

Fuzija – energijski vir prihodnosti

Tomaž Gyergyek,
Univerza v Ljubljani,
Fakulteta za elektrotehniko
in IJS, Ljubljana

1. Uvod

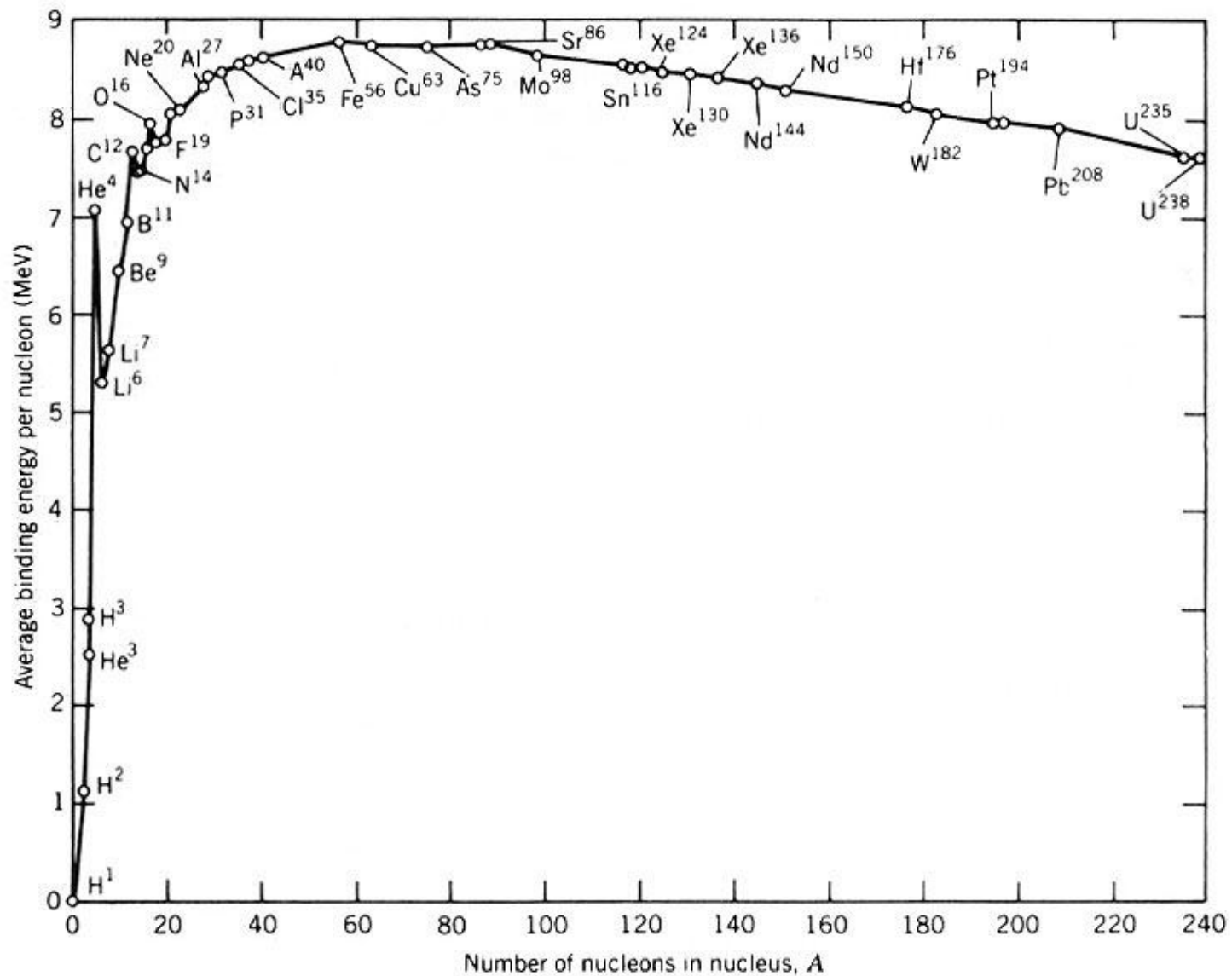
Pri fuziji, oziroma zlivanju atomskih jeder se šibkeje vezana lahka jedra zlivajo v močnejše vezana težja jedra, pri tem pa se sprosti energija.

Masa stabilnega jedra je manjša od vsote mas protonov in nevtronov, ki ga sestavljajo. Razliki pravimo masni defekt:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_Z.$$

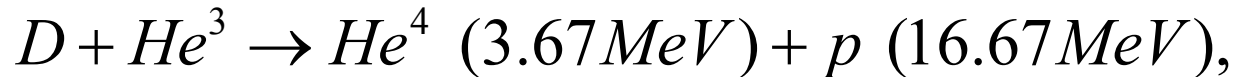
Masni defekt se ob nastanku jedra pretvori v vezalno energijo jedra po Einsteinovi formuli $E_v = m_Z c^2$. Če masni defekt merjen v energijskih enotah delimo s številom nukleonov v jedru, dobimo vezalno energijo na nukleon. Čim večja je ta energija, tem močnejše je jedro vezano. Odvisnost vezalne energije na nukleon od števila nukleonov v jedru je prikazana na sliki 1.

Vedno, ko pri jedrskih reakcijah iz šibkeje vezanih jeder nastajajo močnejše vezana jedra (bodisi s cepitvijo težkih jeder bodisi z zlivanjem lahkih jeder) se sprošča razlika vezalnih energij.

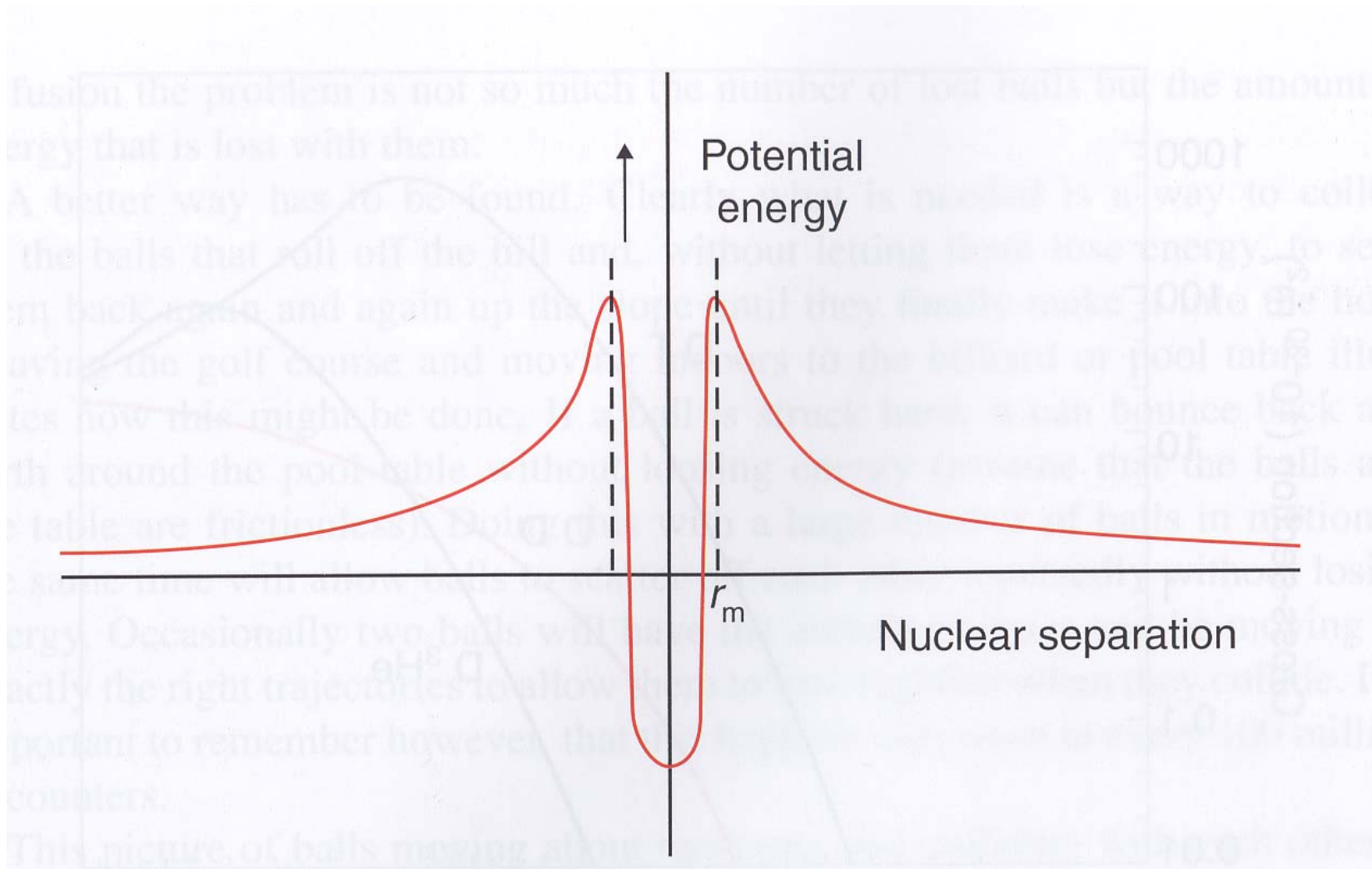


Slika 1: Odvisnost vezalne energije na nukleon od števila nukleonov v jedru.

Fuzijske reakcije, ki bi lahko prišle v poštev za fuzijske reaktorje so:



Ker so jedra atomov pozitivno nabita, se zaradi coulombske sile med seboj odbijajo in jih ni preprosto prisiliti v zlitje. Jedri moramo spraviti dovolj blizu da privlak jedrske (močne) sile premaga columbsko odbojno silo, kot je ilustrirano na sliki 2:

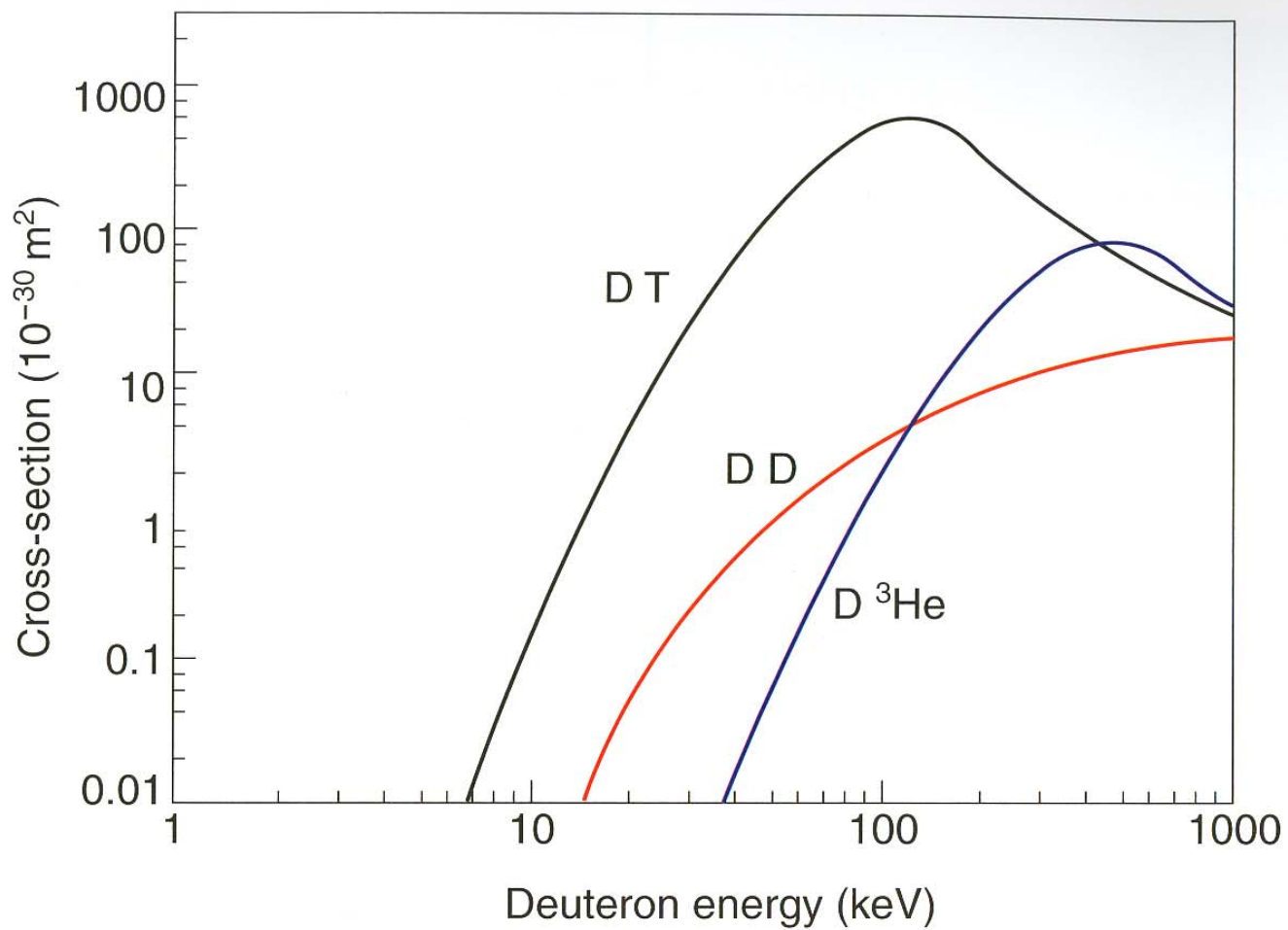


Slika2: Da lahko pride do zlitja, se morata jedri približati toliko, da privlak jedrske sile premaga odboj coulombske sile.

Zaradi tega morata jedri imeti določeno minimalno relativno hitrost, da sploh lahko pride do zlitja. Kinetične energije jeder, ki ustrezajo tem hitrostim, so med 10 in 100 keV. Če te energije delimo z Boltzmannovo konstanto, dobimo temperature, ki so med 10^8 in 10^9 K. V tabeli 1 so podane minimalne kinetične energije jeder ter ustrezne temperature za 3 reakcije:

Reakcija	Mejna kinetična energija (keV)	Ustrezajoča mejna temperatura (K)
$D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$	4	4.5×10^7
$D + D \rightarrow T + p$	35	4.0×10^8
$D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$	30	3.8×10^8

Odvisnost presekov za te 3 reakcije od energije devterona pa je prikazana na sliki 3:



Slika 3: Odvisnost presekov za 3 jedrske reakcije od energije devterona.

Če naj bi jedra D in T potrebno energijo za zlitje pridobila s termičnim gibanjem, so potrebne temperature reda velikost 10^8 K in več. Pri taki temperaturi je vsaka snov v obliki **plazme**, to je ioniziranega plina, ki je na makroskopski skali kvazinevtralen, v dosegu coulomske sile vsakega nabitega delca pa mora biti veliko število drugih nabitih delcev. Govorimo o kolektivnem vedenju delcev v plazmi.

Z zlivanjem (fuzijo) jeder bi torej lahko pridobivali energijo, če bi uspeli ustvariti dovolj vročo in gosto plazmo. Dovolj vročo in gosto plazmo pomeni, da bi na enoto časa in prostornine morale priti do tolikšnega števila fuzijskih reakcij, da bi sproščena energija bila večja od energije, ki bi jo potrebovali za gretje in ohranjanje takšne plazme.

Poglejmo sedaj ta problem malo bolj kvantitativno. Najprej poskusimo oceniti število zlitij atomskih jeder vrste 1 in 2 na enoto prostornine in na enoto časa, če je dana hitrost termičnega gibanja teh jeder oziroma temperatura plazme.

