

Od ideje do ITER-a:

Slavoljub Mijović

Odsek za fiziku-Prirodno-matematičkog fakulteta Podgorica

slavom@rc.pmf.ac.me

Kongres matematičara i fizičara
Crne Gore, Petrovac 2010

Sadržaj

- Šta je nuklearna fuzija; Energetski izvor;
- Plazma i termonuklearna fuzija;
- Načini dobijanja fuzije;
- Problemi zagrevanja i održavanja plazme;
- Istorijski pregled: od ideje do fuzionih reaktora;
- ITER
- Zaključak

Šta je nuklearna fuzija?



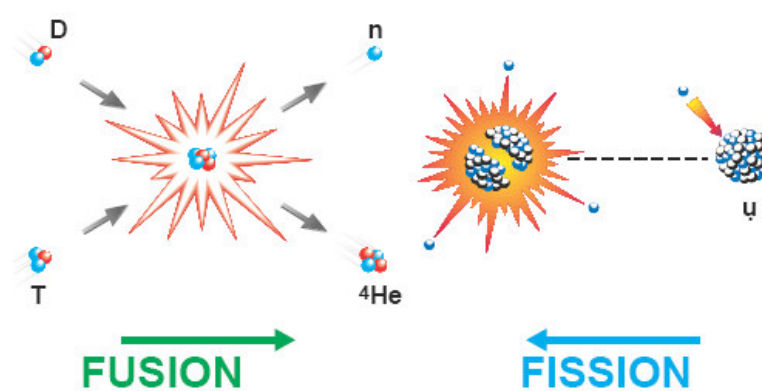
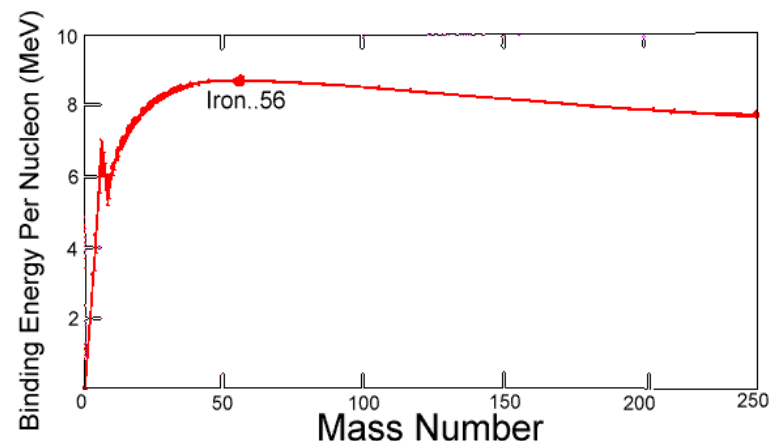
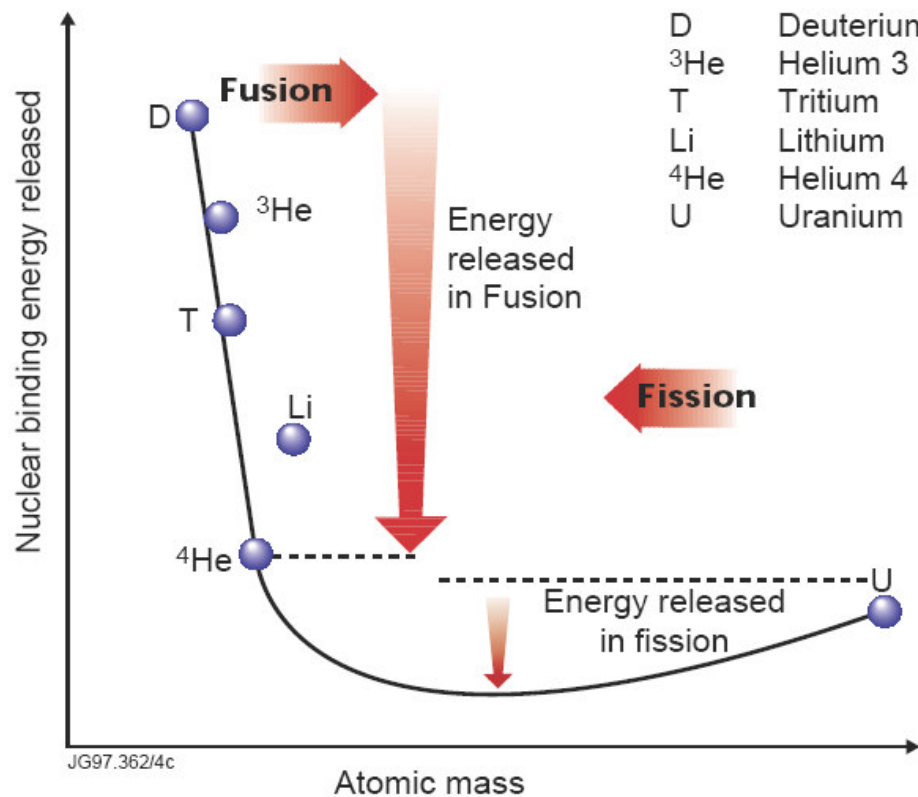
- **Nuklearna Fuzija** je proces generisanja energije u jezgru Sunca i zvezda.
- Temperatura **Sunca** u jezgru je oko 15 million °C. Na tim temperaturama **vodonikovi** nukleoni se fuzionišu i obrazuju **helijum uz oslobađanje energije**. Energija održava život na Zemlji preko Sunčeve svetlosti.

