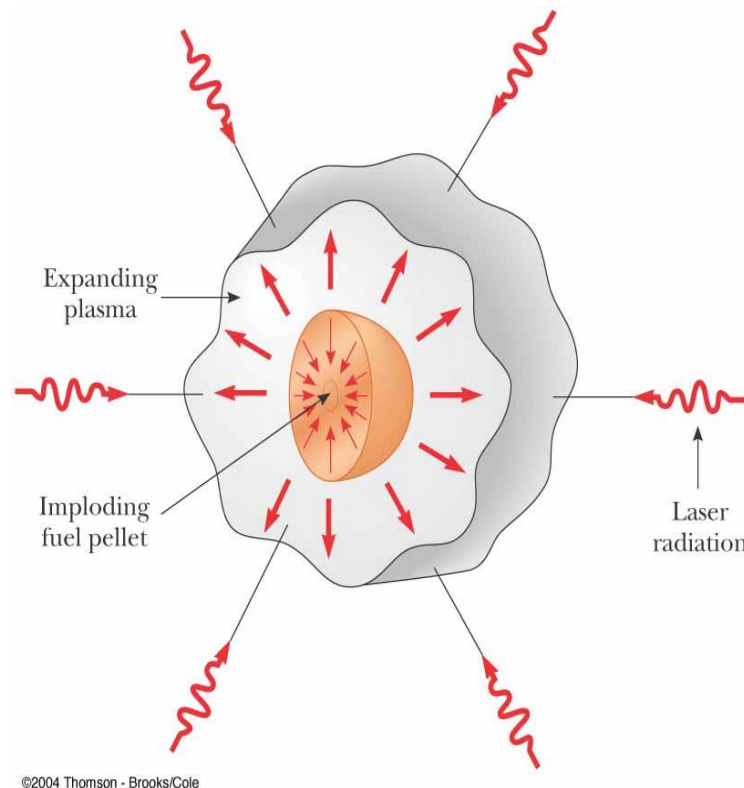
Nuklearna fuzija – tehnički problemi

- Fuzija sa više laserskih snopova
- Paleta smrznutog deuterijuma se bombarduju unakrsnom vatrom iz više lasera.
- Izgled komore u Livermore nacionalnoj laboratoriji



Fuzija laserom

- Laser se najčešće koristi u tehnici inercijalnog “confinementa”
- Mala D-T kapsula (1mm u promjeru) se istovremeno pogodi fokusiranim laserskim svjetlom visokog intenziteta.
- Sloj kapsule oko D-T je neproziran pa apsorbira svjetlo, zagrije se i eksplodira prema van brzinom od 1000 km/s.
- Po trećem Newtonovu zakonu izlazne čestice uzrokuju snažni kompresijski udarni val na jezgru kapsule.
- Za vrijeme od 1 ns izvrši se kompresija brzinom 100 km/s pri čemu se smanji radijus za ~ 50 puta.
- Kompresijski udarni val povećava pritisak i temperaturu i stvara uvjete za pojavu fuzije.
- Problem što se sva laserska energija ne utroši na kompresiju, veliki dio energije preuzimaju elektroni koji svojim bijegom odnose energiju namijenjenu fuziji.



**Minijaturne eksplozije
hidrogenske bombe**

Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

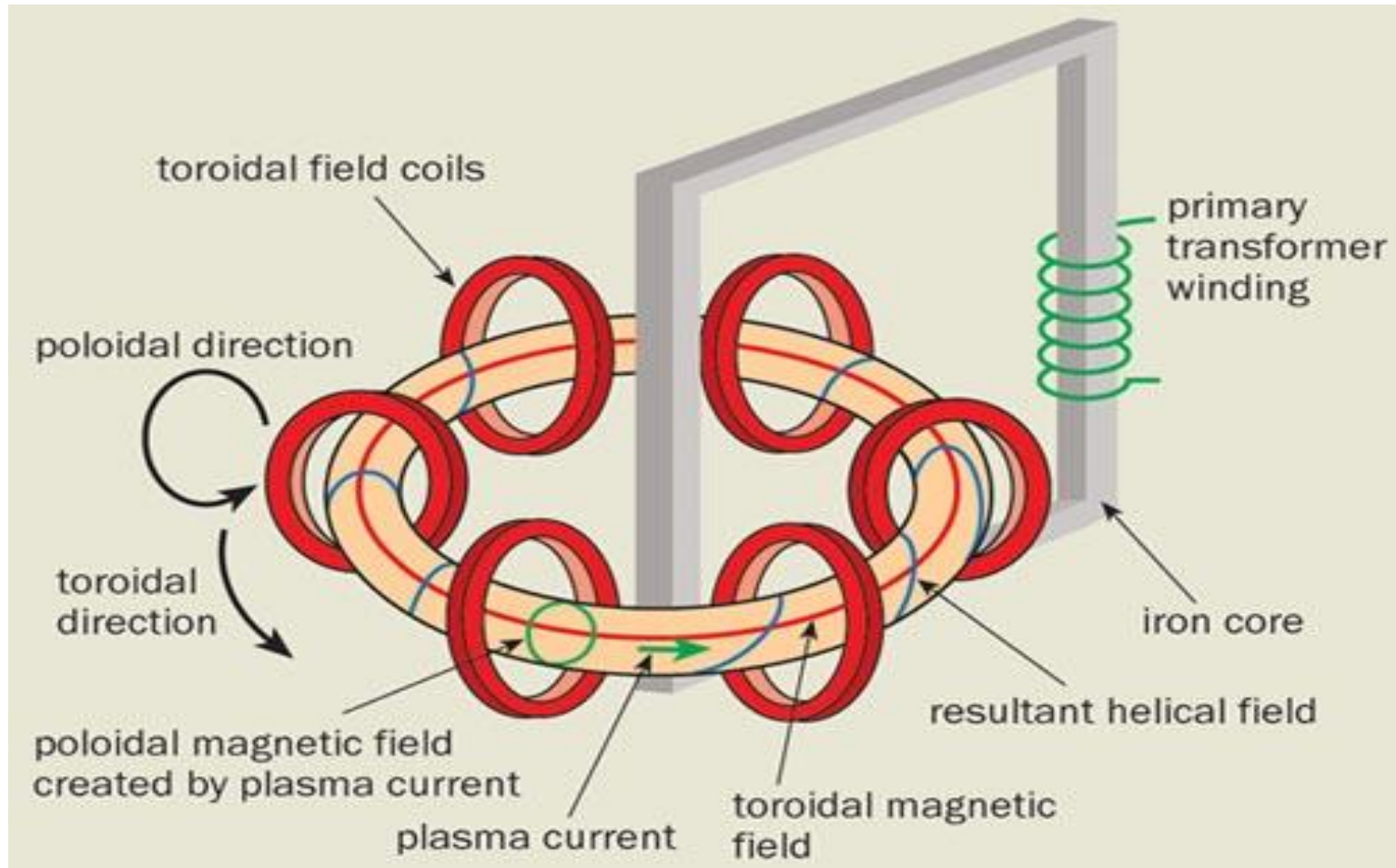
- Plazma – provodi elektricitet
 - Ako je stavimo u magnetno polje, u njoj će se inducirati struja koja će nastojati poništiti vanjsko magnetno polje (potisnuti ga van iz plazme).
 - Magnetne silnice obilaze plazmu i pritom polje vrši pritisak, koji nastoji ograničiti širenje plazme.

Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- Princip rada tokamaka
 - zasniva se na postojanju izmjeničnog magnetnog polja koje inducira kružnu struju kroz plazmu (plazma se ponaša kao sekundar transformatora), a magnetno polje te struje obuhvata i komprimira plazmu (i tok struje i prateća kompresija griju plazmu)

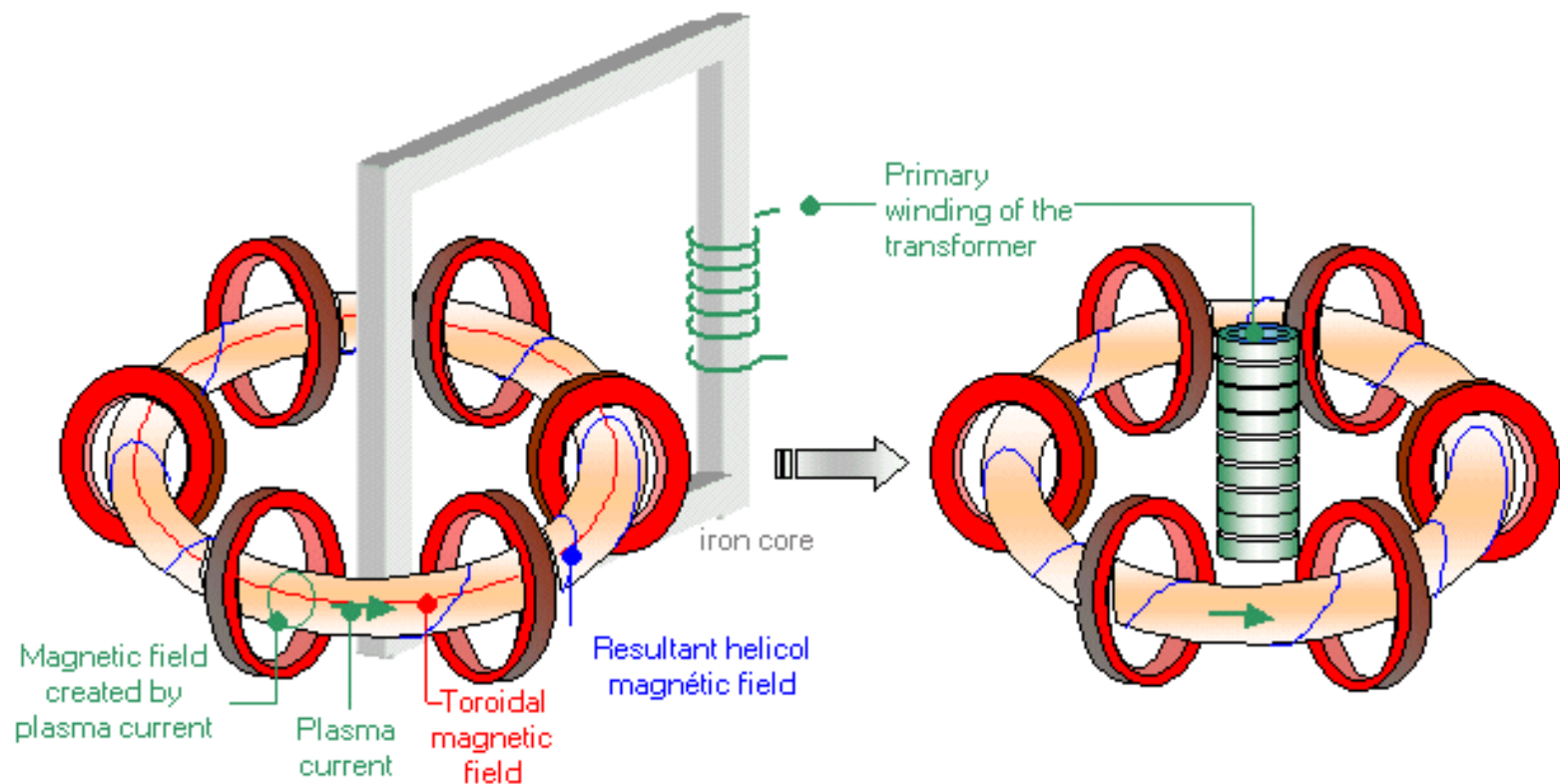
Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- Princip rada tokamaka



Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

○ Princip rada tokamaka

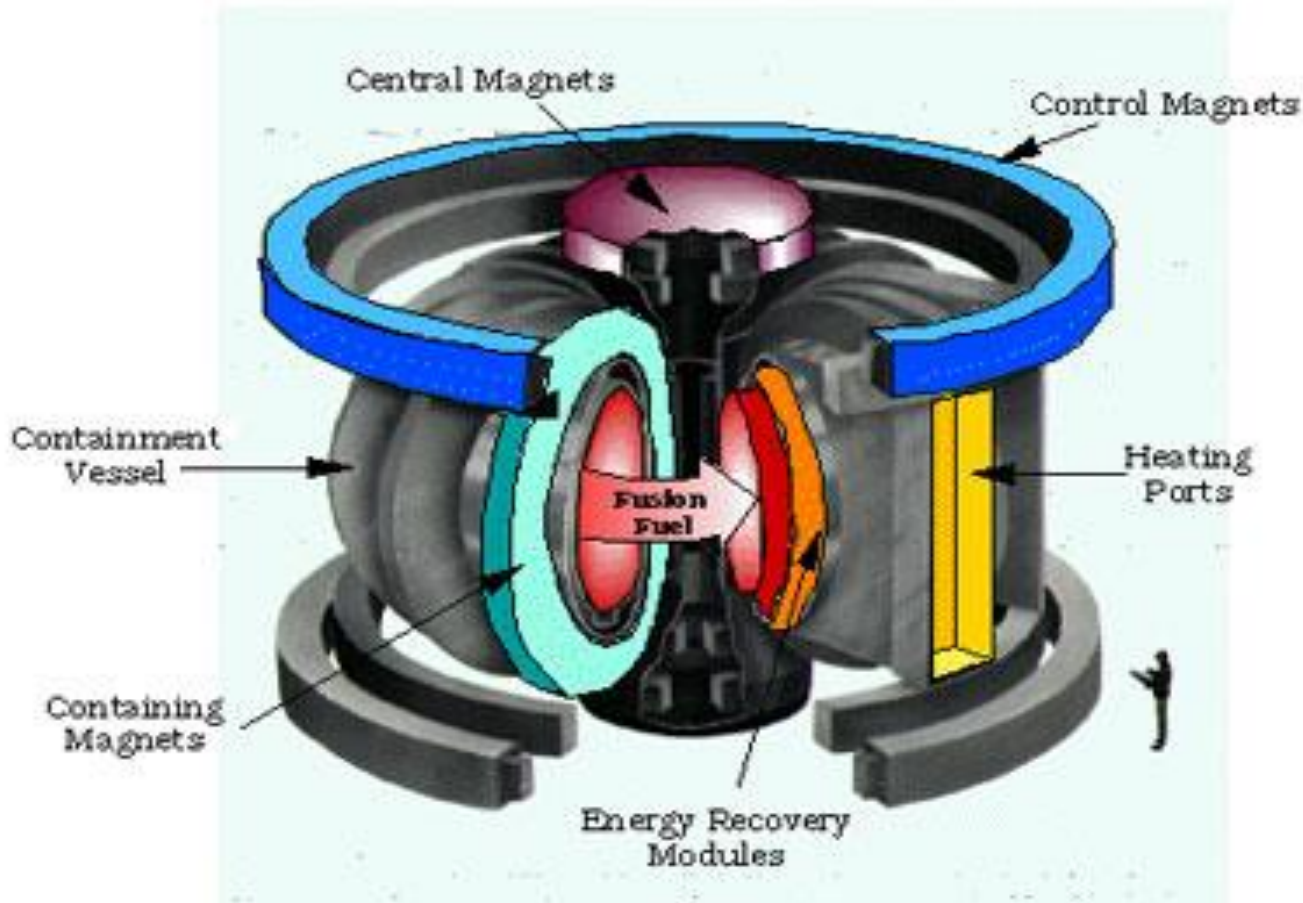


⑦ Tokamak with an iron core

⑧ Tokamak without iron core

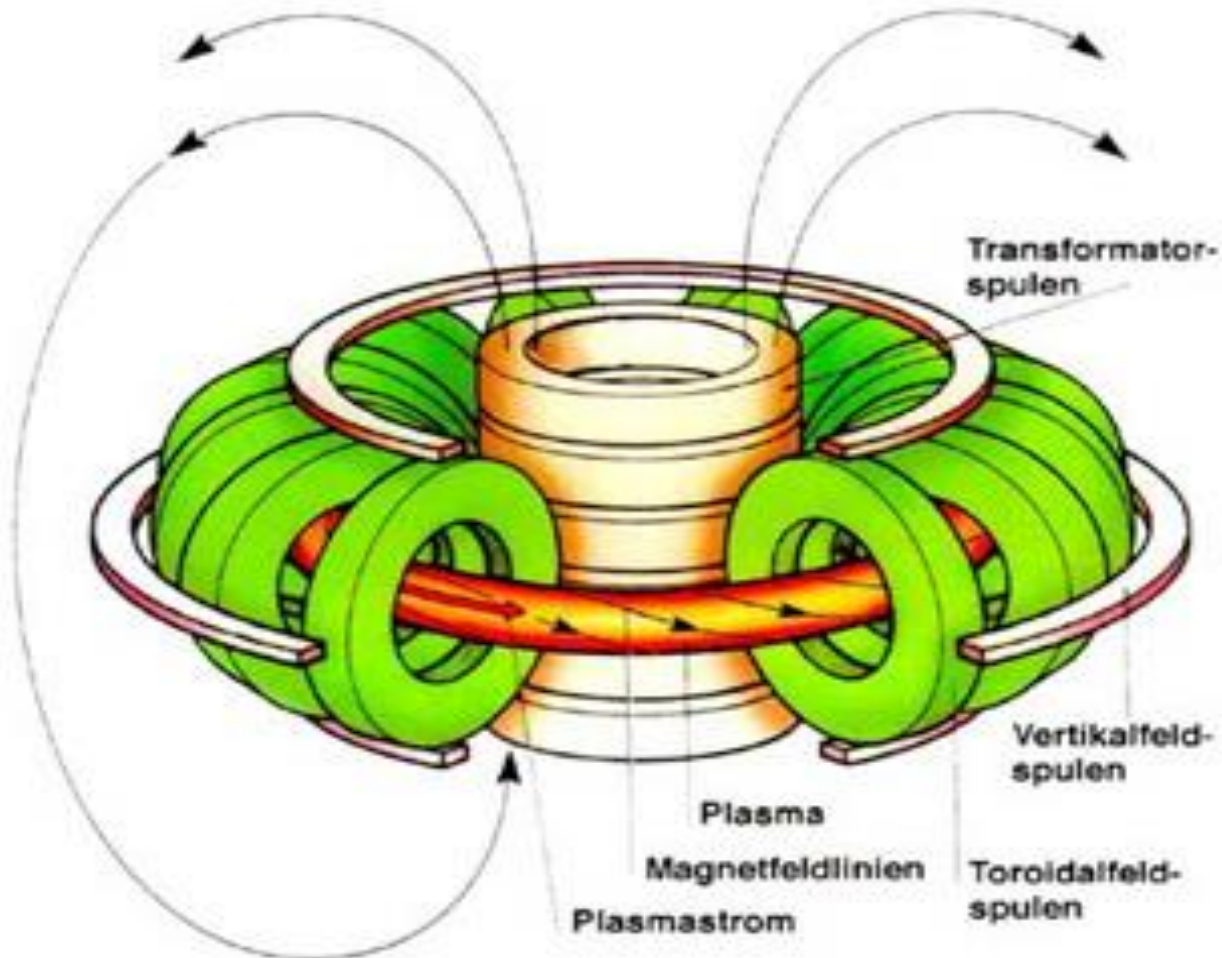
Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- TOKAMAK



