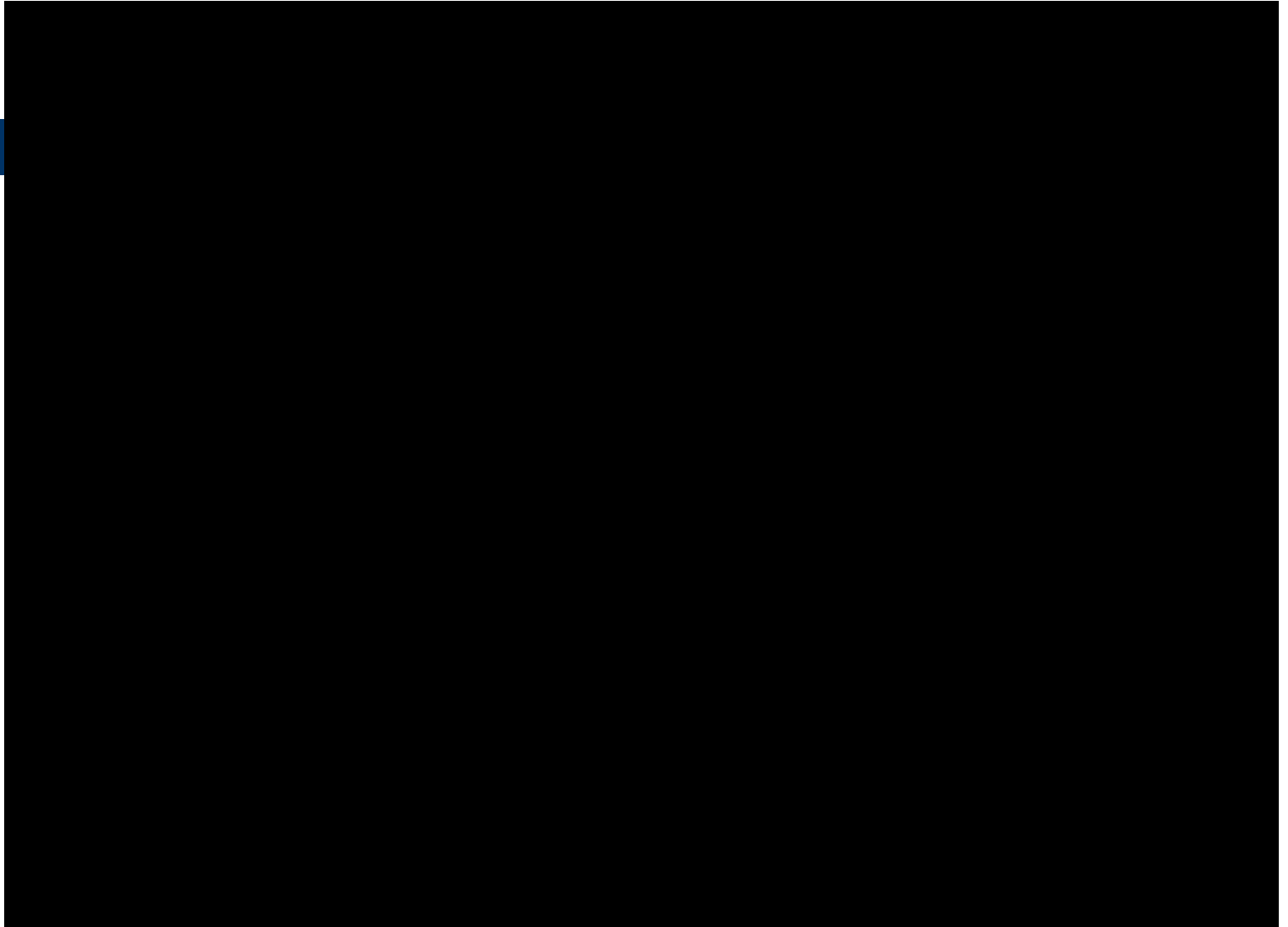


# Fuzija

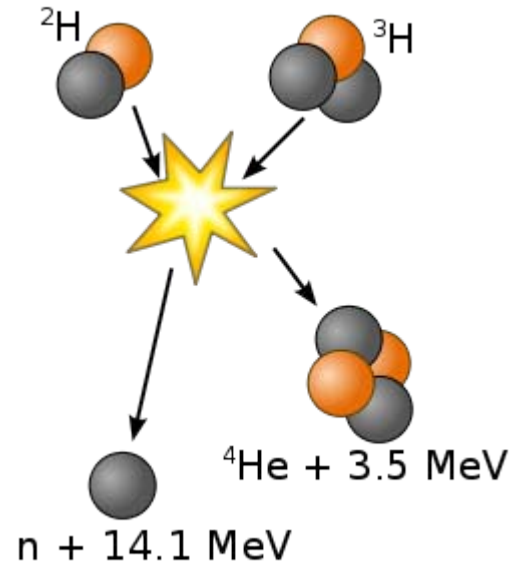
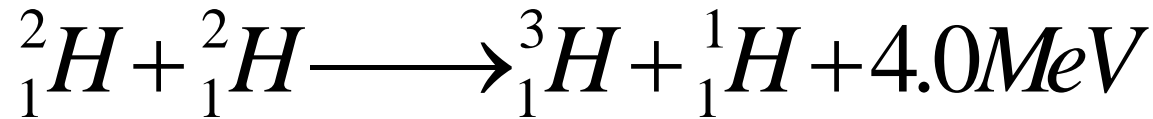




# Motivacija

- Svjetske potrebe za energijom neće se više moći namirivati fosilnim ni fisijskim gorivom na razini sadašnje tehnologije duže od tridesetak godina. Mogući izlaz s obzirom na velike količine vode (i u njoj sadržanog deuterija) na Zemlji jest fuzija lakih jezgara. Postoji niz egzotermnih reakcija među lakim jezgrama koje omogućuju dobivanje energije. To su reakcije kojima i naše Sunce oslobađa energiju.
- Istraživanja o korištenju fuzijske energije provode se već četrdesetak godina. Postignut je znatan napredak, ali nedovoljan za komercijalno iskorištavanje.

# Reakcije kandidati (Q-vrijednost)



# Problematika (plazma)

- Q-vrijednost nuklearne reakcije jest iznos energije koji se dobiva tom reakcijom. U temelju ideje o iskorištavanju fuzije u energetske svrhe jest slijedeće: načiniti mješavinu jezgara tricija i deuterija koja bi sudaranjem ostvarila fuziju. Očito, problem je kulonsko odbijanje među česticama. Učinak prostornog naboja izbjegava se preko plazme, neutralne mješavine elektrona i atomskih jezgara. Ipak, u pojedinačnim sudarima još uvijek imamo problem s kulonskom barijerom. Da ju čestice svladaju treba ostvariti kinetičku energiju reda veličine 10 keV tj. temperaturu  $10^8$  K. Svi materijali isparavaju na toj temperaturi do stanja plazme. Dakle, u rješavanju problema izolacije, grijanja i održavanja plazme jest ključ za ostvarenje fuzijske energetike.

# Pristupi problemu

- Postoji više vrlo različitih pristupa ovom problemu: magnetska polja, inercijalno zatočenje, mionska kataliza itd. Na primjer, kod magnetskog zatočenja magnetsko polje je nepremostiva zapreka nabijenim česticama (plazma je zarobljena u vremenu  $\tau$ ). U tom vremenu plazma se mora zagrijati do temperature paljenja, kada se počinje odvijati nuklearna reakcija. Nakon toga, oslobađa se dovoljno energije (u vidu ionizirajućih  $\alpha$ -čestica) da bi se plazma dalje sama zagrijavala. Proračun mora naravno, predvidjeti da razvijena energija kompenzira gubitke nastale zakočnim zračenjem.