Energija koja se oslobađa u nuklearnim reakcijama

- *Laki nukleoni* (vodonik, helijum) oslobađaju energiju kada se **fuzionišu (nuklearna fuzija)**
- **Masa nukleona** posle reakcije je **manja** od **mase nukleona** pre reakcije;
- **Teški nukleoni** (uranijum) oslobađaju energiju kada se **dele (nuklearna fisija)**
- **Masa nukleona** posle reakcije je **manja** od **mase** originalnih nukleona

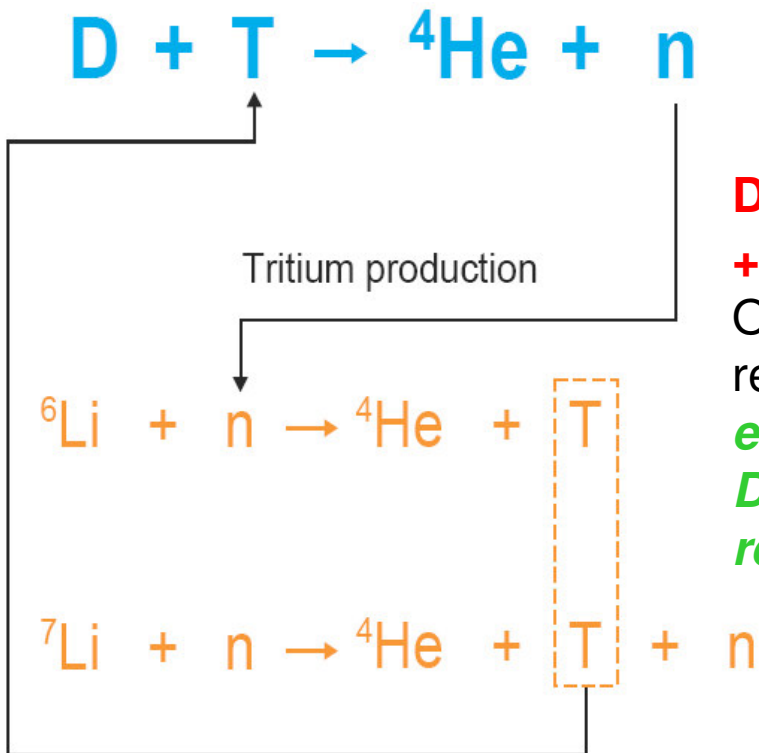
Energija koja se oslobađa fuzijom i fisijom

- **Fuzione reakcije** oslobađaju daleko više energije od **fisionih reakcija**



“Najpodesnija” fuzionna reakcija

- **Deuterijum** – iz *vode*
(0.02% od ukupnog vodonika je *teški vodonik ili deuterijum*)
- **Tricijum** – iz *litijuma*
(laki metal koji se nalazi svuda u Zemljinoj kori)