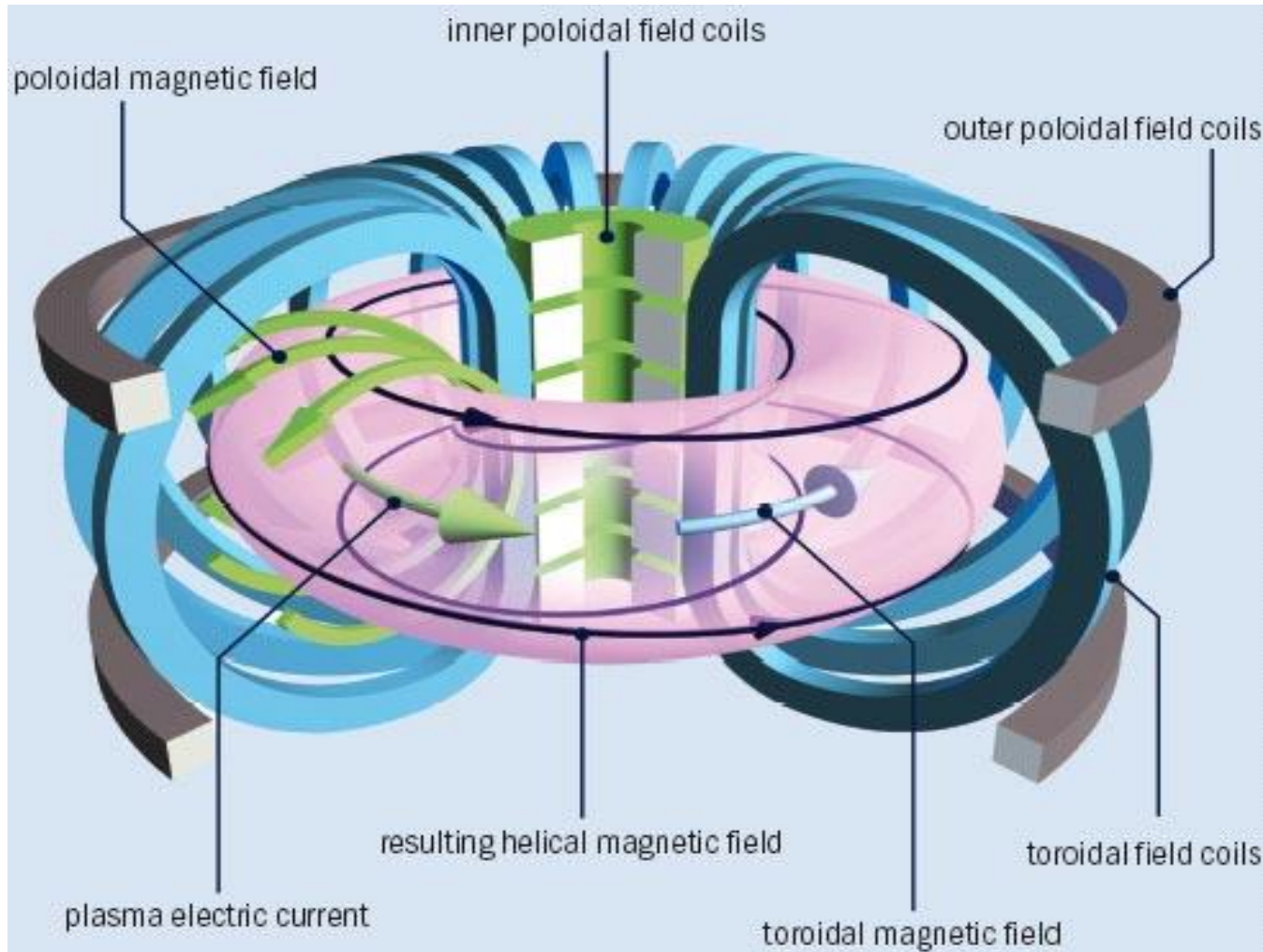
Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- TOKAMAK



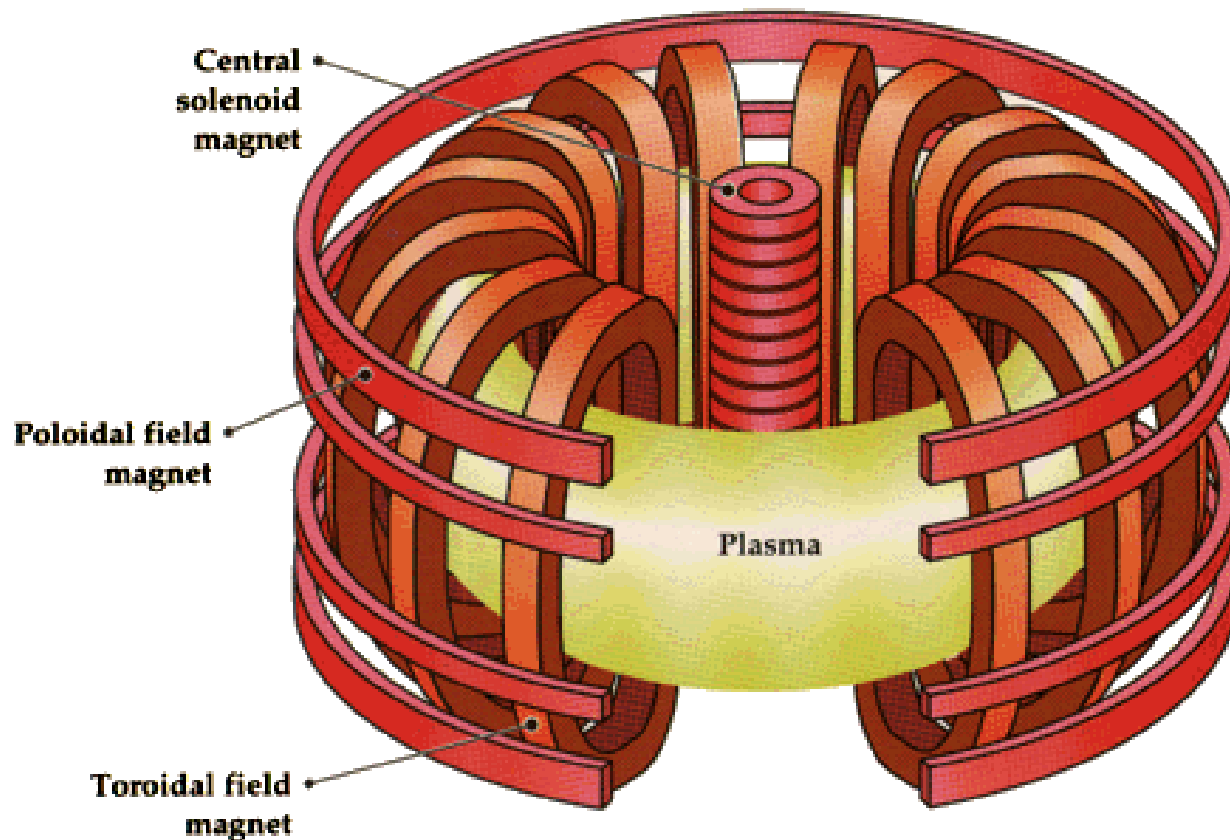
Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- TOKAMAK



Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- TOKAMAK

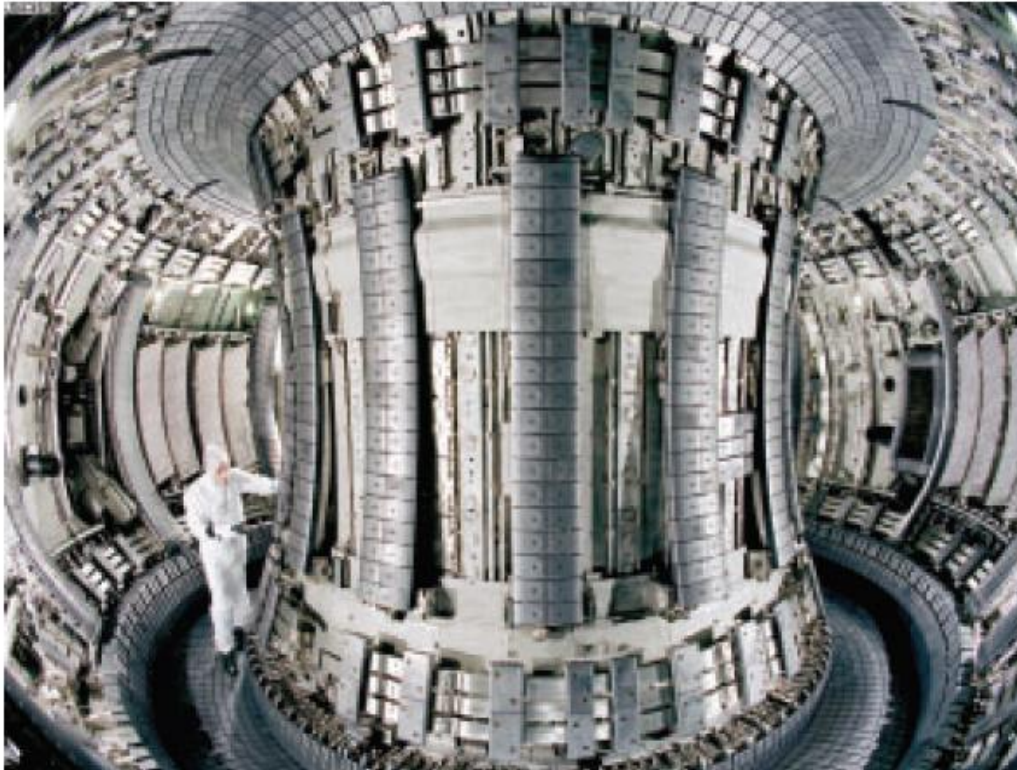


Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- Princip rada tokamaka
 - TEHNOLOŠKI PROBLEMI
 - problemi vezani za:
 - mogućnost proizvodnje dovoljno snažnih magn.polja
 - dinamičku stabilnost plazme
 - termičke izolacije

Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- Princip rada tokamaka
 - TEHNOLOŠKI PROBLEMI



- reakcijska komora - na visokom pritisku
- toplotni fluks na zidu je velik
- brzi neutroni oštećuju zid komore i čine ga radioaktivnim
- zaštititi okolinu reakcijske komore od fluksa brzih neutrona vanjskim oplodnim omotačima koji će se koristiti za proizvodnju tricija