# Osnovni fuzijski parametri

- U plazmi se nalazi više različitih komponenti, na primjer elektroni, ionizirani tricij i deuterij. **Kinetički tlak** pojedine komponente  $p_i$ , povezan je s gustoćom te komponente  $n_i$ , slijedećom relacijom:

$$p_i = n_i k T \quad (11.1)$$

# Magnetski tlak

- Magnetsko polje u plazmi ima efekt "hidrostatske prirode". To ćemo pojasniti slijedećim razmatranjem. Newtonova jednažba u plazmi ima oblik (bez Električnog polja):

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p + \vec{j} \times \vec{B} \quad (11.2)$$

$$\vec{j} \times \vec{B} = -\frac{1}{\mu_0} \vec{B} \times (\nabla \times \vec{B}) \quad (11.3)$$

$$\vec{B} \times (\nabla \times \vec{B}) = \frac{1}{2} \nabla (\vec{B} \cdot \vec{B}) - (\vec{B} \nabla) \vec{B} \quad (11.4)$$

*Kombiniramo Newtonov zakon gibanja u mag. polju s Amperovim zakonom!*



# Magnetski tlak

- Uvrštavanjem (11.4) u (11.3) i potom u (11.2) vidimo da se član proporcionalan sa  $B^2$  pojavljuje u (11.2) na funkcionalno isti način kao i tlak. Korektnim izborom faktora proporcionalnosti definira se magnetski tlak:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p + \vec{j} \times \vec{B} \quad (11.2)$$

$$\vec{j} \times \vec{B} = -\frac{1}{\mu_0} \vec{B} \times (\nabla \times \vec{B}) \quad (11.3)$$

$$\vec{B} \times (\nabla \times \vec{B}) = \frac{1}{2} \nabla (\vec{B} \cdot \vec{B}) - (\vec{B} \nabla) \vec{B} \quad (11.4)$$

**Magnetski tlak** → 
$$p_m = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (11.5)$$

## $p_m > p$ za magnetski zatočenu plazmu

- U fuzijskim uređajima dva se tlaka suprotstavljaju. Kinetički tlak  $p$  treba zarobiti, a tu funkciju daje magnetski tlak  $p_m$ . Stoga je logično definirati i karakterističan parametar magnetskog zatočenja - **omjer suprotstavljenih tlakova**  $\beta$ :

$$\beta = \frac{p}{p_m} = \frac{2\mu_0 nkT}{B^2} \quad (11.6)$$

$\beta < 1$  za magnetski zatočenu plazmu

# Snaga dobivena fuzijom

- Za dobro definiranu relativnu brzinu  $v_0$  čestica koje se fuzioniraju, broj događaja u jedinici vremena je proporcionalan sa  $\sigma v_0$ , gdje je  $\sigma$  udarni presjek za fuziju. Ako imamo raspodjelu brzina (najčešće Maxwellovsku), tada se pojavljuje usrednjena vrijednost  $\langle \sigma v \rangle$ .
- Sa  $2n$  označimo gustoću ionskog dijela plazme. Neka u gustoći ionskog dijela plazme deuterij i tricij učestvuju jednako (tj. svaki sa  $n$ ), tada je raspoloživa **gustoća termalne snage  $P_{th}$  ( $W/m^3$ )**:

$$P_{th} = n^2 \langle \sigma v \rangle Q_T \quad (11.7)$$

# Korisna energije po jednoj fuziji

- $Q_T$  je udio korisne energije po jednoj fuziji. Naime, energija  $\alpha$ -česuce  $E_\alpha$  lako se pretvara u toplinu, no dio neutronske energije  $E_n$  se gubi.

$$Q_T = M E_n + E_\alpha \quad (11.8)$$

gdje je  $M$  faktor konverzije neutronske energije.

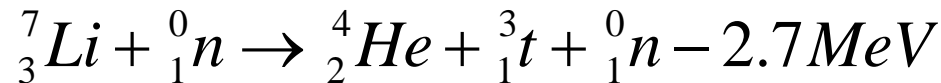
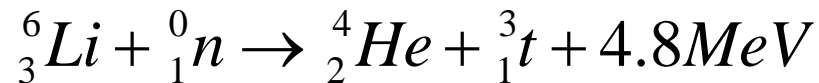
- Tako se uvrštenjem za gustoću ionske plazme  $n$  iz (11.6) za omjer suprotstavljena tlakova  $\beta$  dobiva:

$$P_{th} = C_1 \beta^2 B^4 Q_T \langle \sigma v \rangle \frac{1}{T^2} \quad (11.9)$$

- $C_1$  je konstanta ovisna o upotrijebljenim jedinicama, čiju vrijednost lako rekonstruiramo iz (11.6) i (11.7). Izraz (11.9) vrlo je pogodan za maksimalizaciju gustoće termalne energije.