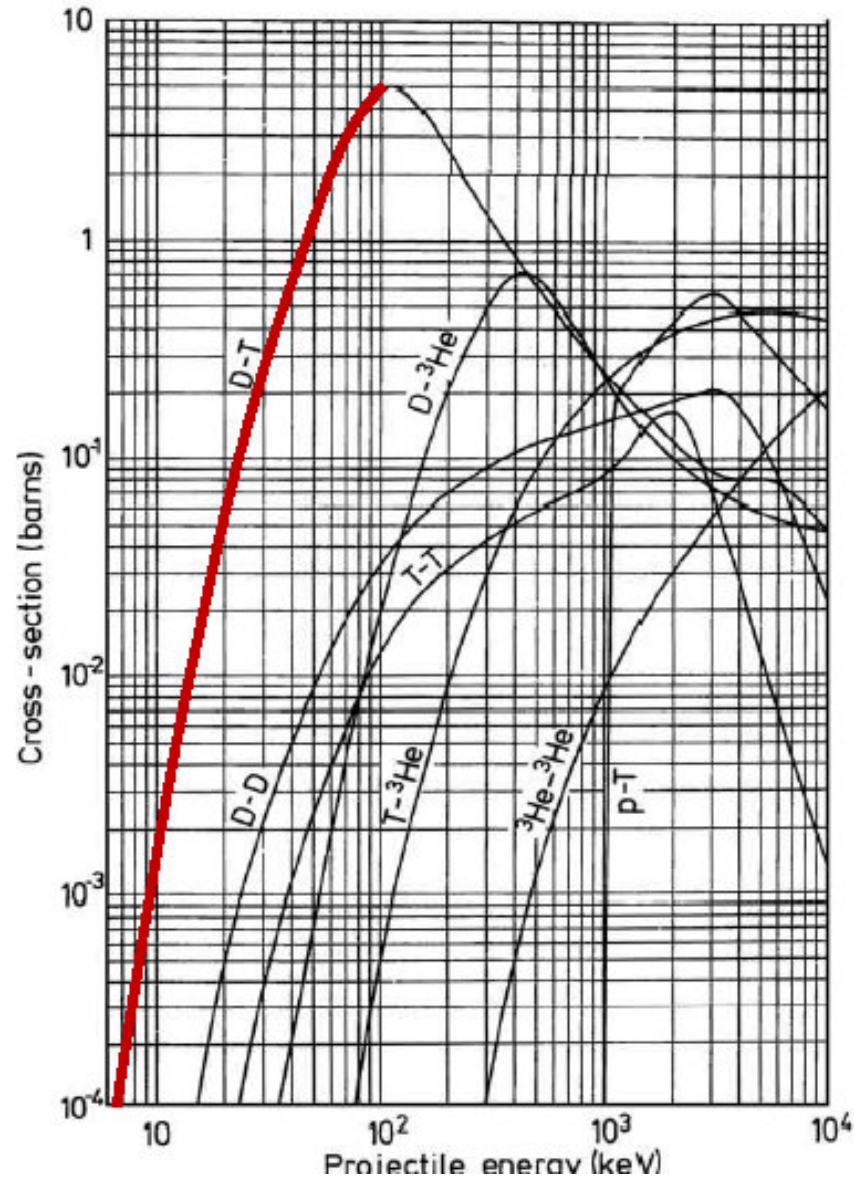


**Deuterijum + Tricijum → Helijum +neutron
+17.5 MeV energije**

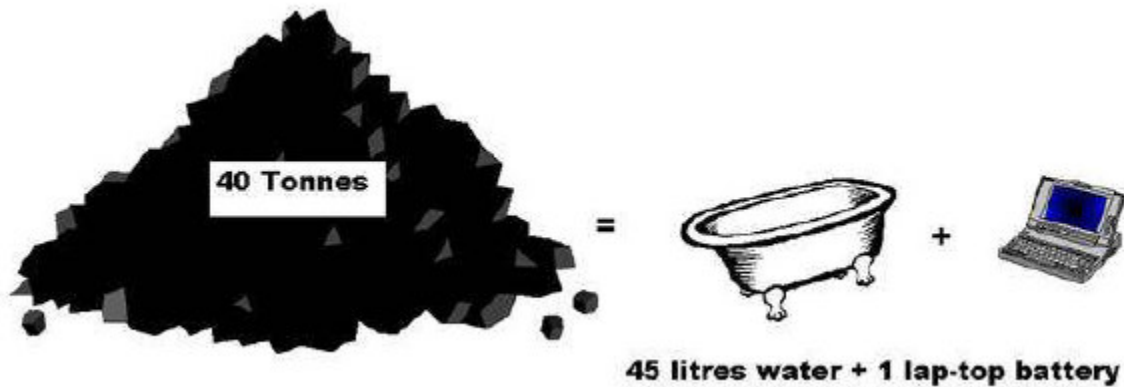
Ovaj *fuzioni ciklus* (koji ima najveću brzinu reakcije) je interesantan za *produkciju energije*

Dva izotopa vodonika imaju maksimalnu reaktivnost na oko 100 miliona °C

Zašto? – Poprečni presek



Fuzione gorivo



Litijum iz baterije laptop-a + pola kade obične vode (jedna šolja
teške vode) \implies 200,000kW-sati \implies

Potreba jednog čoveka za 30 godina!