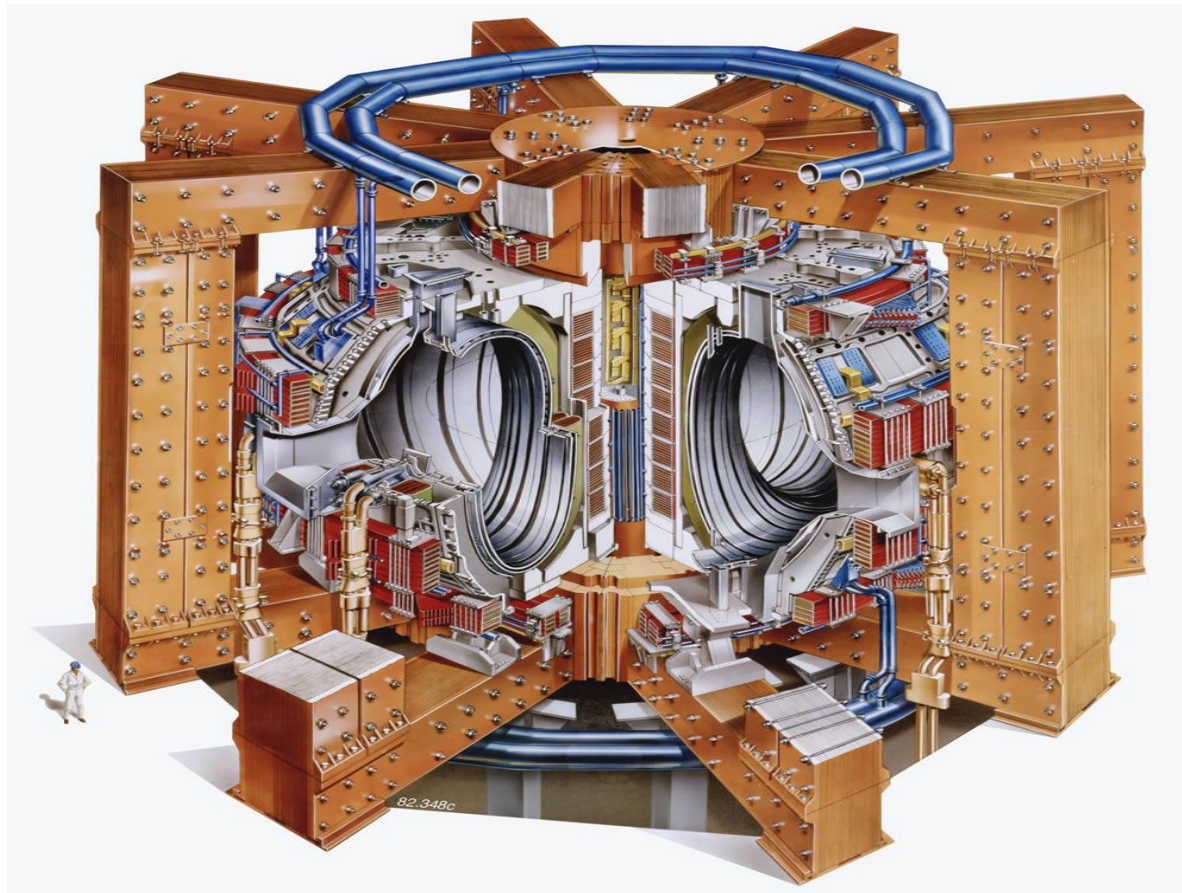
Reakcijska komora Tokamak uređaja

Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- Princip rada tokamaka

- niz tokamak uređaja u eksploataciji i gradnji:
 - JET (Joint European Torus)
 - u pogonu od 1983.god.
 - trenutno najveći tokamak na svijetu sposoban za proizvodnju 16 MW fuzione snage u trajanju do 1 s

Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme



Izgled JET eksperimentalnog fuzionog uređaja

Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- Princip rada tokamaka
 - ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)
 - najozbiljniji pomak prema ostvarenju fuzijske elektrane
 - međunarodni projekt :



- Narodne Republike Kine
- Evropske Unije
- Japana
- Republike Koreje
- Rusije
- SAD-a, uz sponzorstvo UN-ove nuklearne agencije IAEA

Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- **ITER**

- CILJ:

- postići samoodrživu fuzionu reakciju (jednom pokrenuta, samostalno se održava uz kontinuirani dotok goriva)

- MJESTO RAZVOJA PROJEKTA:

- *Japan Atomic Energy Research Institute u Naka-i, 80 km sjeverno od Tokija*
- *Max Planck Institut für Plasmaphysik u Garching-u, 15 km sjeverno od Münchena*

- LOKACIJA ZA IZGRADNJU PROJEKTA

- *Cadarache, France*

- PREDVIĐENI POČETAK RADA:

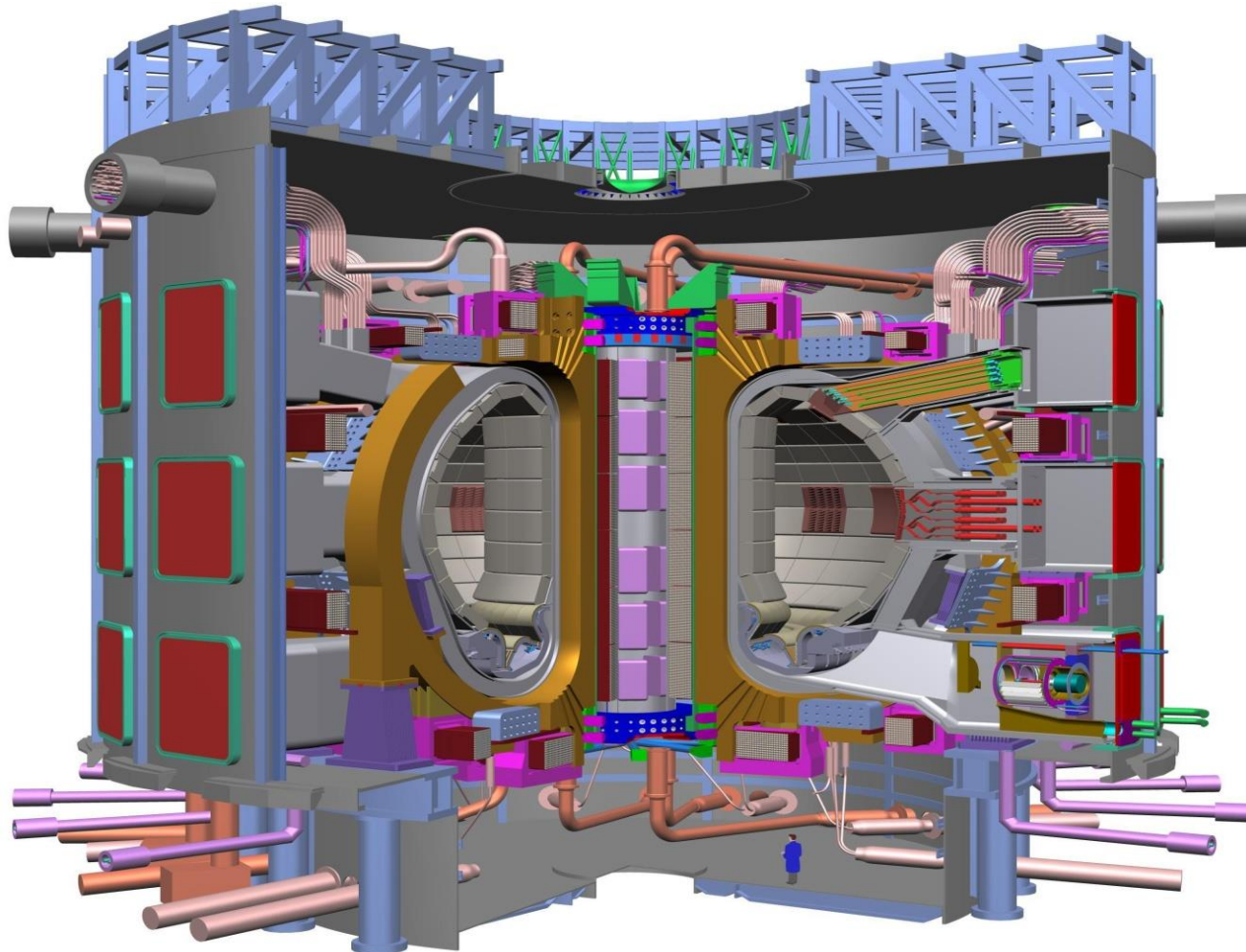
- kraj 2016.

Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme



Cadarache, France

Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme



- Izgled ITER eksperimentalnog fuzioog reaktora

Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- Sigurnost

- Inherentno siguran proces
 - Fuzija se odvija u vakuumu – unutrašnjost reaktora je dobro obložena – minimalna mogućnost kontaminacije okoliša
 - Bilo kakav kontakt sa okolinom unosi nečistoće u plazmu i gasi fuziju
- Nema lančane reakcije koja bi se mogla oteti kontroli (nasuprot fisiji)
- Prekid dotoka goriva - fuzija se gasi za oko 1 sekundu

Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- Zračenje (neutrone) upija materijal reaktora
- Ozračena materija (reaktor) nije pokretna
- Za radnog vijeka postrojenja biće proizvedena znatna količina radioaktivnog otpada no on nije visoko radioaktivan

Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- **Osnovna ideja**

- **Termonuklearna eksplozija u malom**
- Postići uslove fuzije slične onima u zvijezdama ili hidrogenskoj bombi:
 - Visoka temperatura
 - Visok pritisak
 - Visoka gustoća
- Fuzija mora biti manjih razmjera kako bi se mogla držati pod kontrolom

Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- Da bi bilo moguće razmišljati o komercijalnoj fuzionoj elektrani na bazi inercijalnog ograničenja plazme potrebno je riješiti još puno problema:
 - Jednostavne i efikasne proizvodnje tableta mete koje bi proizvele 50 do 100 puta veću energiju od one uložene za grijanje i kompresiju
 - Prema sada očekivanoj veličini tableta potrebno ih je oko 100 miliona godišnje
 - Najviše se radi na eliminiranju nestabilnosti izazvanih nesimetričnim obasjavanjem mete i na razvoju snopova odgovarajućih karakteristika (energetska efikasnost od 10 do 30% i frekvencija ponavljanja pulsa od 5 do 10 Hz)
 - Fuziona komora bi morala imati životni vijek bar 30 godina i ne bi smjela biti tretirana kao radioaktivni materijal nakon razgradnje

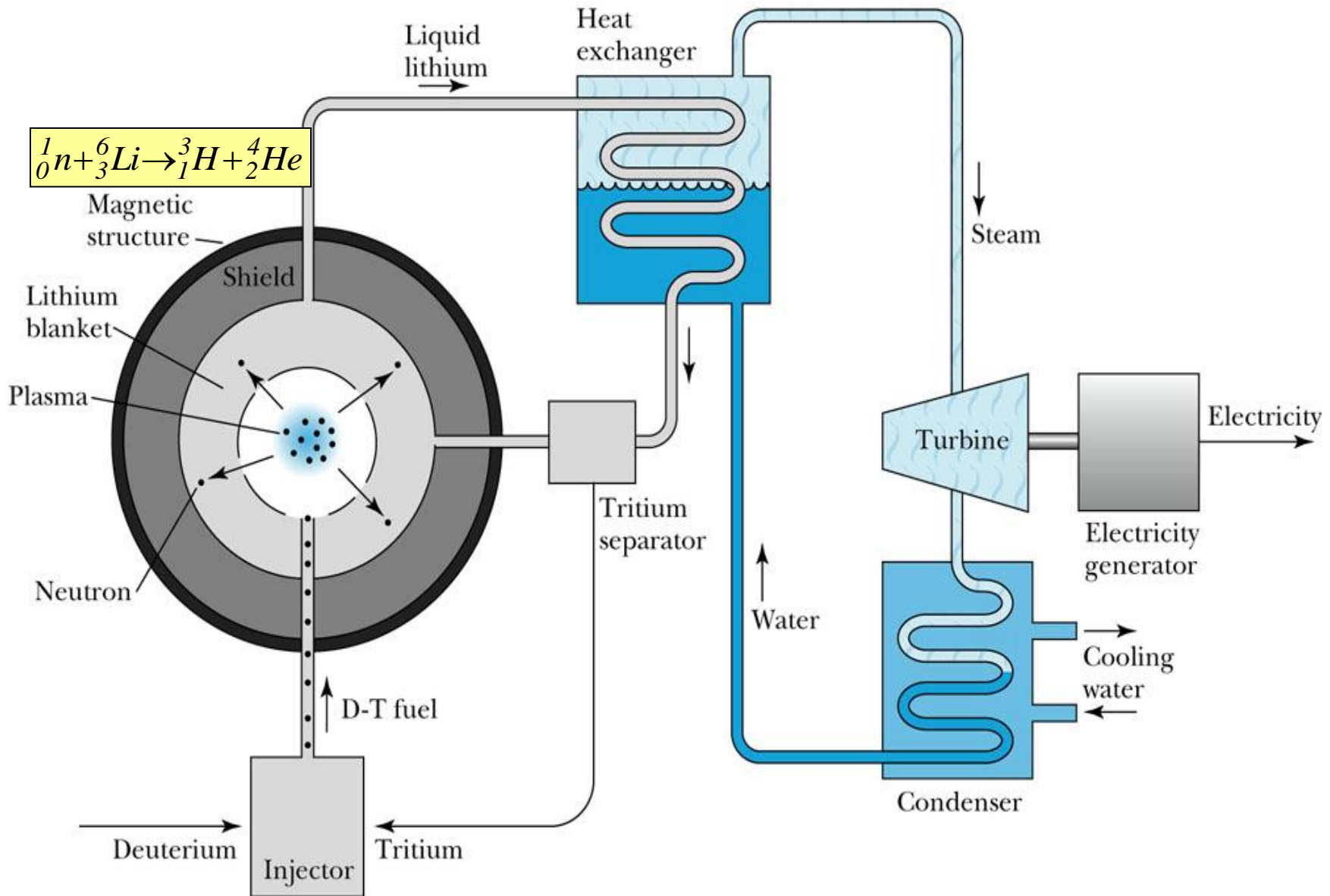
Fuzioni uređaji s magnetnim ograničenjem plazme