# Omjer oplodivanja

- **Omjer oplodivanja.** U radu fuzijskog reaktora potreban je tricij. Kako se tricij raspada (vrijeme poluraspada jc 12,8 godina), u prirodi ga nemamo. Tokom rada reaktora tricij će se stvarati pomoću neutrona oslobođenih u fuzijskoj reakciji. Neutroni nalijeću na litijску oblogu, gdje su moguće i slijedeće nuklearne reakcije:



**Omjer (broj stvorenih jezgri tricija / broj upadnih neutrona). Oplodivanje ima tipičnu vrijednost od 1,1.**

# Kriteriji za rad fuzijskog reaktora

- Pokazuje se da relativno jednostavna razmatranja o snazi stvorenoj fuzijom i snazi potrebnoj da se fuzija ostvari daju informaciju o minimalnim zahtjevima koje plazma mora ispuniti da bi proces fuzije mogao teći.
- Znamo izračunati gustoću snage koja se fuzijom oslobađa (11.7). Potrebno je još procijeniti unutrašnju energiju plazme na temperaturi  $T$ . Statistička fizika snabdijeva nas slijedećim rezultatom: U skupini čestica čiji raspored energija ima maxwellovski oblik prosječna energija  $E$  je:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT \quad (11.11)$$

$$e_{plazme} = \frac{3}{2} \sum_j n_j kT \quad (11.12)$$

# “*break-eventn point*”

- Da bismo dobili gustoću plazmine snage, treba  $e_{\text{plazme}}$  podijeliti s karakterističnim vremenom  $\tau$  u kojem smo u pulsnom radu uspjeli zarobili plazmu. (Ideja je da visoku temperaturu u plazmi realiziramo samo kratko vrijeme.)
- Da bismo bar mogli izjednačili snagu dobivenu fuzijom i uloženu snagu (break-eventn point), mora vrijediti relacija:

$$\frac{\tau P_{th}}{\frac{3}{2} kT \sum_i n_j} = 1 \quad (11.13)$$

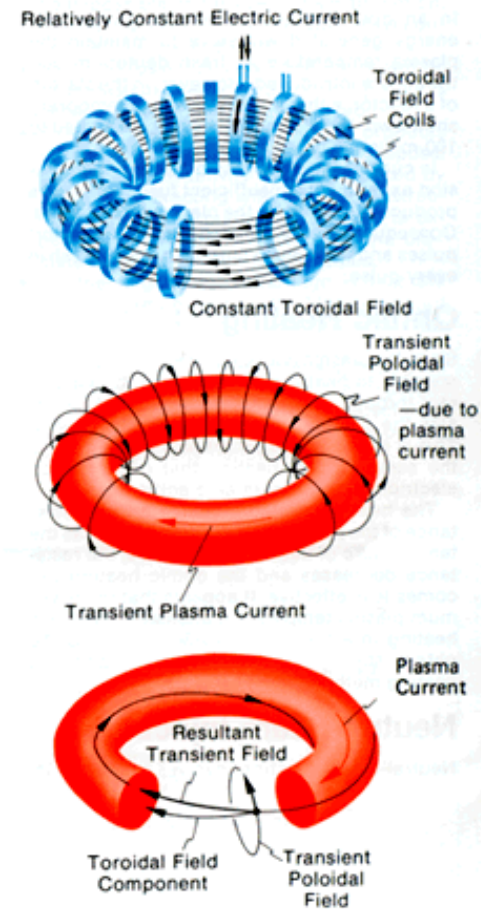
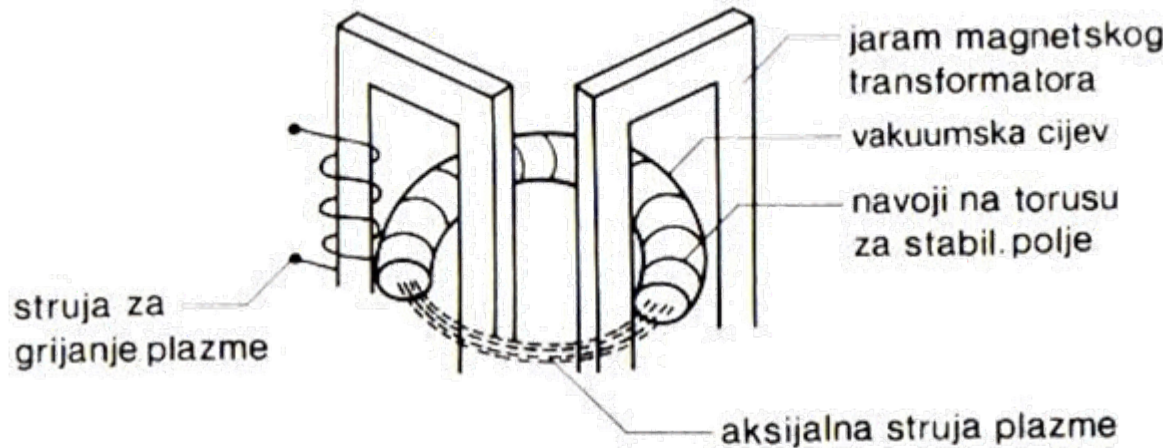
$$n_e \tau = \frac{12kT}{\langle \sigma v \rangle_{D,T} Q_T} \quad (11.14)$$