Število fuzijskih reakcij na enoto časa in na enoto prostornine (temu pravimo reaktivnost) dobimo tako, da presek za reakcijo (ki je funkcija relativne hitrosti D in T) pomnožimo z relativno hitrostjo teh dveh delcev in izraz povprečimo po hitrostni porazdelitvi obeh vrst delcev:

$$R = \iint \sigma(v^{\downarrow}) v^{\downarrow} f_1(v) f_2(v) d^3 v_1 d^3 v_2.$$

Pri tem je:

$$\mathbf{v}^{\downarrow} = \mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2, \quad f_j(v_j) = n_j \left(\frac{m_j}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{m_j v_j^2}{2kT} \right),$$

$$\mathbf{v}_j = (v_{xj}, v_{yj}, v_{zj}), \quad v_j = \sqrt{v_{xj}^2 + v_{yj}^2 + v_{zj}^2}.$$

Če uvedemo povprečno hitrost v in reducirano maso μ ter vstavimo maxwellski porazdelitveni funkciji v zgornji integral, dobimo takle

izraz:

$$R = n_1 n_2 \frac{(m_1 m_2)^{3/2}}{(2\pi kT)^3} \iint \exp\left(-\frac{m_1 + m_2}{2kT} \left(\mathbf{v} + \frac{m_1 - m_2}{2(m_1 + m_2)} \mathbf{v}^{\downarrow} \right)^2 \right) \sigma(v^{\downarrow}) v^{\downarrow} \exp\left(-\frac{\mu v^{\downarrow 2}}{2kT} \right) d^3 v^{\downarrow} d^3 v,$$

Pri tem je:

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2}{2}, \quad \mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}.$$

Število fuzijskih reakcij na enoto časa in na enoto prostornine (temu pravimo reaktivnost) dobimo tako, da presek za reakcijo (ki je funkcija relativne hitrosti D in T) pomnožimo z relativno hitrostjo teh dveh delcev in izraz povprečimo po hitrostni porazdelitvi obeh vrst delcev:

$$R = \iint \sigma(v^{\parallel}) v^{\parallel} f_1(\mathbf{v}) f_2(\mathbf{v}) d^3 v_1 d^3 v_2.$$

Pri tem je:

$$\mathbf{v}^{\parallel} = \mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2, \quad f_j(\mathbf{v}_j) = n_j \left(\frac{m_j}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{m_j v_j^2}{2kT} \right),$$

$$\mathbf{v}_j = (v_{xj}, v_{yj}, v_{zj}), \quad v_j = \sqrt{v_{xj}^2 + v_{yj}^2 + v_{zj}^2}.$$

Če uvedemo povprečno hitrost \mathbf{v} in reducirano maso μ ter vstavimo maxwellski porazdelitveni funkciji v zgornji integral, dobimo takle

izraz:

$$R = n_1 n_2 \frac{(m_1 m_2)^{3/2}}{(2\pi kT)^3} \iint \exp\left(-\frac{m_1 + m_2}{2kT} \left(\mathbf{v} + \frac{m_1 - m_2}{2(m_1 + m_2)} \mathbf{v}^{\parallel} \right)^2 \right) \sigma(v^{\parallel}) v^{\parallel} \exp\left(-\frac{\mu v^{\parallel 2}}{2kT} \right) d^3 v^{\parallel} d^3 v,$$

Pri tem je:

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2}{2}, \quad \mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}.$$

Integracija po v prinese: $\left(\frac{2\pi kT}{m_1 + m_2}\right)^{3/2}$

Integracija po v^l pa je integracija po velikosti hitrosti, ne več po komponentah, zato zapišemo

$$d^3v^l = 4\pi v^{l2} dv^l$$

in dobimo: $R = 4\pi n_1 n_2 \left(\frac{\mu}{2\pi kT}\right)^{3/2} \int_0^\infty \sigma(v^l) v^{l3} \exp\left(-\frac{\mu v^{l2}}{2kT}\right) dv^l.$

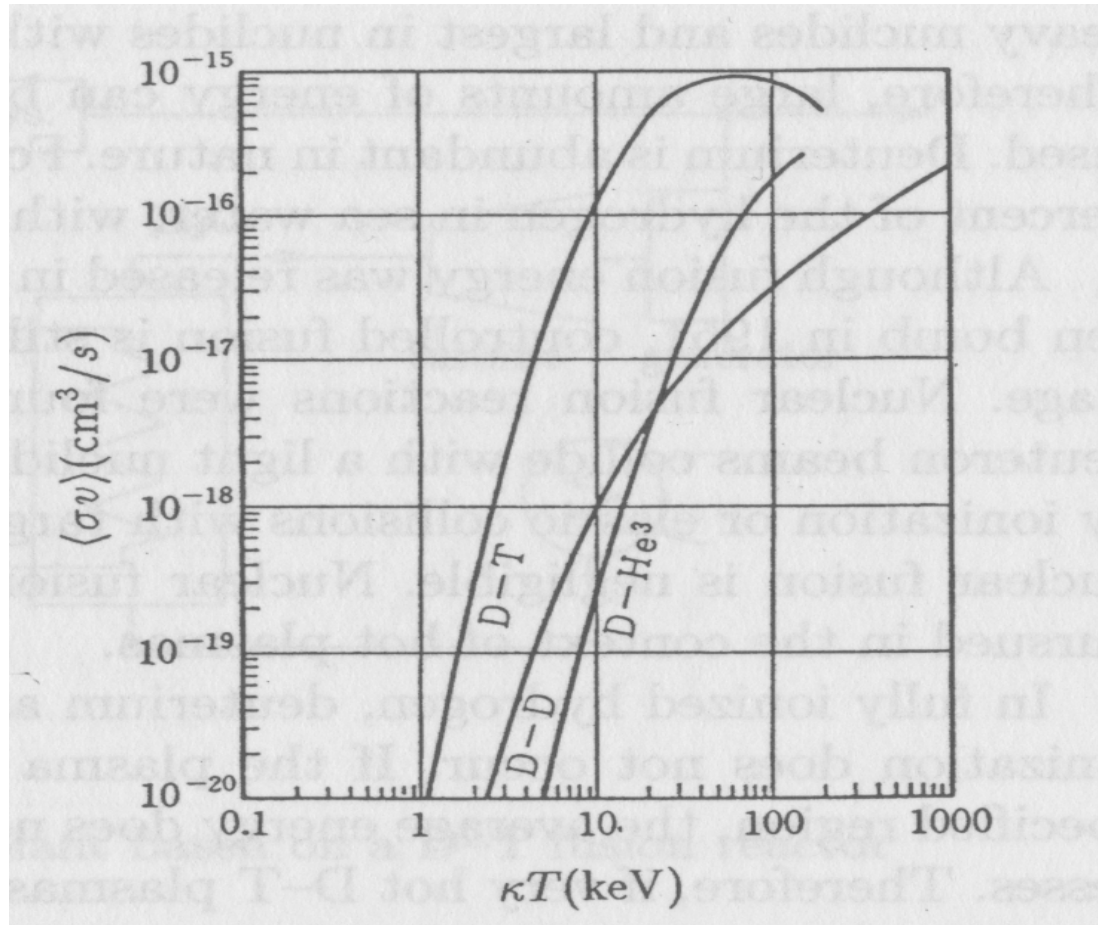
Preseke za reakcije merijo kot funkcije kinetične energije izstrelka ε , ne pa kot funkcije relativne hitrosti tarče in izstrelka v^l . Z uvedbo:

$$\varepsilon = \frac{m_1 v^{l2}}{2}, \quad d\varepsilon = m_1 v^l dv^l$$

Zapišemo zgornji integral takole:

$$R = n_1 n_2 \sqrt{\frac{8}{\pi}} \left(\frac{\mu}{kT}\right)^{3/2} \frac{1}{m_1^2} \int_0^\infty \sigma(\varepsilon) \varepsilon \exp\left(-\frac{\mu \varepsilon}{m_1 kT}\right) d\varepsilon \quad \square \quad n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle.$$

Odvisnost integrala $\langle \sigma v \rangle$ od temperature oziroma termične energije za nekatere reakcije prikazuje slika 4:



Slika 4: Odvisnost integrala $\langle \sigma v \rangle$ od temperature.

Pozornost sedaj usmerimo predvsem na reakcijo DT, ker ima najnižji prag in jo je najmanj težko doseči. Vidimo, da je za reakcijo DT maksimalna vrednost integrala $\langle \sigma v \rangle$ enaka $10^{-15} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ oziroma $10^{21} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ pri temperaturi $50 - 60 \text{ keV}$ oziroma $5.8 \times 10^8 \text{ K} - 7 \times 10^8 \text{ K}$. Če bi bili gostoti devterija in tricija med seboj enaki in reda velikosti 10^{20} m^{-3} , bi bila reaktivnost okoli 10^{19} fuzijskih reakcij (zlitij) v kubičnem metru plazme v eni sekundi.

1.2. Energijska bilanca (Lawsonov kriterij)

Energijo, ki se sprosti pri enem zlitju jeder D in T, označimo:

$$E_{DT} \approx 17.6 \text{ MeV}$$

Gostota sproščene fuzijske moči je potem:

$$P_f = n_D n_T \langle \sigma v \rangle E_{DT}$$

Gostota vseh ionov v plazmi je enaka vsoti gostot ionov devterija in tricija: $n = n_D + n_T$ tako, da je $P_f = (n - n_T) n_T \langle \sigma v \rangle E_{DT}$

Očitno je P_f največji kadar je $n_T = \frac{n}{2} = n_D$ in takrat je

$$P_f = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle E_{DT}$$

Energija, ki je potrebna, da ioni ohranjajo temperaturo T je najmanj $(3/2)kT$ za vsak ion. Gostota termične energije plazme je torej

$$W = 3nkT$$

Gostota energije, ki jo plazma izgublja na časovno enoto (zaradi vseh mogočih razlogov) označimo P_L :

$$P_L = \frac{W}{\tau_E}$$

Pri tem je τ_E čas zadrževanja sproščene fuzijske energije v plazmi. Gostoto moči, ki jo plazmi dovajamo, da jo grejemo, oziroma ohranjamo pri željeni temperaturi, označimo P_H . Če je zunanje gretje tolikšno, da ravno kompenzira vse energijske izgube, je

$$P_H = P_L, \quad \tau_E = \frac{W}{P_H}$$

Spomnimo se še enkrat reakcije DT:



Označimo: $E_\alpha = 3.52MeV$, $E_n = 14.06MeV$.

Nevtron je nevtralen in ga magnetno polje ne more zadrževati v plazmi, delec α pa je nabit. Zato ga magnetno polje lahko obdrži (za nekaj časa) v plazmi in ker ima precej energije, lahko plazmo greje. Gostota moči, ki jo plazma prejme od delcev α je:

$$P_\alpha = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle E_\alpha.$$

Kadar zunanje gretje plazme in gretje s strani delcev α ravno kompenzira vse energijske izgube, velja:

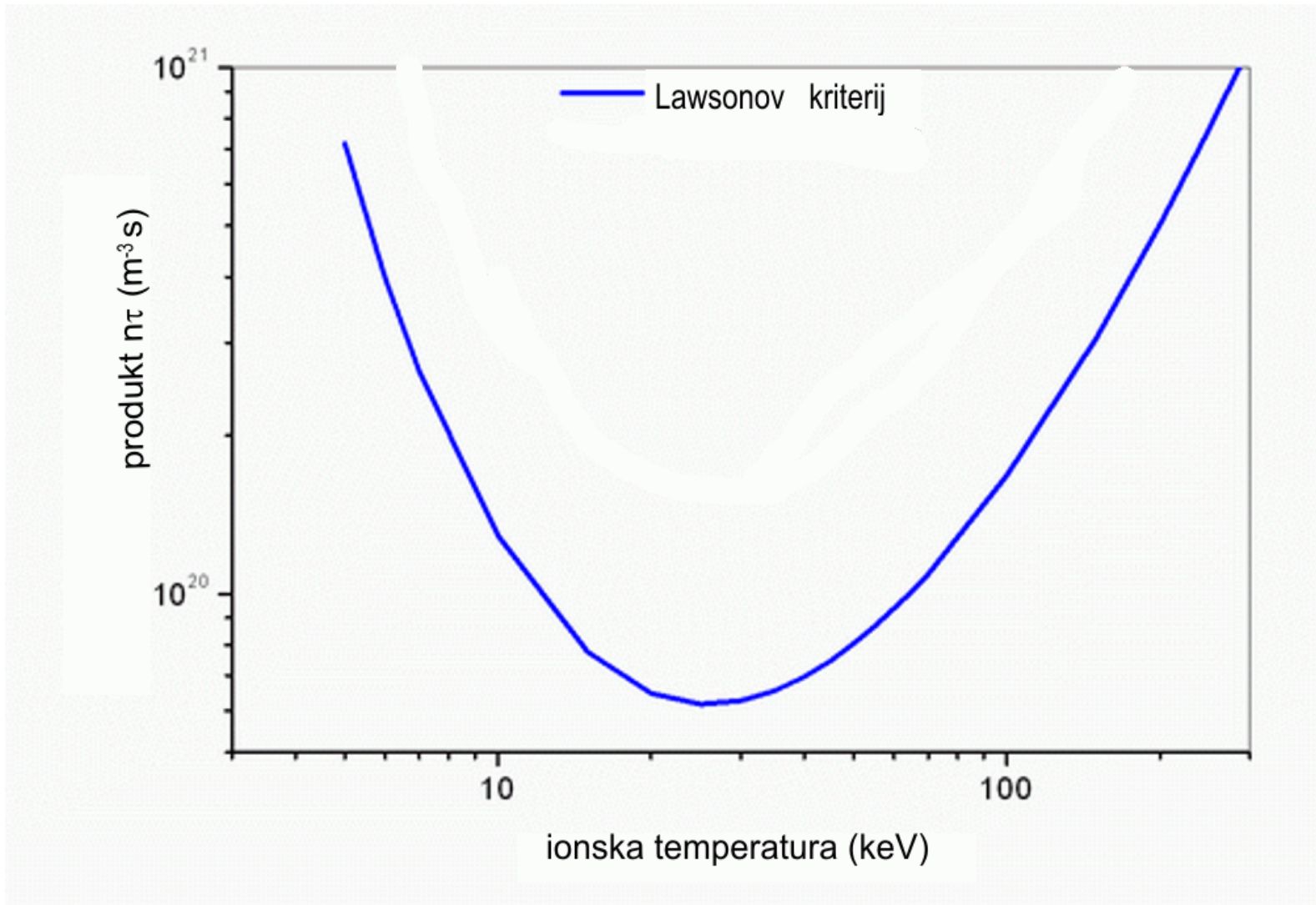
$$P_H + P_\alpha = P_L \text{ oziroma } P_H = \frac{3nkT}{\tau_E} - \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle E_\alpha.$$

Ko DT plazmo segrevamo in narašča njena temperatura, se pogostost fuzijskih reakcij povečuje in je na razpolago vse več delcev α za “notranje” gretje plazme. V tem primeru zunanje ne bi bilo več potrebno

in bi imeli

$$\frac{3nkT}{\tau_E} = \frac{1}{4}n^2 \langle \sigma v \rangle E_\alpha, \text{ oziroma } n\tau_E = \frac{12kT}{\langle \sigma v \rangle E_\alpha}$$

Produkt gostote plazme in časa zadrževanja energije imenujemo Lawsonov produkt. Desna stran je odvisna od temperature plazme. Ta odvisnost je prikazana na sliki 5:



Slika 5: Odvisnost Lawsonovega produkta od ionske temperature.

Morda je vredno opaziti, da ima Lawsonov produkt minimalno vrednost pri približno $kT = 30$ keV, vrednost pa je okoli $1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$. Produkt $\langle \sigma v \rangle$ ima v območju kT med 10 in 20 keV približno kvadratično odvisnost od temperature oblike

$$\langle \sigma v \rangle = 1.1 \times 10^{-24} (kT)^2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Pri tem mora biti kT podan v enotah keV. Če v Lawsonov pogoj za vžig plazme vstavimo pogoj zgornji produkt $\langle \sigma v \rangle$ in $E_\alpha = 3.5$ MeV dobimo

$$nkT\tau_E > 3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keVs}$$

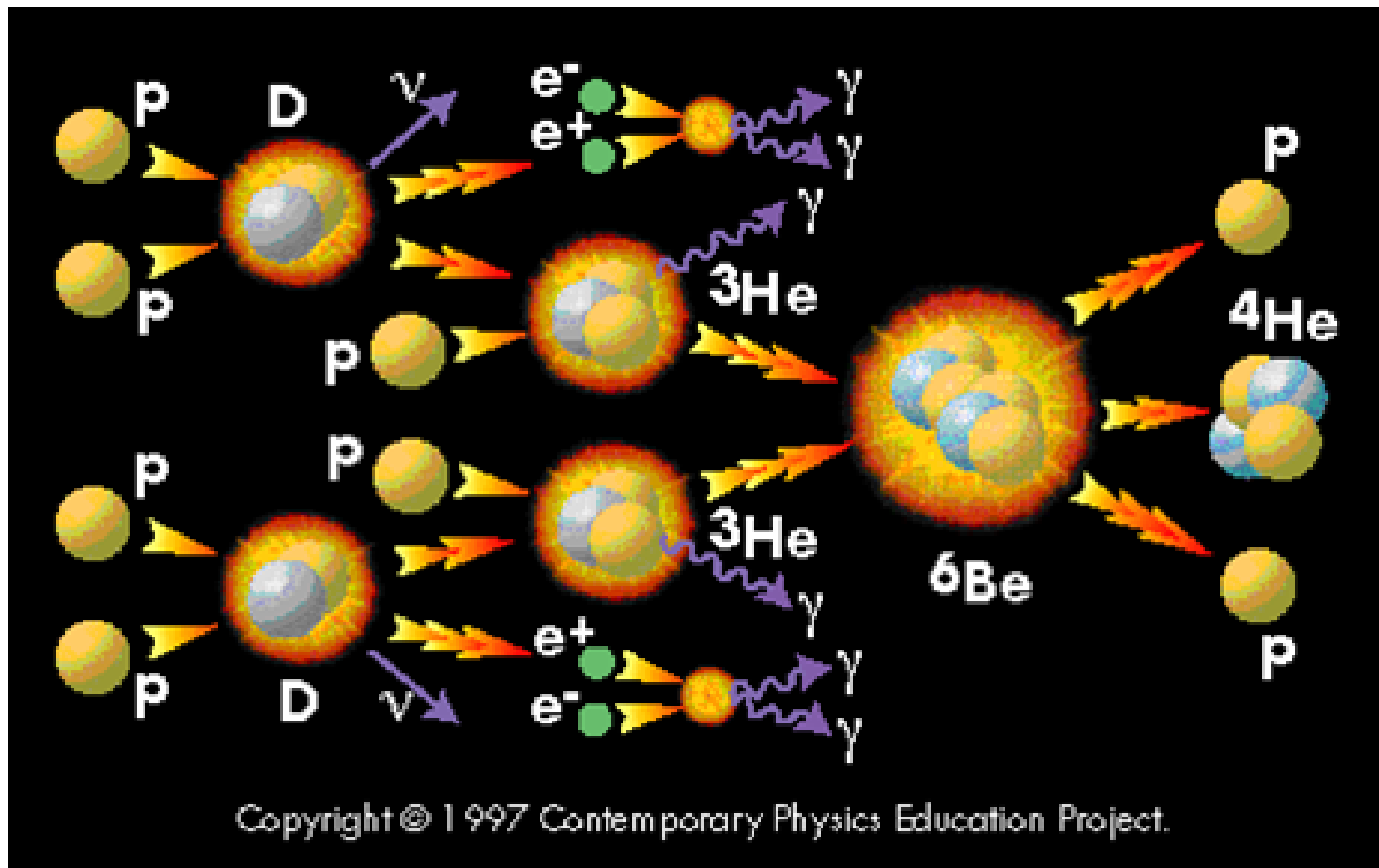
Za vžig plazme oziroma za izravnano energijsko bilanco potrebujemo torej DT plazmo, kjer je gostota D in T ionov 10^{20} m^{-3} , njihova temperatura $kT = 10$ keV in $\tau_E = 3$ s. Kot zanimivost ocenimo tlak v plazmi z navedeno gostoto in temperaturo kar po plinski enačbi:

$$p = nkT = 1.6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

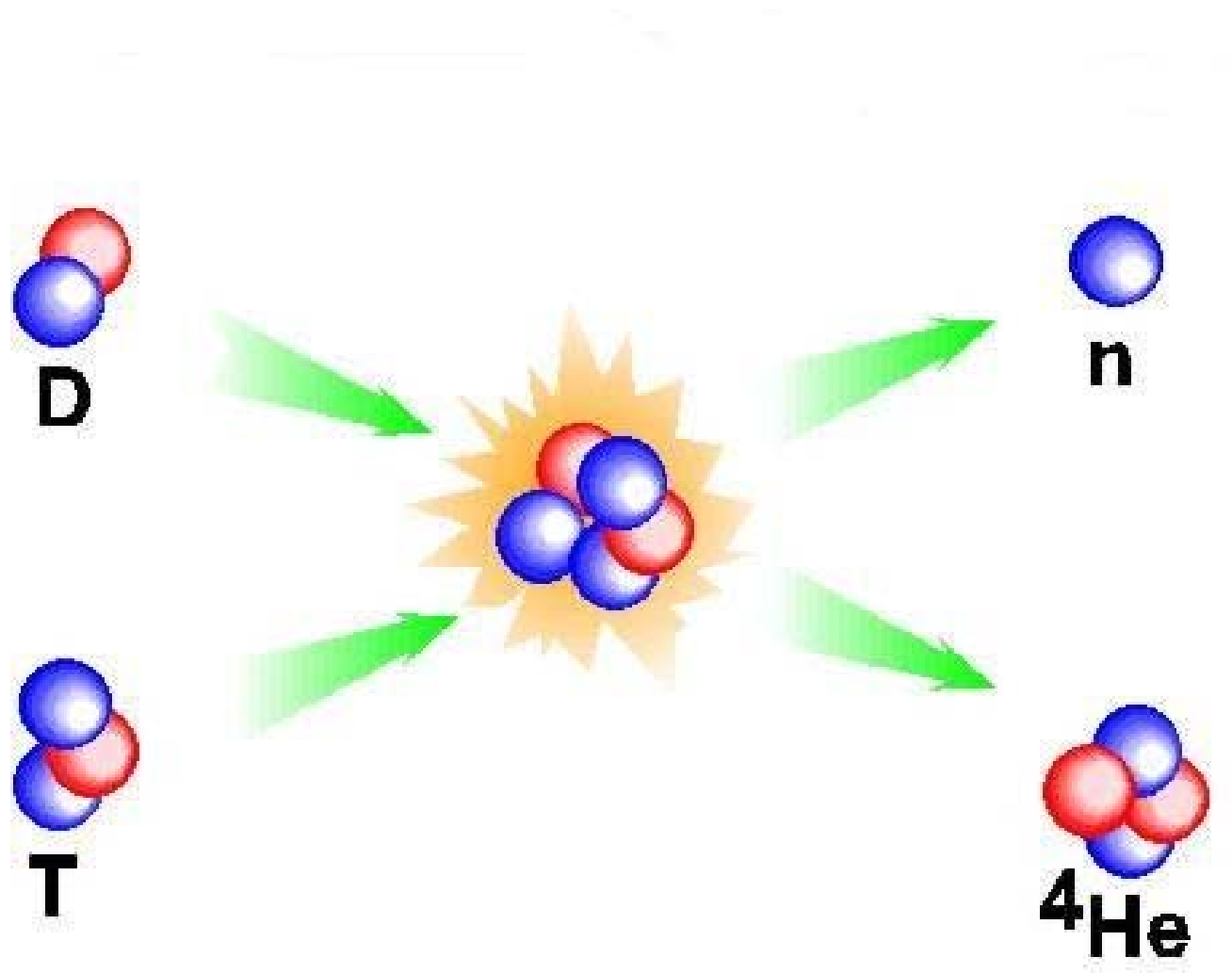
2. Omejevanje plazme

Če torej želimo pridobivati energijo s kontroliranim zlivanjem jeder, moramo torej plazmo dovolj dolgo omejevati pri zadostni gostoti in temperaturi. Jedrska fuzija je sicer proces, ki daje energijo Soncu in drugim zvezdam. V središču Sonca potekajo fuzijske reakcije pri temperaturi okoli **10 milijonov stopinj Celzija** in pri tlaku, ki je približno **10^9 -krat večji, kot na Zemlji**. Pri tako visoki temperaturi so vsi atomi popolnoma ionizirani. Snov je v stanju **plazme**. Pri tako visoki temperaturi so tudi hitrosti delcev zelo velike, vendar pa močna gravitacija, ki je posledica zelo velike Sončeve mase zagotovi, da atomska jedra ne uidejo v vesolje. Plazmo v Soncu in drugih zvezdah torej **omejuje gravitacija**.

Fuzija, oziroma zlivanje lahkih jeder v težja je proces, ki daje energijo Soncu in drugim zvezdam. Na Soncu poteka naslednja reakcija:



Na Zemlji pa merimo predvsem na reakcijo DT



Pri tej reakciji se sprosti okoli 17.6 MeV energije. Od tega helijevo jedro prevzame 3.5 MeV, nevtron pa 14.1 MeV energije. Energija nevtrona bo porabljena za pretvorbo v električno energijo. Helijevo jedro pa je nabito, zato ga magnetno polje zadrži v plazmi, kjer plazmo segreva. Če bi s fuzijskimi reakcijami nastajalo zadostno število helijevih jeder na enoto časa in na enoto volumna plazme, bi se torej lahko plazma sama ohranjala pri zadosti visoki temperaturi za potek fuzijskih reakcij.

Ker je gostota energije v gorivu zelo velika, bi elektrarna z močjo 1 GW letno potrebovala okoli 100 kg devterija in 3 t litija, proizvedla bi okoli 7 milijard kWh električne energije. Enakovredna termoelektrarna bi za to potrebovala okoli 1.5 milijona t premoga.

Devterija je v naravi dovolj in ni radioaktiven. V enem kubičnem metru vode je v povprečju 35 gramov devterija tako, da so zaloge devterija v oceanih praktično neizčrpne. Tritija v naravi ni in je radioaktiven. Njegova razpolovna doba je 12.6 let. Pridobivamo ga iz litija po naslednjih dveh reakcijah:



proizvodnja tritija



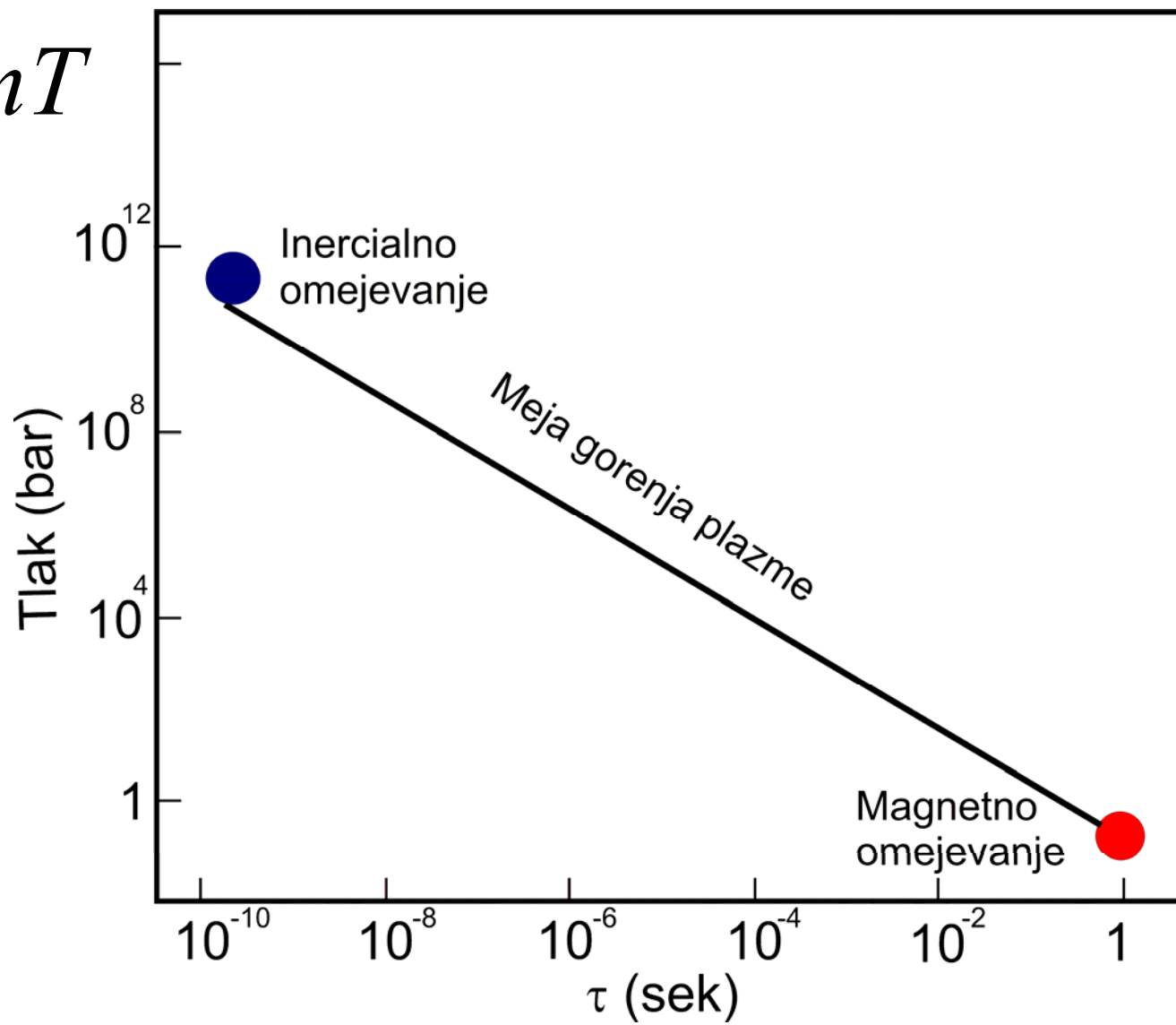
Če želimo, da bo plazma s sproščanjem energije pri fuzijskih reakcijah sama vzdrževala zadostno temperaturo za potek teh reakcij, je potrebno plazmo ohranjati dovolj dolgi in pri zadostni temperaturi in gostoti. Ključna količina, ki pove, kako blizu fuzijskim pogojem je plazma je torej produkt

$$n T \tau$$

Za potek fuzije mora biti temperatura plazme okoli 100 milijonov stopinj K. Tako vročo plazmo je potrebno omejevati, da ne pride v neposreden stik s stenami posode, kajti jasno je, da nobena stena posode iz kateregakoli materiala ne more vzdržati stika s takšno plazmo. Razvila sta se dva koncepta omejevanja plazme. Prvi je **inercialno ali vztrajnostno omejevanje**, drugi pa **magnetno omejevanje**, oziroma omejevanje plazme z magnetnim poljem.

Pri vztrajnostnem omejevanju skušamo doseči izredno visoko gostoto in tlak (čeprav za zelo kratek čas), pri magnetnem omejevanju pa težimo k daljšemu času omejevanja (pri nižji gostoti in tlaku).

$$p \propto nT$$





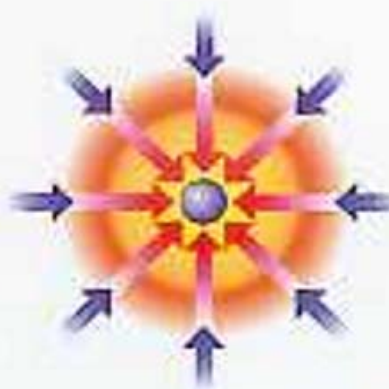
Formiranje plazemske atmosfere

Laserski žarki grejejo površino kroglice iz D in T. Površina kroglice izpareva in nastaja plazemska atmosfera



Kompresija

Plazemska atmosfera, ki se radialno širi, stiska preostali D in T v kroglici.



Vžig

Gostota DT doseže 20 kratno gostoto svinca, temperatura pa zraste 100 mil. K



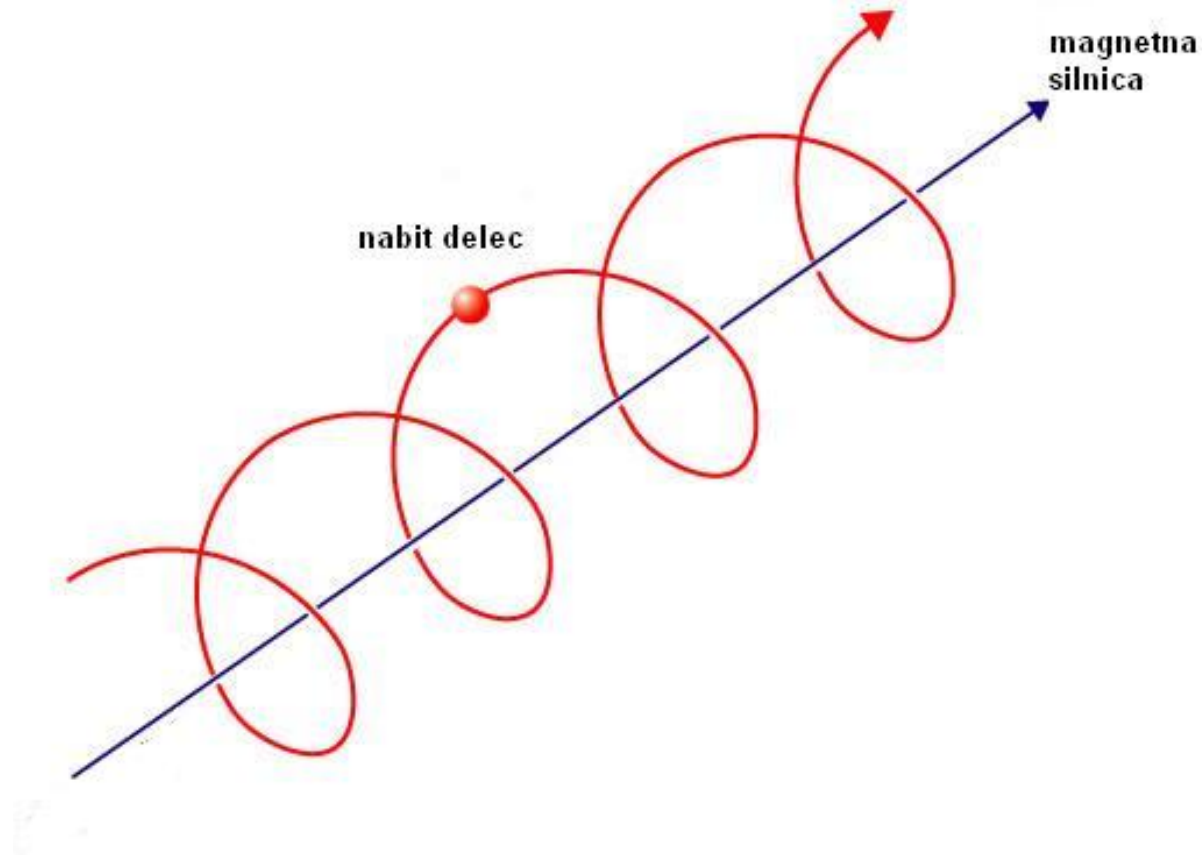
Gorenje

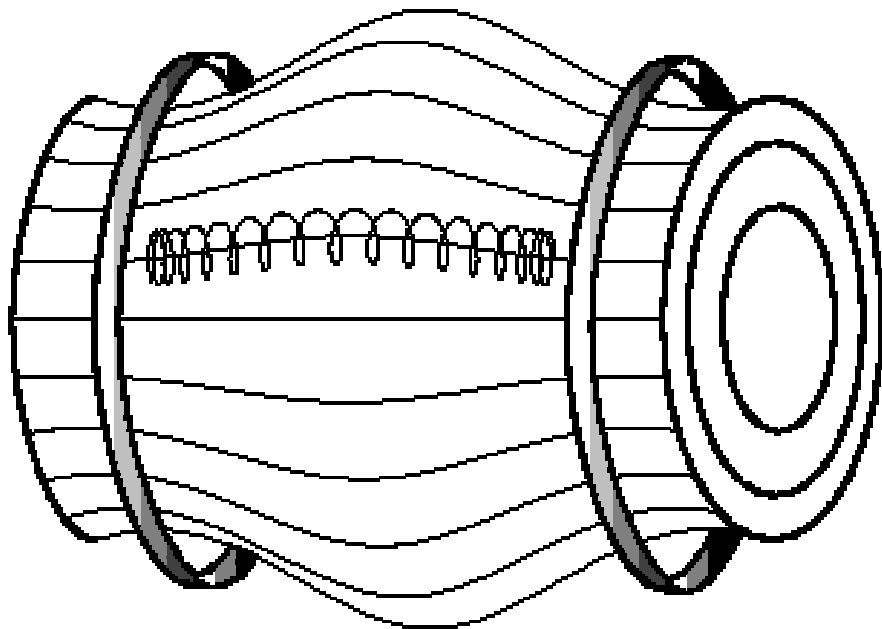
Stisnjeno gorivo eksplodira kot mikrofuzijska bomba

Zaradi uporabe močnih laserjev in mikro fuzijskih eksplozij so te raziskave zelo vojaško uporabne in potekajo v veliki meri v tajnosti.