- Eksperimentalni inercijski fuzioni reaktor u izgradnji
- Puštanje u pogon 2008.
- Projekt Ministarstva odbrane SAD-a
- Početni cilj bio je proučavanje termonuklearnih reakcija
 - Eliminira potrebu za podzemnim termonuklearnim eksplozijama
- Veliki interes pokazuje ministarstvo energije
 - Zbog mogućnosti proizvodnje električne energije
- Osnovne karakteristike:
 - Laserski pogon (192 zrake)
 - Mogućnost direktnog i indirektnog pogona
- Slično postrojenje gradi se u Francuskoj (Laser Mega Joule)
 - Očekivano puštanje u pogon 2012.

Dizajn fuzione elektrane

- U D-T fuziji nastaje jezgra helija (alfa čestica i neutron).
- Alfa čestica nosi 20% a neutron 80% energije oslobođene u jednoj fuziji.
- Alfa čestice se zbog naboja brzo apsorbiraju u plazmi i tako povećavaju temperaturu plazme.
- Neutroni, jer su električni neutralni, prolaze kroz plazmu, pa se moraju apsorbirati izvan plazme u pogodnom materijalu u kojem će se kinetička energija neutrona transformirati u unutrašnju energiju tj. povećati temperaturu materijala koji okružuje plazmu.
- Pogodan materijal za apsorpciju neutrona je tekući litij.
- Tekući litij je fluid koji struji i prenosi topline iz područja fuzijskog reaktora do parne turbine koja toplotnu energiju pretvara u mehaničku rotacijsku energiju generatora a koji onda tu energiju rotacije pretvara u električnu energiju.

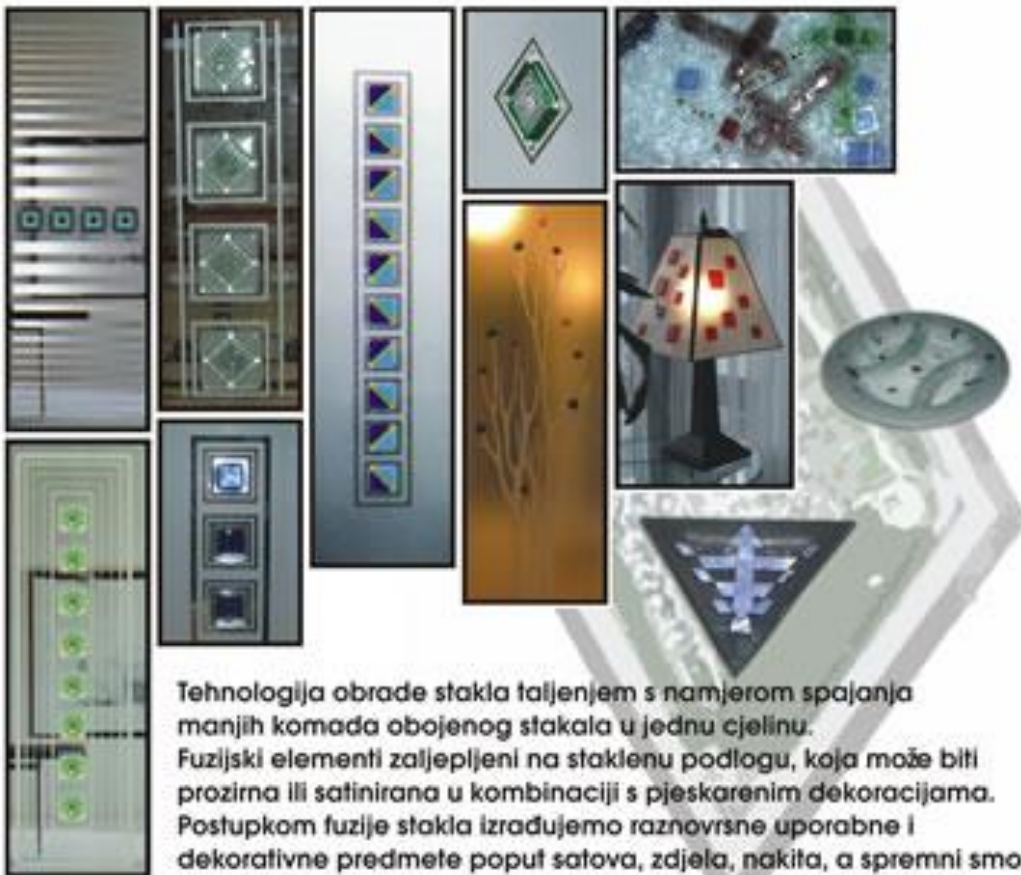
Šematski prikaz fuzione elektrane



Zanimljivosti

FUZIJA
FUZIJA

- Poređenja radi, postrojenje ITER za godinu dana rada bi moglo da proizvede 7 milijardi kilovat sati energije od samo 100 grama deuterija i 3 tone litijuma. Postrojenje koje kao energent koristi uglj bi za dobijanje iste količine energije trebalo 1,5 miliona tona goriva + ispuštanje u atmosferu 4-5 tona ugljen dioksida.



Tehnologija obrade stakla taljenjem s namjerom spajanja manjih komada obojenog stakala u jednu cjelinu. Fuzijski elementi zaljepljeni na staklenu podlogu, koja može biti prozirna ili satinirana u kombinaciji s pjeskarenim dekoracijama. Postupkom fuzije stakla izrađujemo raznovrsne uporabne i dekorativne predmete poput satova, zdjela, nakita, a spremni smo napraviti predmete koji oblikom i bojom odgovaraju Vašoj želji.

Literatura

- ❖ Internet:
 - www.iter.org
 - www.jet.org
 - www.fusion.org
 - www.mojaenergija.hr

Tipične vrednosti elektronske koncentracije i temperature za uobičajene plazme u prirodi i u laboratoriji