# Lawsonov kriterij

- $n_e$  gustoća elektronske komponente plazme
- $\langle \sigma v \rangle_{DT}$  je usrednjena vrijednost za DT fuzijski kanal
- Uvrštenjem vrijednosti i uz  $T = 10$  keV dobiva se za  $n_e \tau$  oko  $7 \times 10^{19} \text{m}^{-3} \text{s}$ .
- Taj umnožak gustoće plazme i vremena zarobljavanja treba imati relativno visoku vrijednost da bi, s gledišta snage, taj proces mogao teći.
- Uvjet (11.13) odnosno (11.14) relativno su jednostavno formulirani. (realno  $7 \times 10^{22} \text{m}^{-3} \text{s}$ ).
- J.D.Lawson je prvi skrenuo pažnju na bitnu važnost umnoška  $n_e \tau$ . (**Lawsonov kriterij**)



# Tokamak

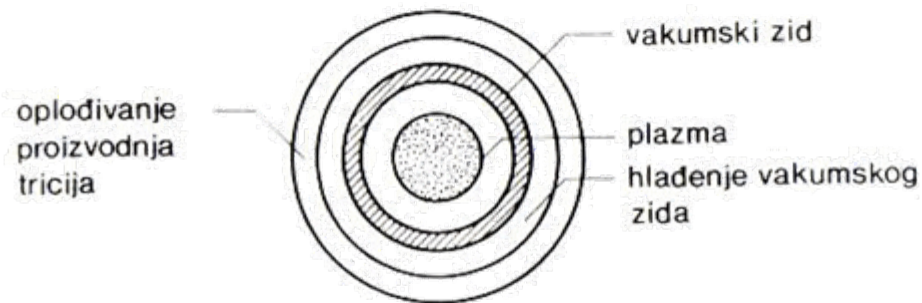


**Slika 11.1.** Tokamak. Plazma struji po kružnim stazama unutar torusa. Elektromotorna sila za njezinu akceleraciju generira se jarmovima oko torusa. Navoji na torusu služe za stabilizaciju toka plazme, opskrbljujući magnetsko polje paralelno s centralnom kružnicom torusa.

# Tokamak

Pulsom u primaru inducira se strujanje plazme u torusu. Kako se suprotni naboji gibaju u suprotnim smjerovima, plazma se grije. Također nastaje polje od plazme koje je zarobljava. Dodatno se na toroid namata navoj (paralelno kružnici presjeka) koji osigurava do kraja stabilnost plazme.

Bitne komponente tokamaka prikazane su na slici 11.2.