Evropski civilni fuzijski program je zato usmerjen v magnetno omejevanje plazme.

Koncept magnetnega omejevanja plazme temelji na znanem dejstvu, da se nabiti delci okoli magnetnih silnic gibljejo po vijačnici:





Prvi poskusi z magnetnim omejevanjem plazme so potekali v linearnih napravah, kjer so uhajanje plazme na obeh koncih skušali preprečiti z magnetnimi zrcali.



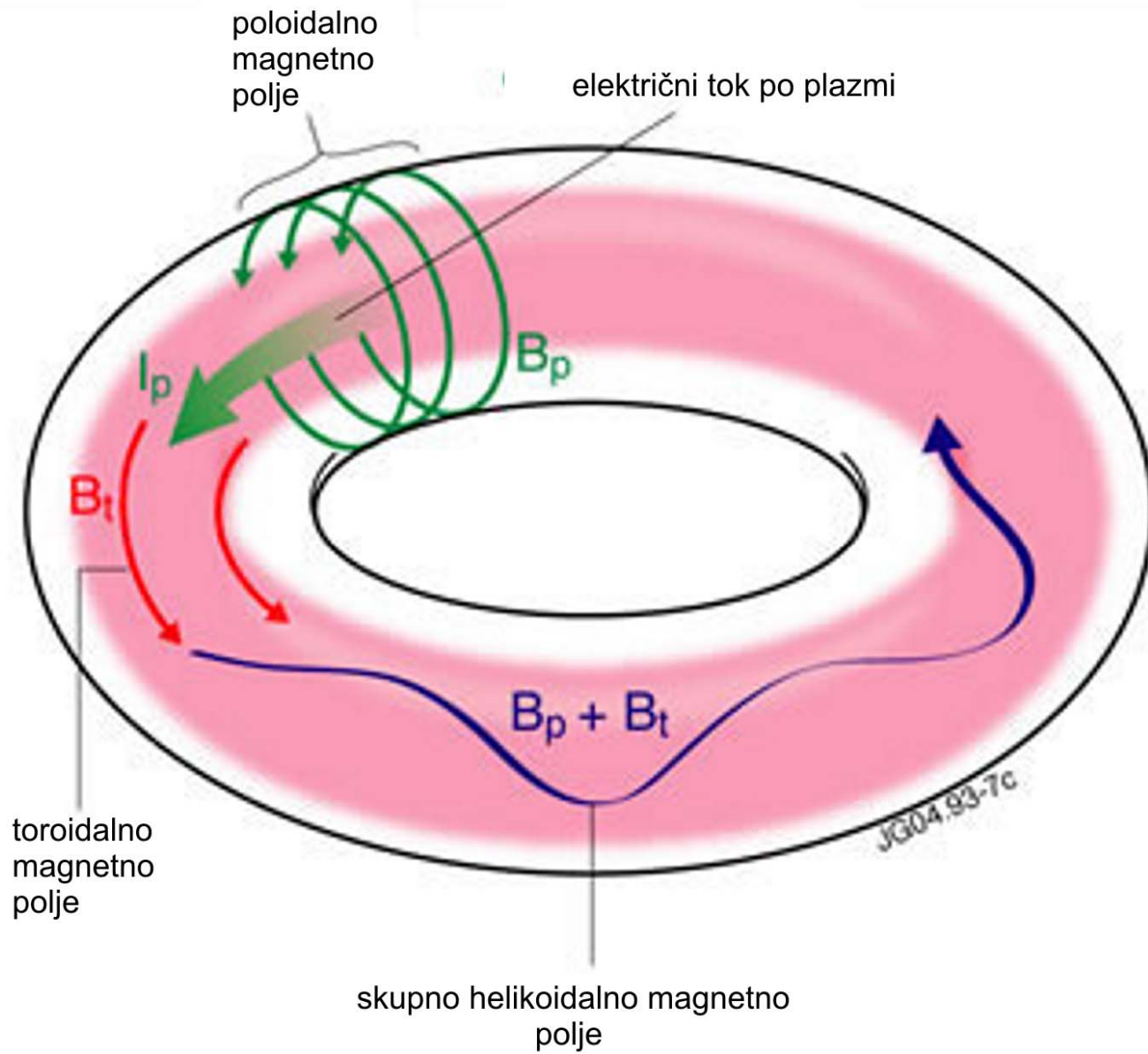
Magnetna zrcala pa žal ne morejo ujeti preveč hitrih delcev. Zato se je kmalu pojavila misel, da bi linearno napravo sklenili v torus. Magnetno polje v torusu je nujno nehomogeno. Zaradi tega prihaja do lezenja oziroma drifta nabitih delcev. To pomeni, da vodeči center ciklotronskega kroženja delca okoli magnetne silnice počasi leze.

Problematična sta predvsem dva drifta. Prvi je $\mathbf{B} \times \text{grad}B$ drift, drugi pa krivinski drift. Hitrost lezenja vodečega centra podajata formuli:

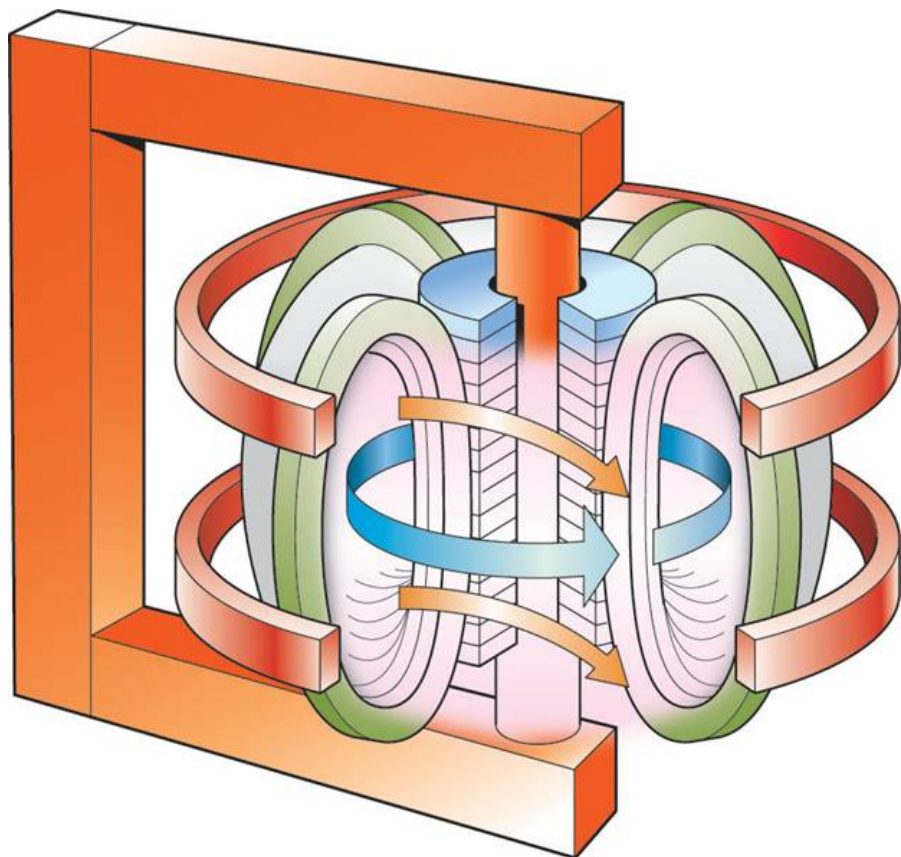
$$\mathbf{v}_{\nabla B} = \frac{mv_{\perp}^2}{2qB^3} (\mathbf{B} \times (\nabla B)).$$

$$\mathbf{v}_R = \frac{mv_{\parallel}^2}{qB^2} \frac{\mathbf{R}_c \times \mathbf{B}}{R_c^2}.$$

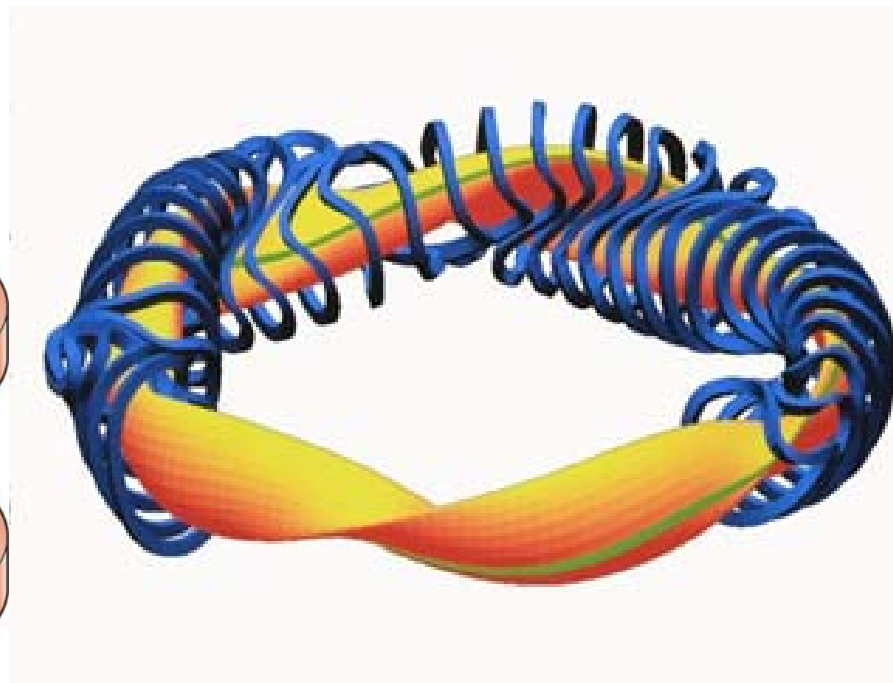
Ker je vsako ukrivljeno magnetno polje vedno tudi nehomogeno, se oba drifta vedno pojavljata skupaj, njuna učinka pa se seštevata. Oba delce z različnima predznakoma nabojev potiskata v različne smeri tako, da ustvarjata električni tok po plazmi. Te težave se da precej ublažiti, če toroidalni komponenti magnetnega polja dodamo še poloidalno in tako dobimo magnetne silnice, ki so spiralno zvite okoli torusa:



Magnetne silnice je mogoče zviti v helikoidalno obliko tako, da poloidalno komponento magnetnega polja ustvaraj predvsem električni tok po sami plazmi ali pa z zunanjimi navitji. Dva glavna koncepta magnetnega omejevanja sta **tokamak** in **stelarator**.

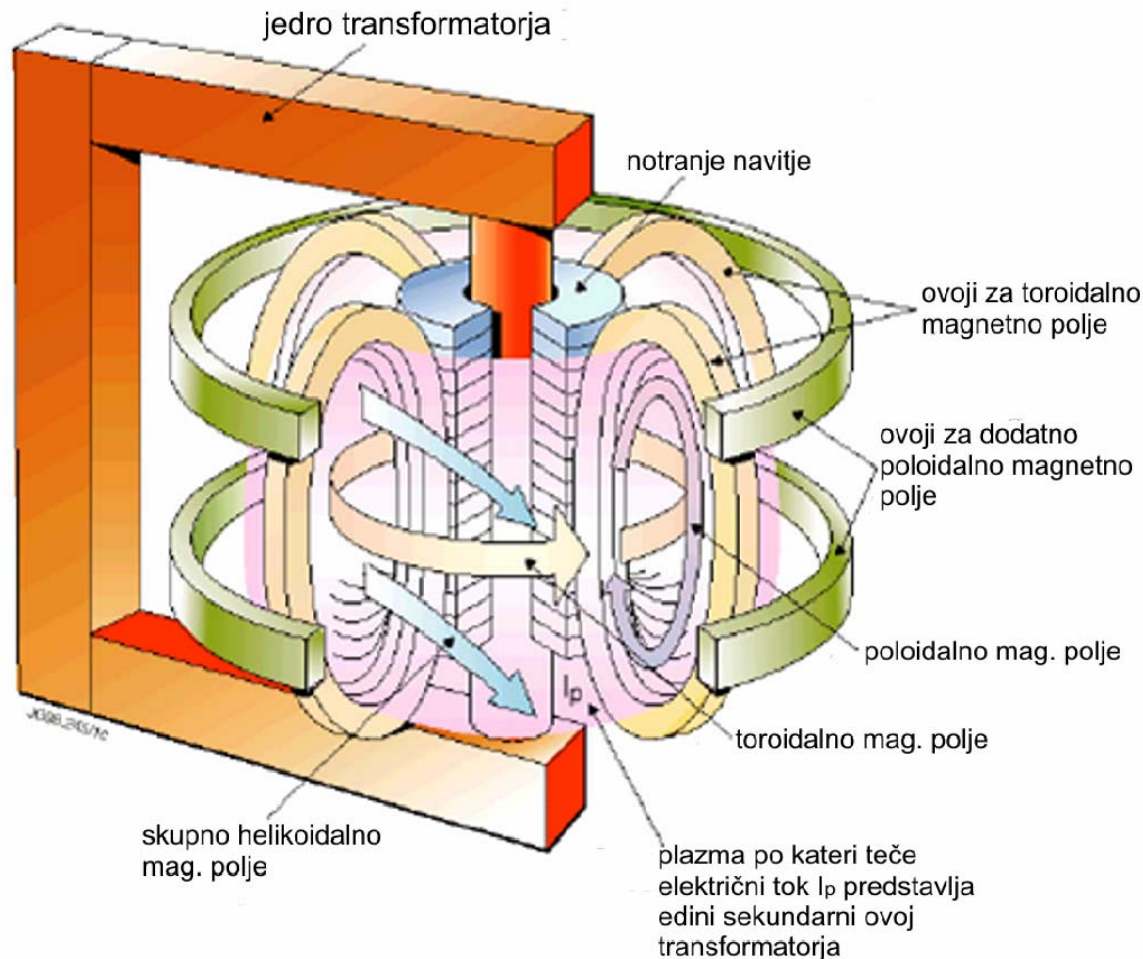


tokamak



stelarator

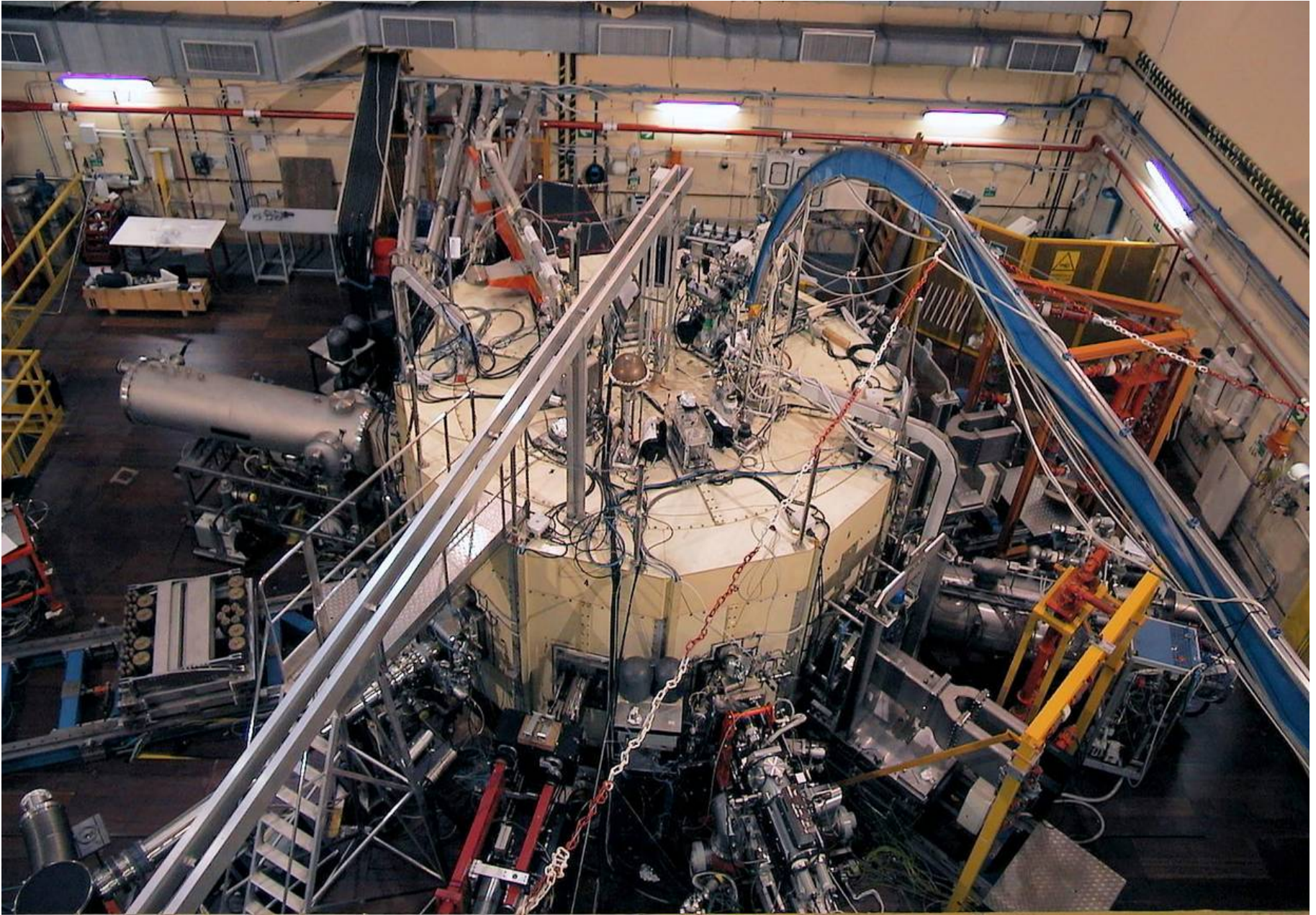
Od naštetih konceptov je trenutno najuspešnejši in najbolj perspektiven **tokamak**. Ime je kratica ruskega imena **toroidalna kamera** in **magnetna katuška** – toroidalna posoda in magnetni ovoj. Magnetno polje v tokamaku je osno simetrično. Plazma v torusu predstavlja edini sekundarni ovoj transformatorja. Plazmo vžgemo z induciranim napetostnim sunkom.

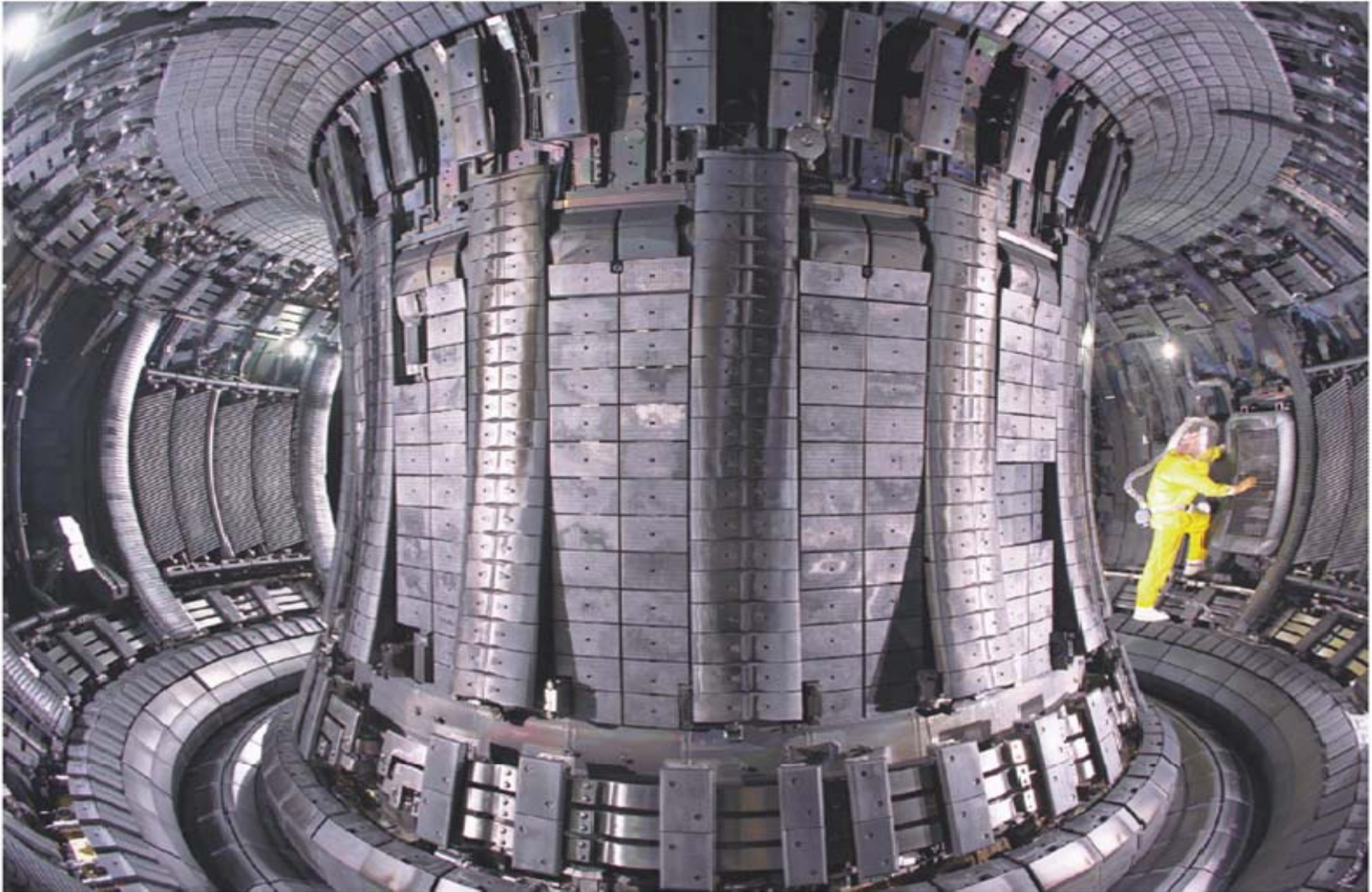


Najpomembnejši tokamaki na svetu

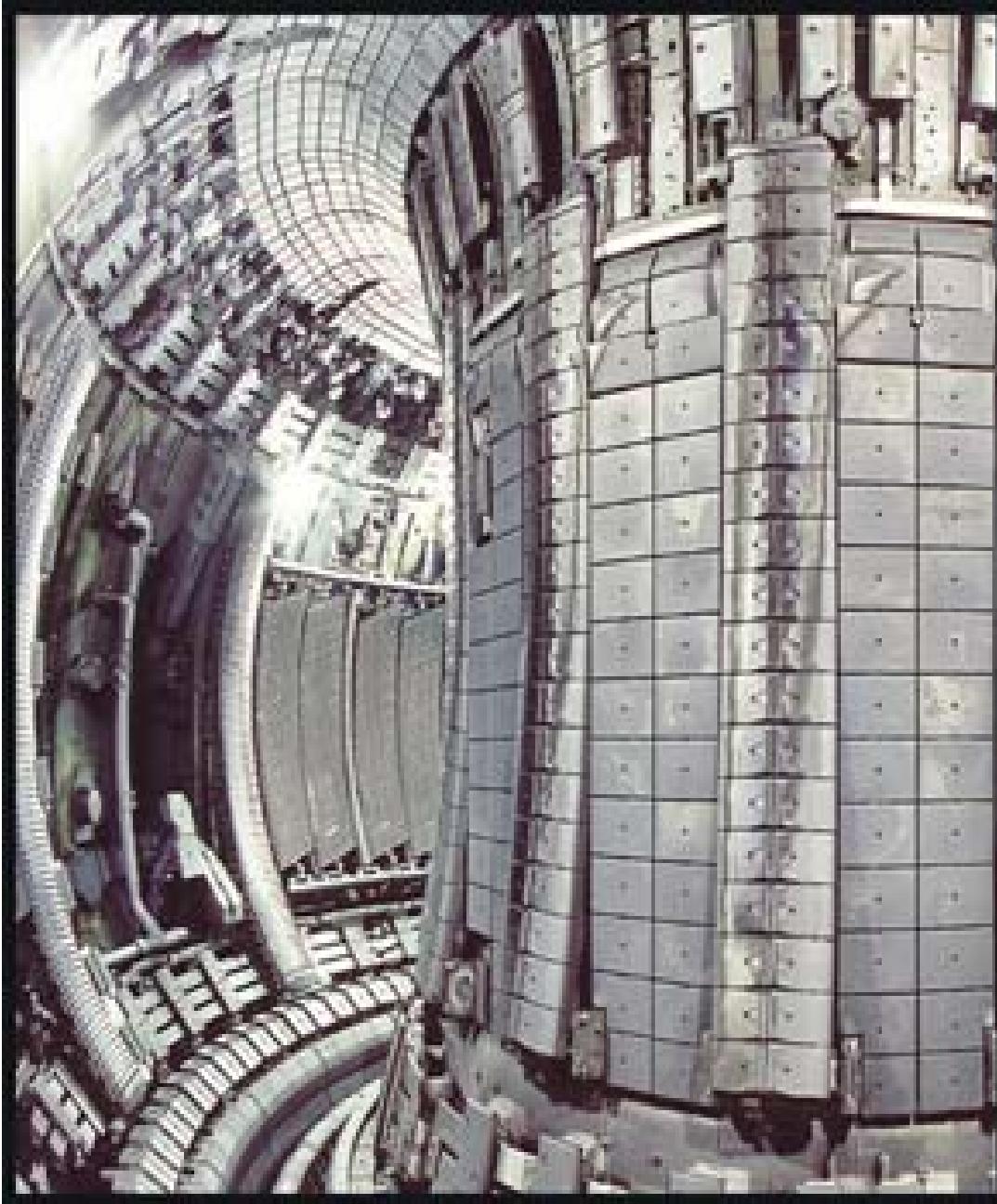
tokamak	Tore Supra Francija	Asdex Upgrade Nemčija	Textor Nemčija	JET EU v Veliki Brit.	TFTR ZDA (zaprt)	DIID ZDA	JT-60U JP
Glavni polmer	2.36 m	1.65 m	1.75 m	2.96 m	2.48 m	1.67 m	3.45 m
Toroidalno polje na glavnem obsegu	4.5 T	4 T	2 T	3.45 T	5.2 T	2.2 T	4.4 T
Tok po plazmi	1.7 MA	1.6 MA	0.65 MA	7 MA	2.5 MA	3.5 MA	5 MA

FTU – Frascati, Italija



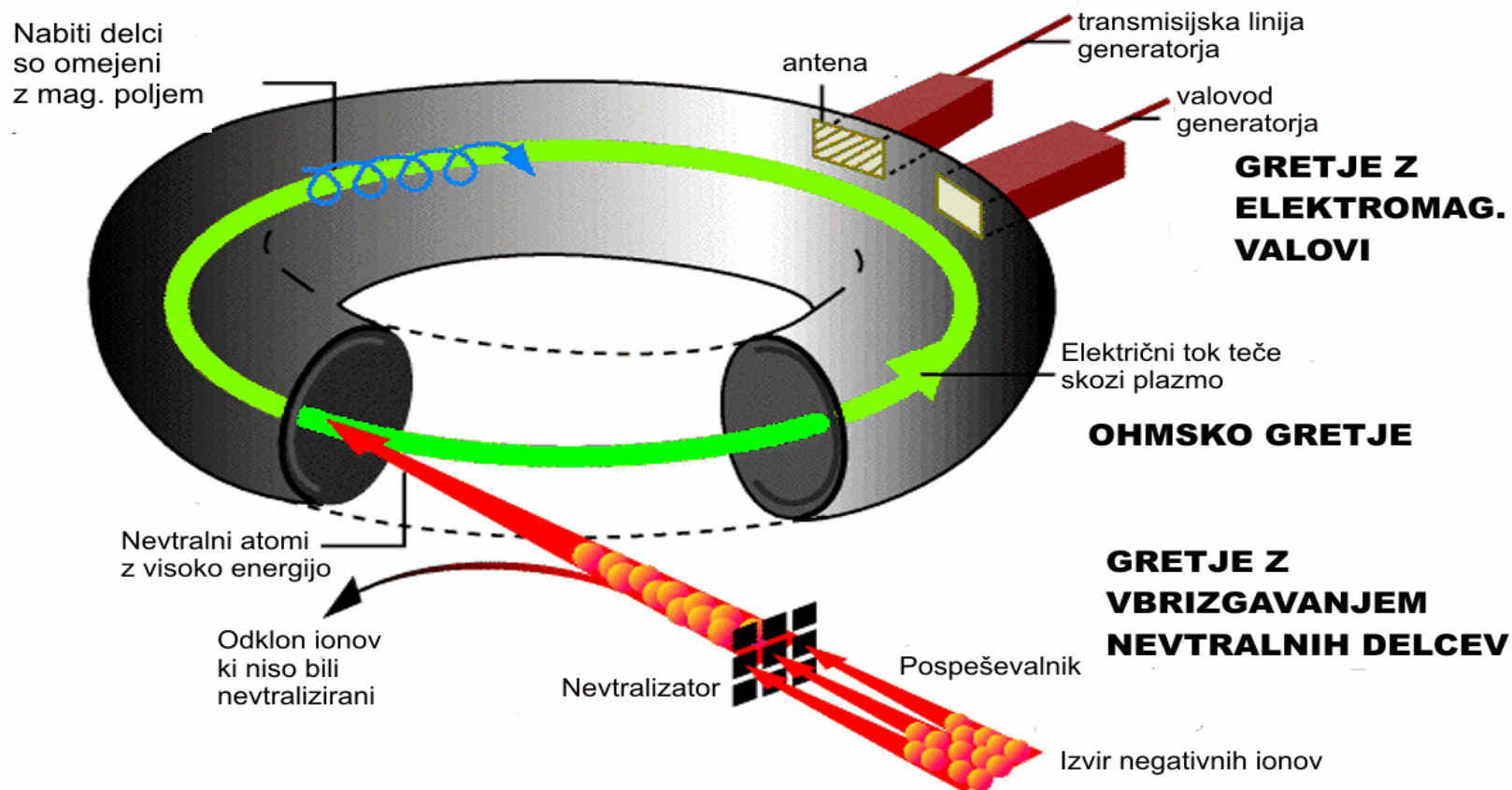


JET Joint Undertaking
Abingdon, Oxfordshire OX14 3EA



Ker je za fuzijo potrebna izredno visoka temperatura, je plazmo po vžigu potrebno dodatno segrevati. Načini gretja plazme v tokamaku so trije:

- Ohmsko gretje – ni zadostno, ker prevodnost plazme narašča s temperaturo
- Gretje z elektromag. valovi
- Gretje z vbrizgavanjem curkov nevtralnih atomov z veliko energijo



Električni tok, ki teče skozi plazmo v tokamaku, plazmo tudi ohmsko greje. Ko se temperatura plazme zvišuje, postaja ohmsko gretje vse manj učinkovito, kajti električna prevodnost plazme narašča sorazmerno s temperaturo plazme na $3/2$.

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}, \quad \sigma \propto T^{\frac{3}{2}}$$

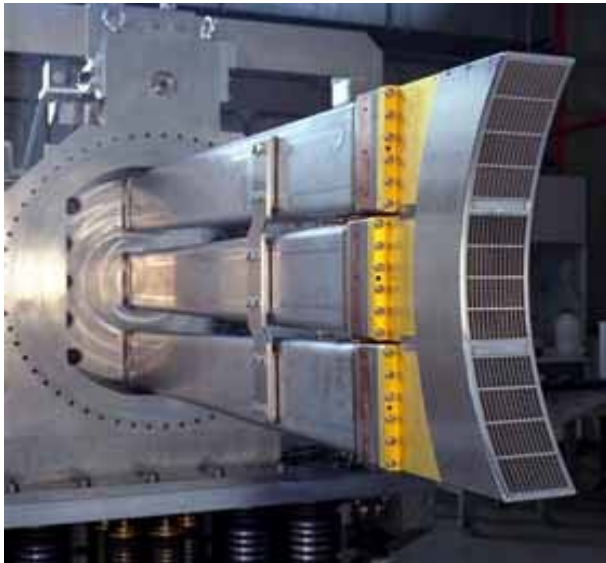
Zato lahko z ohmskim gretjem dosežemo temperature le do nekaj milijonov stopinj Celzija. Zato je potrebno plazmo dodatno segrevati.

1) Prvi način dodatnega gretja je ta, da v plazmo pošiljamo visokoenergijske elektromagnetne valove, ki svojo energijo predajo plazmi preko resonančne absorpcije. Frekvence elektromagnetnih valov so naravnane na resonanco s tremi značilnimi frekvencami v plazmi in sicer: **ionsko ciklotronsko resonančno gretje** od 20 MHz do 55 MHz, **elektronsko ciklotronsko resonančno gretje** od 100 do 200 GHz ter **resonančno gretje pri spodnji hibridni frekvenci** od 1 – 8 GHz. Spodnja hibridna frekvenca je koren iz produkta ionske in elektronske ciklotronske frekvence.