**Slika 11.2.** Presjek cijevi fuzijskog reaktora. Iznutra prema vani: plazma, vakuum, vakuumski zid, hlađenje i sloj za proizvodnju tricija.

Postoje planovi da se u budućnosti koriste neutralni snopovi (mogu se bez zapreka probiti kroz magnetski oklop) za dodatno zagrijavanje plazme.

# Laserski inducirana fuzija

- Osnovna je ideja da se komprimira mješavina deuterij-tricija (D,T) pomoću laserskih snopova. Mješavina se nalazi unutar posebno proizvedene čvrste šuplje kuglice. Laserski snopovi iz više smjerova upere se na sferni omotač kuglice koji implodira. Moguće je zasada radijus kuglice smanjiti za faktor 50. U literaturi se postupak naziva *inercijalnim zarobljavanjem*. Laserski dobiveni neutroni u fuziji demonstrirani su 1977.

# Laserska fuzija

- Deuterij-tricij mješavina ispunjava kuglicu od nekoliko milimetara u promjeru. Kuglica je načinjena iz plastičnog materijala. Smješta se na sjecište više laserskih snopova i njima osvjetljava simetrično i uniformno. Laserski puls trenutno ionizira atome u vanjskom sloju kuglice, no unutra je materijal "neproziran". Laserska energija apsorbira se u gustom sloju plazme oko deuterij-tricij goriva. Taj sloj eksplodira prema van ( $v \sim 1000$  km/s), a unutrašnji sloj jednakom silom se komprimira. Za nanosekundu izvrši se kompresija brzinom 100 km/s. Pri tome je faktor smanjenja radijusa  $\sim 50$ . Brzo se ustanovilo da se sva laserska energija ne utroši u kompresiju; velik dio energije u toku obasjavanja preuzimaju elektroni. Svojinu bijegom odnose energiju namijenjenu kompresiji i konačni je pritisak umanjen u odnosu na idealna očekivanja. Trebalo bi, dakle, upotrijebiti lasersku svjetlost kraće valne duljine.

# Mionska kataliza

- Osnovna ideja u mionskoj katalizi jest formiranje sistema deuterij-tricij-mion kao analogona deuterij-tricij molekuli u kojoj je elektronski omotač zamijenjen mionom. Kao što je pokazano u poglavlju o egzotičnim atomima, dimenzije objekta u kojem mion igra ulogu elektrona reducirane su prema dimenzijama normalne molekule. U pucjeni dimenzija egzotične molekule treba dimenzije normalne molekule množiti omjerom elektronske i mionske mase. U takvom objektu jezgre deuterija i tricija međusobno su bitno bliže pa nastupa fuzija. Kada bismo imali jeftin izvor miona ili kada bi mioni beskonačno dugo živjeli, lako bismo riješili fuzijski problem.
- Dosadašnja mjerenja nisu uspjela zatvorili energijsku bilancu procesa. Naime, uspjevalo se postići da jedan mion proizvede oko 200 kataliza prije nego se raspadne.
- Postoje i alternativna istraživanja takozvanom hibridnom linijom u toku koje bi se puls miona koristio samo za inicijalno paljenje fuzije, dok bi ostali dio bio završen drugim molekulama.

# Povijesna napomena

- Korektno je spomenuti još neke fuzijske pokušaje. U takozvanom efektu "*theta pinch*" praznila se kondenzatorska banka prethodno napunjena nabojem. Struja se vodila prstenom oko plazme, čime je nastalo magnetsko polje "stiskalo" plazmu prema središtu prstena.
- Kada je riječ o *magnetskom zrcalu* plazmu se zarobljava u prostomu zamku. Rubovi zamke imaju gušći magnetski tok od njezina središnjeg dijela. Plazma spiralira oko magnetskih silnica. Pri tome ona titra u smjeru silnica i rotira oko silnice. Tako je plazma zarobljena između dva područja gustoga magnetskog toka. I ovdje bi se dodamo grijanje postizalo uvođenjem snopa neutrala.
- Spomenuti pokušaji ne smatraju se više perspektivnim jer su došli do točke iza koje se više nije postizavao napredak.