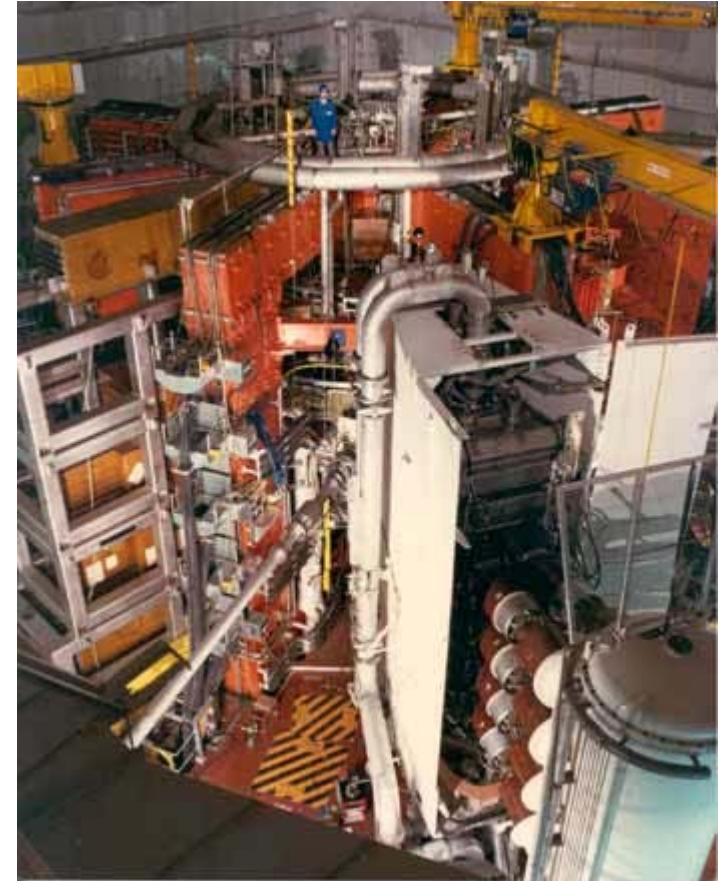
2) Drugi način dodatnega gretja pa je vbrizgavanje visoko energijskih curkov nevtralnih delcev. Ti potem predajo energijo plazmi preko trkov z ioni.



Antena za oddajanje elm. valov pri ionski ciklotronski frekvenci na JET-u, frekvenčno območje od 20 do 55 MHz

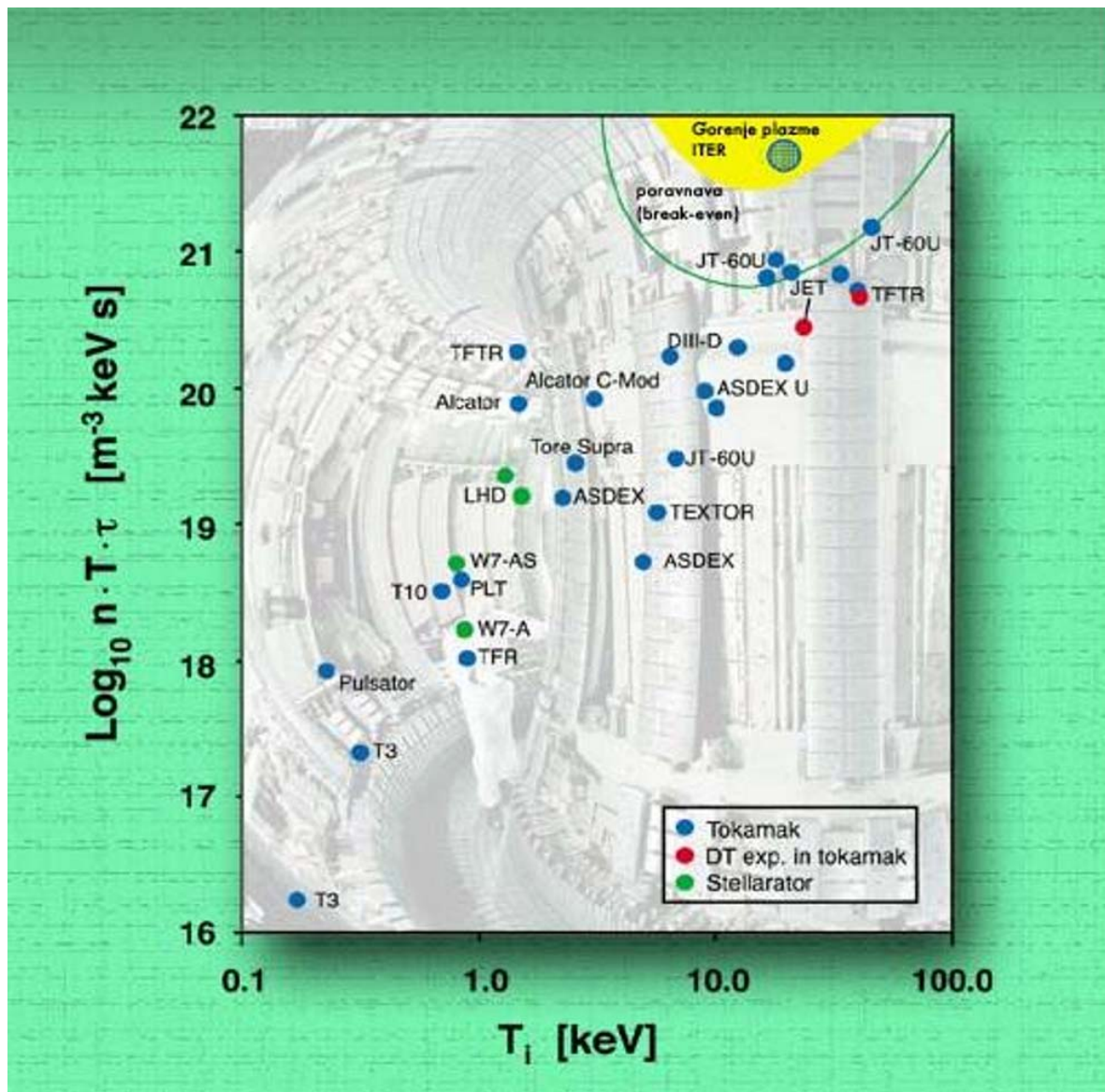


Antena za oddajanje pri spodnji hibridni frekvenci 1 – 8 GHz



Sistem za NBI na JET-u.

Merilo za to, kako blizu fuzijskim pogojem je plazma, je produkt gostote, temperature in časa omejevanja $nT\tau$

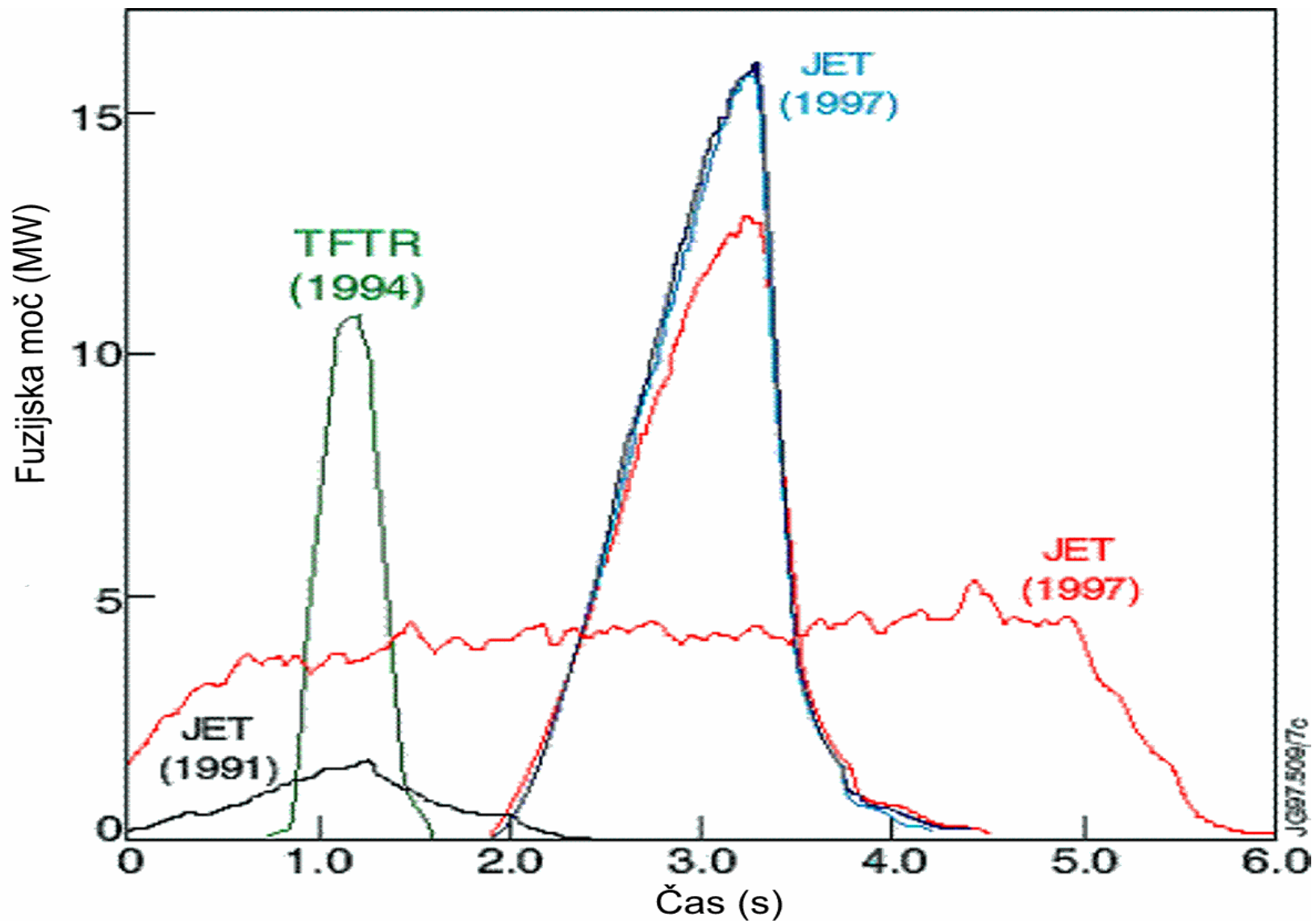


Z DT plazmo sta doslej opravila poskuse samo dva tokamaka to sta ameriški TFTR in evropski JET.

JT60U in JET sta že dosegla poravnavo, $Q = 1$

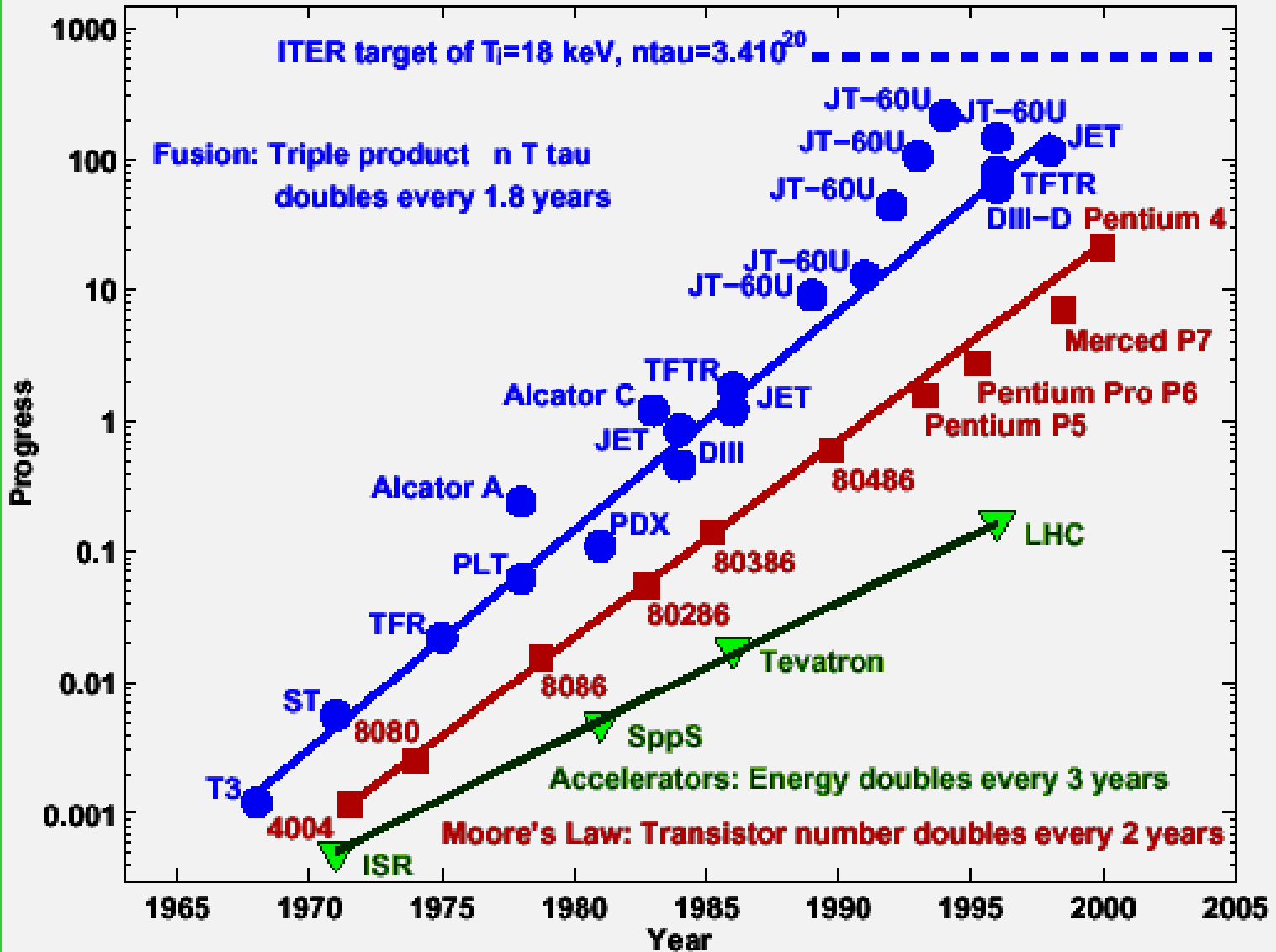
$$Q = \frac{\text{sproščena moč pri fuziji}}{\text{vložena moč za gretje plazme}}$$

ITER naj bi dosegel $Q = 10$, komercialna elektrarna bo morala doseči $Q = 50$.



Sproščena fuzijska moč v pulzih v TFTR in JET.

Rapid progress in different high technology fields

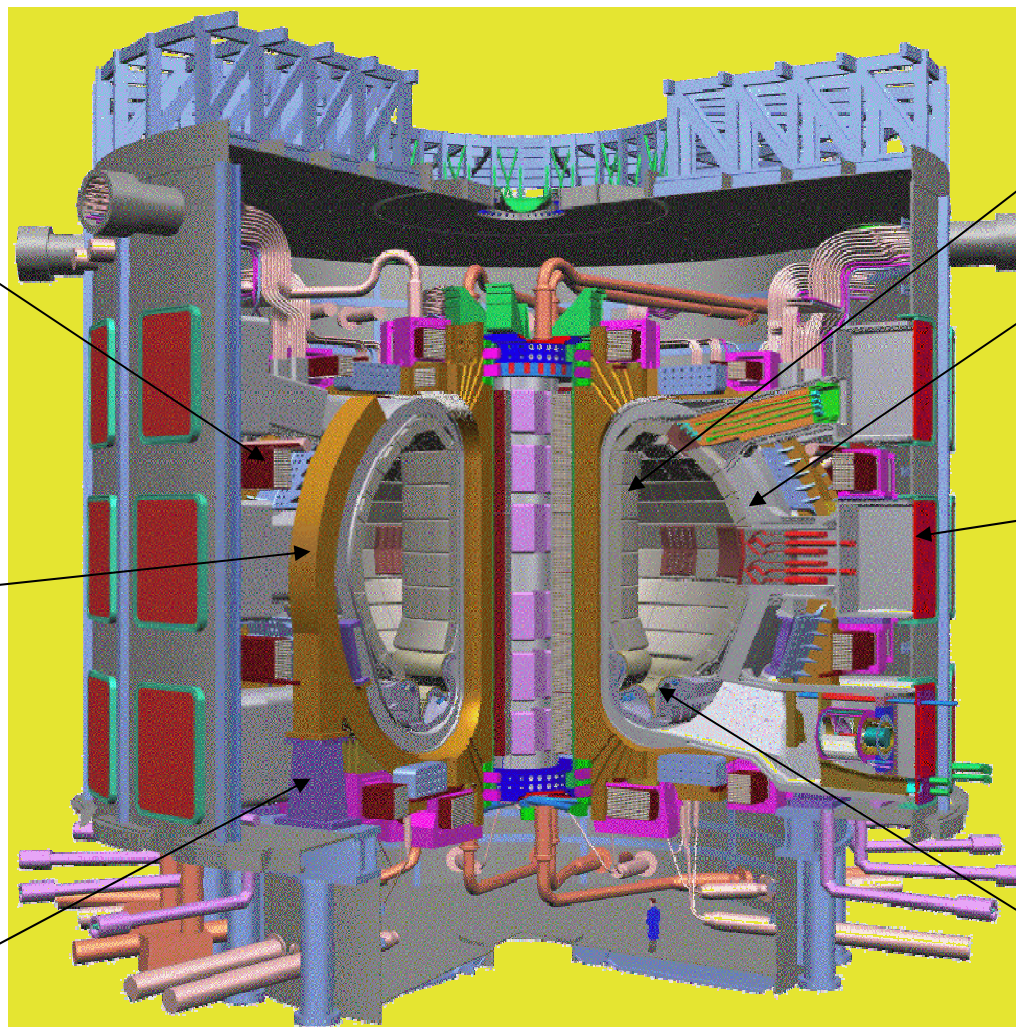


Tokamak naslednje generacije, katerega gradnja se bo pričela kmalu, je **ITER**

Ovoj za poloidalno mag. polje

Ovoj za toroidalno mag. polje

nosilec



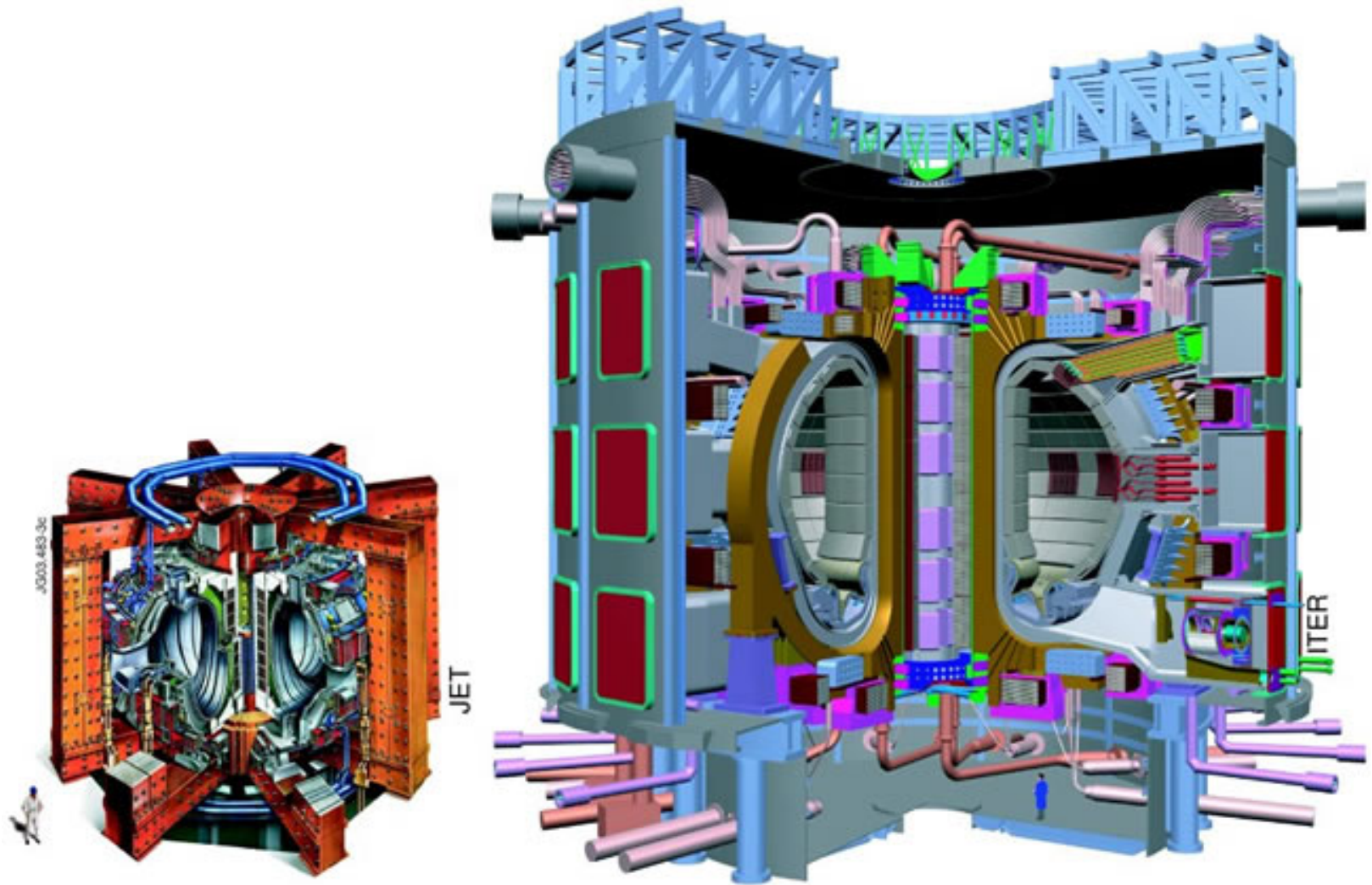
obloga

Stena vakuumske posode

kriostat

divertor

Primerjava JET-a, ki je trenutno največji tokamak na svetu in ITER-ja.



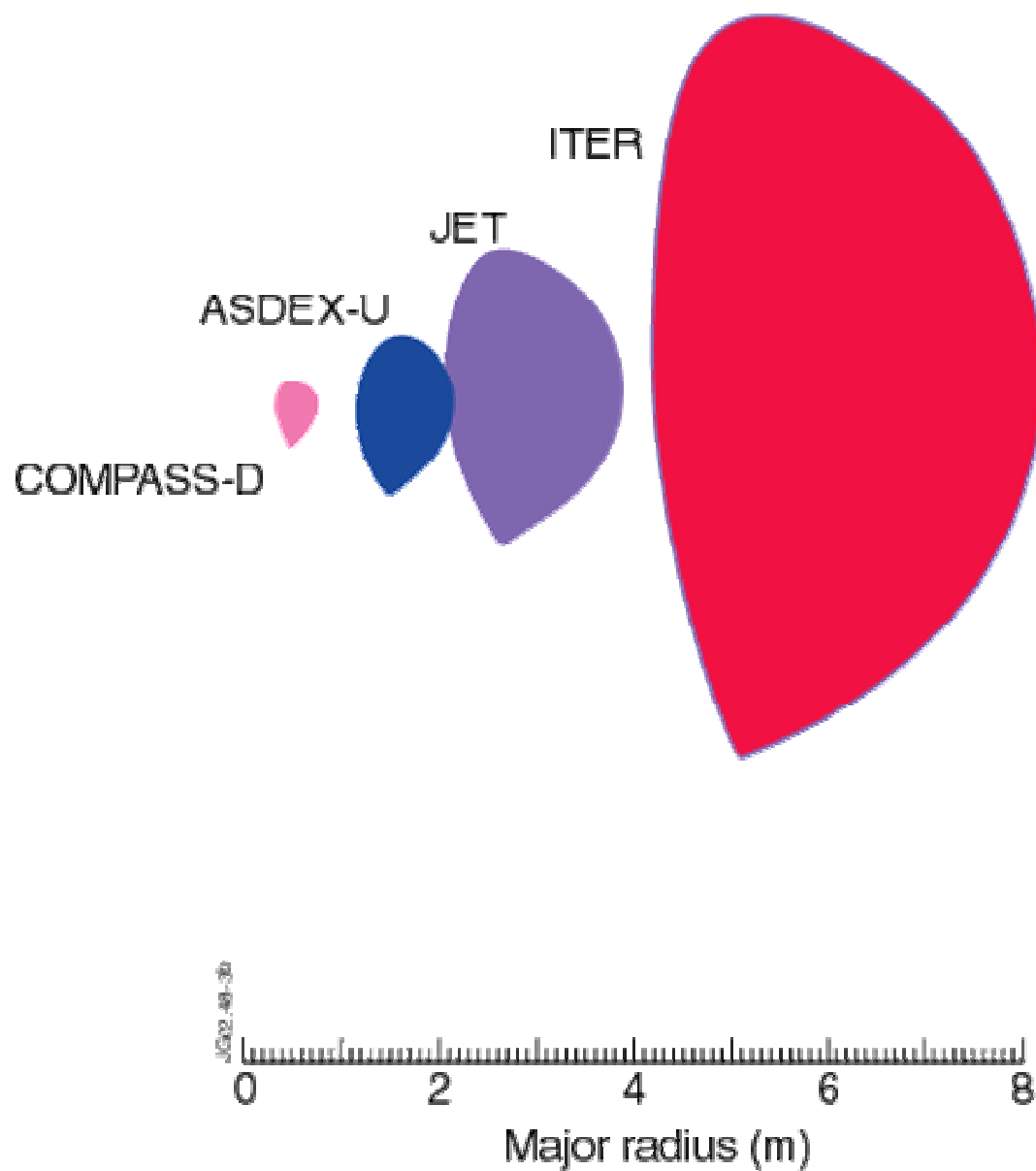
Nekaj osnovnih parametrov ITER-ja je v naslednji tabeli:

Parameter	Vrednost	Parameter	Vrednost
Mali polmer	2.0 m	Vgrajena moč za grejje plazme	73 MW
Veliki polmer	6.2 m	Trajanje pulza	400 s
Prečni raztezek plazme	1.85	Gostota elektronov	$1.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$
Toroidalno mag. polje na glavnem obsegu	5.3 T	ionska temperatura	8.9 keV
Tok po plazmi	15 MA	Fuzijska moč	500 MW

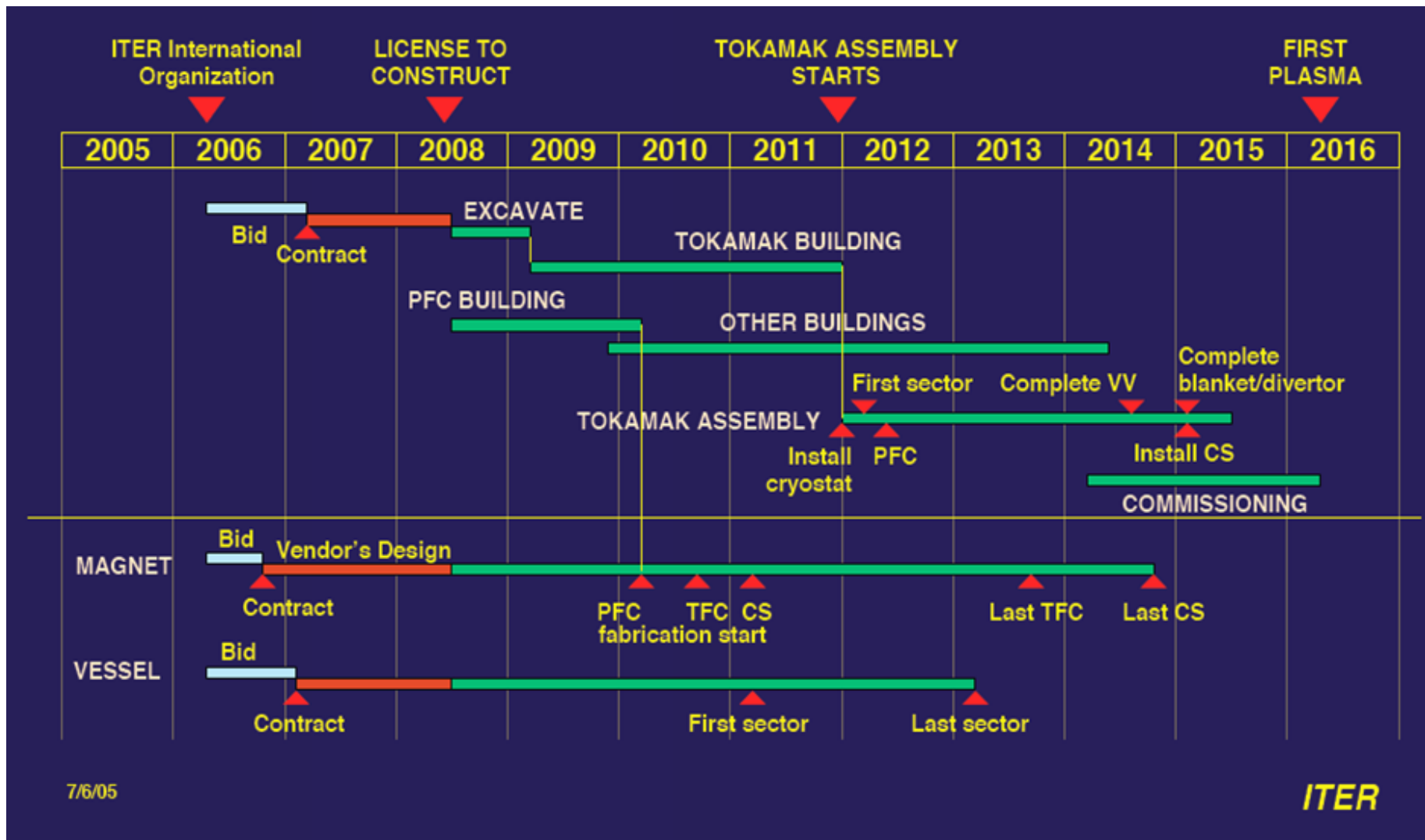
Primerjava prereza ITER-
jeve plazme z obstoječimi
tokamaki



Kaname Ikeda



Terminski načrt za gradnjo ITER-ja:



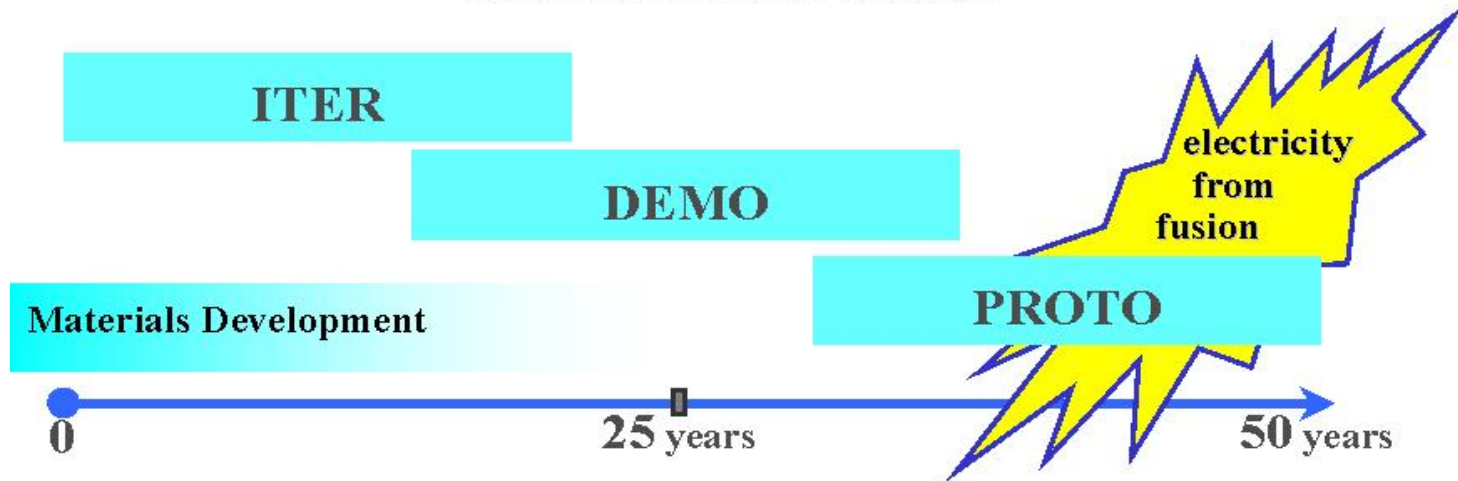
Zelo grob okvirni časovni načrt za delovanje ITER-ja je takle:

- Prva plazma leta 2016
- 2016 – 2018 eksperimenti s H plazmo (da ne bi takoj kontaminirali sten)
- 2019 devterijeva plazma
- 2020 začetek poskusov z D – T plazmo. Do leta 2025 naj bi postopoma dosegli 400 s dolge pulze s 500 MW sproščene fuzijske moči in razmerje med sproščeno fuzijsko močjo in vloženo močjo za gretje plazme $Q = 10$.

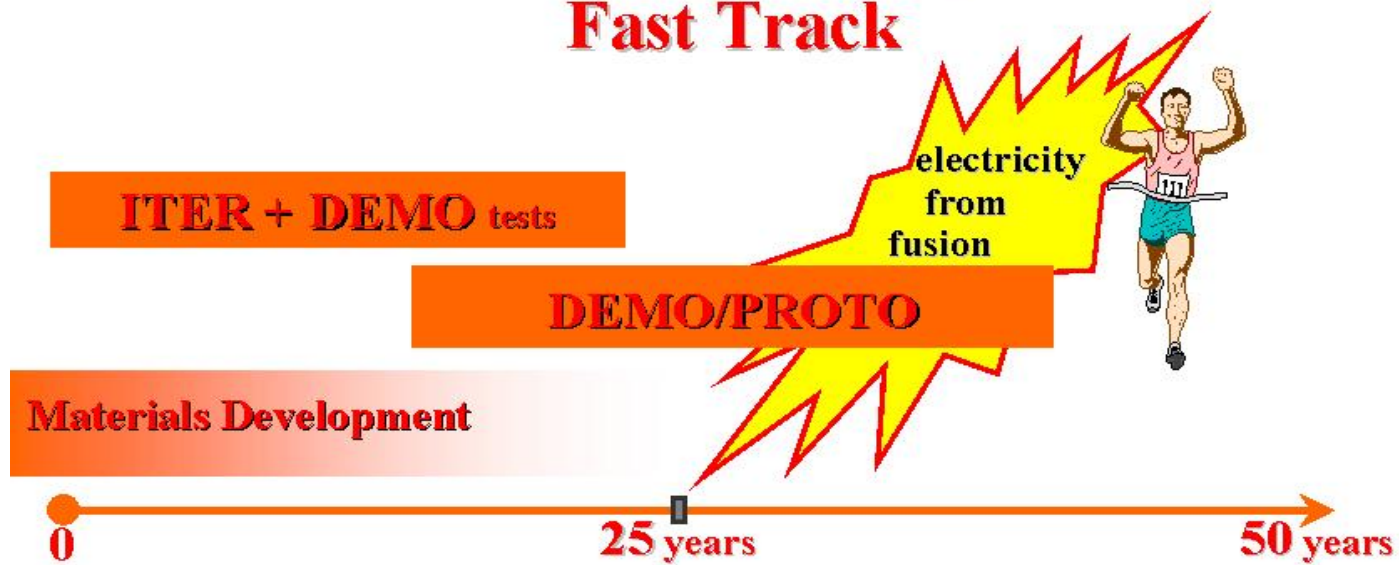
ITER še ne bo elektrarna. Fuzijska energija, ki jo bo ustvarjal se ne bo pretvarjala v kakšno drugo obliko. ITER-ju naj bi sledil naslednji korak DEMO, ki naj bi demonstriral možnost pridobivanja elektrike iz fuzijske elektrarne.

V odvisnosti od uspešnosti ITER-ja in od razmer na trgu energije predvidevajo dva časovna scenarija do komercialnih fuzijskih elektrarn. Hitrejši predvideva fuzijsko elektriko čez 25 - 30 let počasnejši pa čez 40 - 50 let.

Conventional Track



Fast Track



Fuzija v Evropi in Sloveniji

Fuzijske raziskave v Evropi so zgodba o več kot 40 letih stalnega napredka. Omenimo nekaj ključnih letnic iz zgodovine:

1958: Podpisana pogodba Euroatom. V pogodbi med drugim piše tudi: “...preučevanje fuzije s posebnim poudarkom na raziskavah vedenja ionizirane plazme pod vplivom elektromagnetnih sil...”

1978: Svet ministrov EU sprejme odločitev o izgradnji JET-a, ki je zaenkrat še vedno največji tokamak na svetu

1988: Svet ministrov EU sprejme odločitev o pričetku razvoja magnetizirane fuzijske naprave nove generacije (ITER)

1997: JET v približno 2 sekundi dolgem pulzu doseže 16 MW fuzijske moči z D-T plazmo

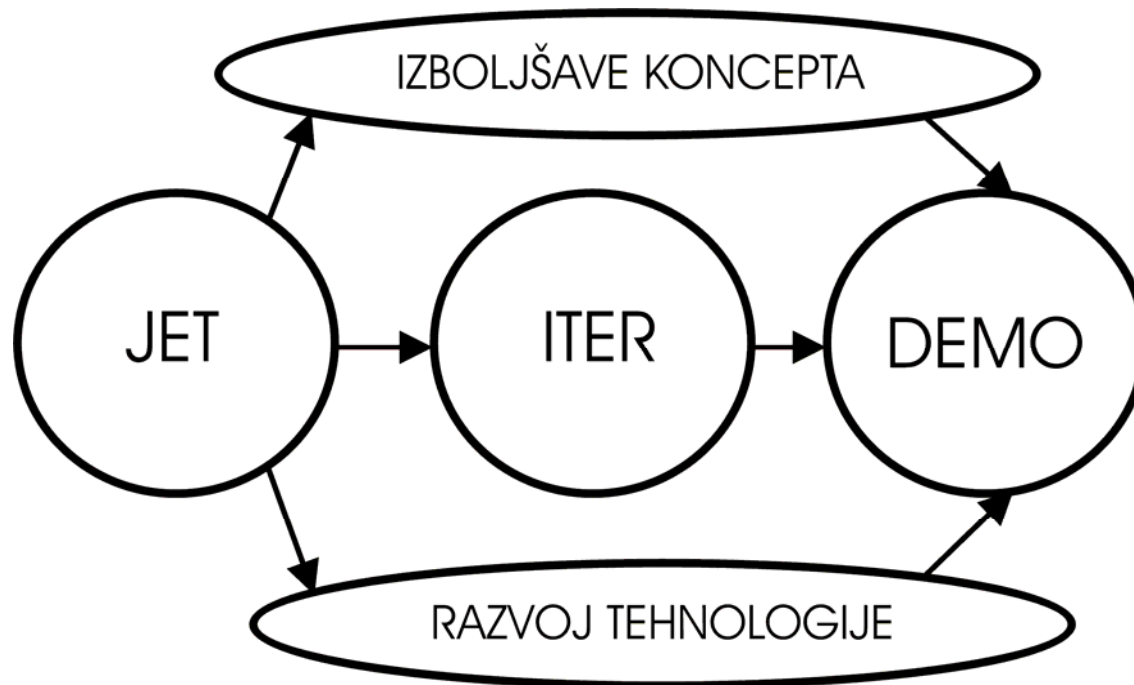
1999: Sklenjen evropski sporazum o razvoju fuzije (**E**uropean **F**usion **D**evelopment **A**greement)

2001: Dokončani so načrti za ITER

2005: po dolгих pogajanjih je julija dosežen sporazum o tem, da bodo ITER začeli graditi v mestu Cadarache v Franciji

Evropa ima tako danes glede fuzije jasen strateški cilj. To pa je skupna graditev prototipnih fuzijskih reaktorjev za proizvodnjo električne energije, ki bi delovali varno, bi bili prijazni do okolja in ekonomsko konkurenčni drugim načinom proizvodnje elektrike.

Evropa ima tudi enotno strategijo, ki jo lahko opišemo takole: najprej gradnja eksperimentalnega reaktorja (ITER), temu naj sledi gradnja demonstracijske elektrarne (DEMO). Vzporedno potekajo raziskave na izboljševanju koncepta in na razvoju tehnologije.



Poleg raziskav povezanih z ITER-jem poteka veliko razvojno raziskovalnega dela tudi za fuzijski reaktor DEMO. Evropske študije oplodne obloge, v kateri nastaja tritij, so usmerjene v svinec-litijevo oblogo, ki bo hlajena s helijem in na keramične oplodne kroglice prav tako hlajene s helijem. Te raziskave so bisvenega pomena za razvoj tritijevega cikla v fuzijskem reaktorju.

Evropske raziskave strukturnih materialov so usmerjene predvsem v feritna in martenzitna jekla (EUROFER), ki se pri obsevanju z nevtroni manj aktivirajo. Za DEMO pa že poteka razvoj keramičnih materialov na osnovi kompozitov silicijevega karbida.

Velika pozornost se posveča varnosti in vplivu na okolje. Osnovna prednost je majhna aktivacija materialov, kar omogoča izgradnjo fuzijskega reaktorja na tak način, da v primer nesreče ne bo potrebna evakuacija okoliškega prebivalstva. V številnih socio-ekonomskih študijah raziskujejo ekonomsko upravičenost in dolgoročno perspektivo fuzijskih reaktorjev.

Evropa ima tudi enoten fuzijski program, v katerega so včlanjene članice EU ter Švica:



Ta program vključuje okoli 2000 raziskovalcev in inženirjev v fuzijskih laboratorijih in v industriji, odvija pa se v okviru EFDA.

Evropski sporazum o razvoju fuzije (kratica od angleških besed **E**uropean **F**usion **D**evelopment **A**greement - EFDA) je bil ustanovljen leta 1999 kot okvirna pogodba med EURATOM-om in njegovimi partnerji na področju fuzije (te partnerje na kratko imenujemo Asociacije).

Ta sporazum je del dolgoročnega programa sodelovanja, ki pokriva vse dejavnosti na področju fuzijskih raziskav v plazmi, omejeni z magnetnim poljem, v Evropski uniji in Švici.

EFDA vključuje naslednje tri med seboj povezane dejavnosti:

1) tehnološke dejavnosti, ki jih izvajajo Asociacije in evropska industrija, 2) usklajevanje skupne uporabe JET-a po letu 1999 in 3) usklajevanje evropskega sodelovanja v širših mednarodnih projektih, kakršen je na primer ITER.

Namen EFDA je krepiti koordinacijo dela med Asociacijami. V obdobju 6. okvirnega raziskovalnega programa (2002-2006) je znašal proračun EFDA 750 milijonov evrov.

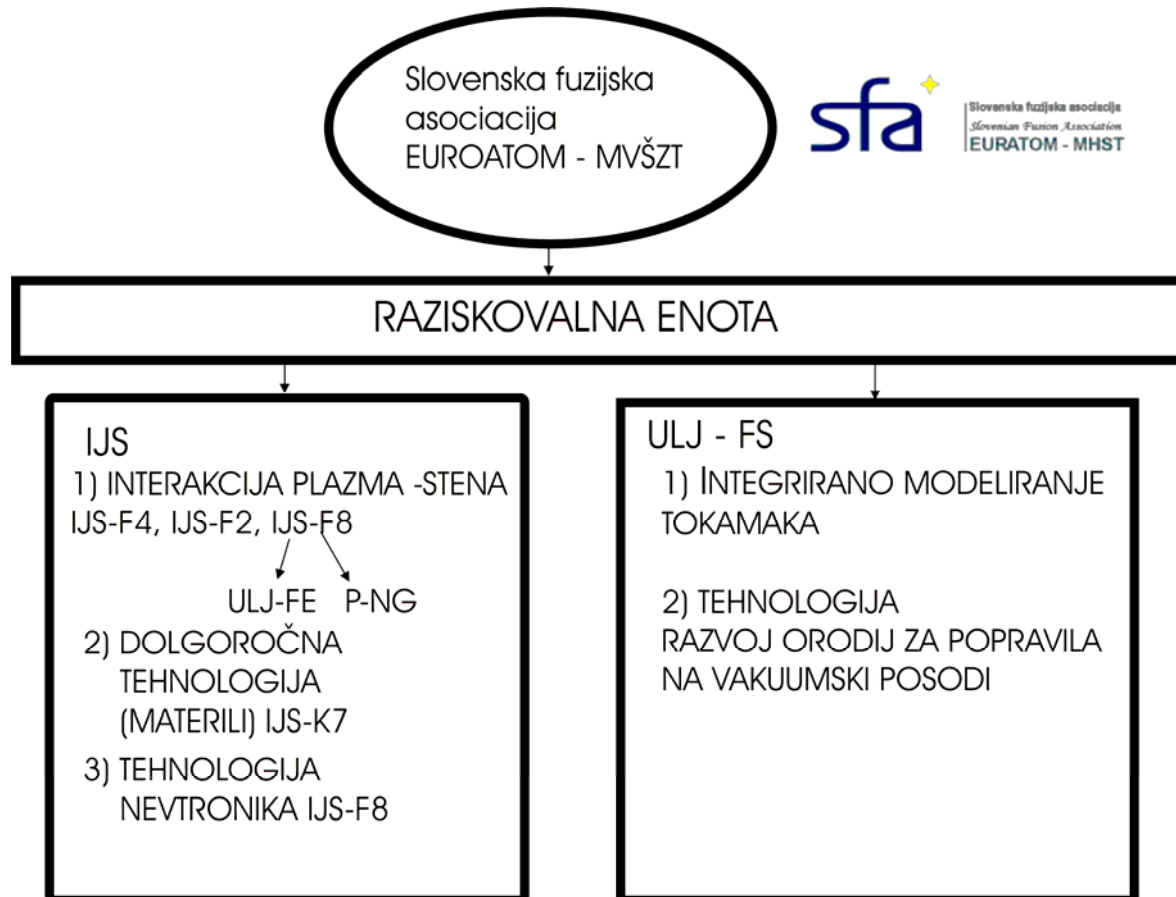
Vodji EFDA, pomočniku vodje EFDA za tehnologijo in pomočniku vodje EFDA za JET pri delu pomagata dve ekipi ožjih sodelavcev (Close Support Units). Ena ekipa ima sedež v Max-Planck Inštitutu za fiziko plazme v Garchingu v Nemčiji, druga pa v laboratoriju UKAEA v Culhamu v Veliki Britaniji.

Ti dve ekipi zagotavljata, da je sodelovanje velikega števila znanstvenikov in inženirjev iz ustanov v Asociacijah usklajeno s skupnim evropskim fuzijskim programom, pa naj gre za eksperimente na JET-u, tehnološke raziskave in razvoj ali za naloge v zvezi z ITER-jem.

EFDA vodi nadzorni odbor (Steering Committee), ki je sestavljen iz predstavnikov Asociacij. Ta odbor je odgovoren za načrtovanje in nadzor vseh dejavnosti EFDA.

Nad nadzornim odborom EFDA je posvetovalni odbor EUROATOM-a za posebni program raziskav in šolanja na področju jedrske energije – fuzija (CCE-FU). Ta odbor je nadzorno telo celotnega evropskega fuzijskega programa in temu programu daje strateške usmeritve.

Od aprila 2005 ima tudi Slovenija svoj Slovensko fuzijsko asociacijo (SFA). V tej Asociaciji zaenkrat sodelujejo Inštitut Jožef Stefan, Univerza v Ljubljani (FS in FE), ter Univerza v Novi Gorici. SFA je seveda odprta še za nove člane. Glavna področja raziskovalnega dela v SFA so zaenkrat naslednja: študij interakcij plazma-stena, računalniške simulacije sredice in robne plazme v tokamakih, študij aktivacije materialov, ki so predvideni za oblogo reaktorske posode ter razvoj novih keramičnih materialov za oblogo v reaktorju DEMO:



□ Raziskovalni program asociacije je zelo raznolik in sega na področja razvoja naprednih materialov za fuzijo, interakcije plazme s površinami materialov, modeliranja in simulacije plazme v tokamakih, nevtronskih preračunov in še kam.

□Skupina raziskovalk in raziskovalcev z Odseka za nanostrukturne materiale IJS je osredotočena na razvoj SiC kompozitnih materialov, ki bi bili uporabni v bodočih fuzijskih elektrarnah kot strukturni material v oblogah reaktorjev. Na Odseku za fiziko nizkih in srednjih energij in na Odesku za reaktorsko fiziko študirajo interakcijo vodikovih in devterijevih vibracijsko vzbujenih molekul s površinami fuzijsko relevantnih materialov. V ta namen so razvili nov spektrometer, uporabljajo pa tudi alitično metodo ERDA za karakterizacijo vsebnosti vodika na in pod površino materialov. Raziskave izvajajo v nevtralni vodikovi/devterijevi atmosferi in v plazmi, ki jo proizvajajo v napravi z linearnim magnetnim poljem. Druga skupina na istem odseku ionski žarek iz linearnega pospeševalnika za študij procesov pri interakciji plazme s površinami materialov, kot so: erozija materiala, nanašanje plasti materiala, zadrževanje goriva in migracija materiala v fuzijskih reaktorjih. Analizirajo vzorce, ki so jih dobili iz reaktorja TEXTOR v Nemčiji. Na Odseku za tehnologijo površin in optoelektroniko raziskujejo površinsko rekombinacijo vodikovih atomov na fuzijsko relevantnih materialih.

□ Ker je potrebno pri teh raziskavah poznati gostote atomov v plinu ali plazmi ob materialu, so razvili novo sondo za merjenje gostote atomov, ki temelji na katalitični rekombinaciji atomov na površini sondinega tipala. V okviru drugega projekta na tem odseku študirajo kinetiko interakcije devterija z materialom za reaktorsko steno. Dobro poznavanje interakcije devterija bo tudi v pomoč pri napovedi zadrževanja radioaktivnega tritija, kar je zelo pomembno pri razgradnji in shranjevanju delov reaktorja.

□ Skupina raziskovalcev z Odseka za reaktorsko fiziko sodeluje pri razvoju novih detektorjev za gama žarke za reaktor JET. Ukvarjajo se z nevtronskimi in fotonskimi transportnimi preračuni in izračuni zmanjševalnih koeficientov za nevtronske filtre v teh detektorjih. Druga skupina sodeluje pri podobnih preračunih, ki so potrebni pri razvoju litijevih oblog za proizvodnjo tritija v fuzijskem reaktorju. Glavni cilj sodelovanja raziskovalcev IJS v delovni skupini, ki načrtuje prototipni fuzijski reaktor DEMO, je prispevati k reševanju problemov jedrske varnosti in obdelave jedrskih odpadkov.

□ V laboratoriju LECAD na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani analizirajo in rešujejo konstrukcijske probleme, ki se pojavljajo pri gradnji stelaratorja Wendelstein W7-X v Nemčiji. Gre za eksperimentalni fuzijski reaktor, prav tako toroidalne oblike, njegovo delovanje pa ne temelji na transformatorskem principu kot pri tokamaku. V laboratoriju so prav tako ob sodelovanju s podjetjem TRITECH d.o.o. razvili in izdelali novo vrtilno orodje, ki je potrebno pri izdelavi vakuumske komore za ITER.

Pred zaključkom še nekaj internetnih povezav:

Slovenska fuzijska asociacija: www.fusion.si

EFDA: www.efda.org

Domača stran ITER-ja www.iter.org

Zaključki:

Fuzija je energijski vir prihodnosti, vendar je sedaj že zanesljivo, da je dosegljiv. Odločitev o začetku gradnje ITER-ja odpira novo obdobje fuzijskih raziskav.

Fuzijske elektrarne bodo varne – zaradi same narave procesa niso možne katastrofalne nesreče, tipa taljenja sredice, kajti plazma ob vsaki motnji sama ugasne in ni zaostale toplote.

V reaktorju nikoli ni več kot 1 g goriva (DT) tako, da tudi ob sabotaži ali terorističnem napadu ne bi prišlo do radioaktivnih izpustov, ki bi zahtevali evakuacijo lokalnega prebivalstva.

Zaloge goriva so neizčrpne in enakomerno porazdeljene po svetu (ne tako kot npr. nafta)

Radioaktivni odpadki iz fuzijske elektrarne bodo samo nizko aktivni, hiter je razvoj novih materialov z vedno nižjo aktivacijo in vedno krajšo razpolovno dobo tako, da njihovo shranjevanje ne bo breme za prihodnje generacije.

Fuzijske elektrarne bodo elektrarne z veliko vgrajeno močjo (1000 MW) in zato primerne za energijsko oskrbo velikih potrošnikov.

Fuzija predstavlja zanesljiv, varen, trajen in okolju prijazen energijski vir prihodnosti.