Plazma i termonuklearna fuzija

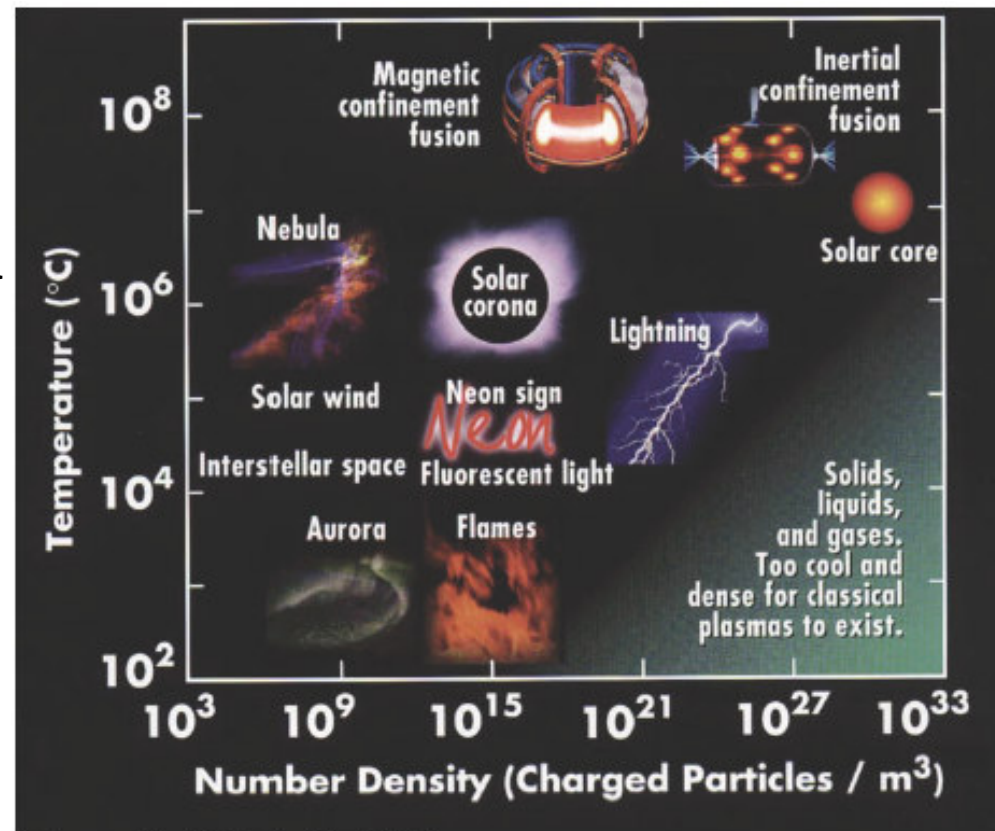
- **Plazma** je jonizovani gas . Smeša **pozitivnih jona** i **negativnih elektrona** sa ukupnom **elektičnom neutralnošću**
- Plazma čini IV-to stanje materije, dobijeno na temperaturama većim od 100,000 stepeni
- Plazma je **provodnik električne struje i toplote**

Plazma je neophodna zbog efikasnosti!

Fuzija se dobija i sudarom snopa deuterona, ubrzanih u akceleratoru, sa čvrstom metom iz deuterijuma ili tricijuma ali se energija rashoduje na grejanje mete, jonizciju i elastične sudare.

Rešenje je u formiranju “vruće” plazme sa Maksvelovom raspodelom gde se najbrže čestice mogu fuzionisati

termonuklearan



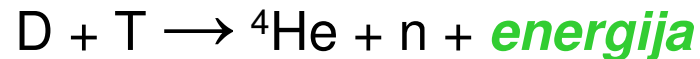
Contemporary Physics Education Project (CPEP)

Fuzionna energija – nedostaci

- **Fuzione reakcije je teško započeti!**
 - Visoke temperature (milioni stepeni) u visokom vakuumu zahteva
 - *Tehnički kompleksan reaktor i visoke kapitalne troškove*
- **Više istraživanja i razvoja je potrebno da bi se koncept rutinski realizovao**
 - Fizika je dobro napredovala ali zahteva održiv razvoj na dug period (20 do 40 godina)

Samo-održiva ili 'goruća' plazma

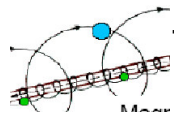
- Deuterijum – tricijum fuzionna reakcija:



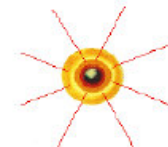
Nukleon ${}^4\text{He}$ (*' α ' čestica*) nosi oko 20% energije i ostaje u plazmi. Ostatak oko 80% nose neutroni i mogu se iskoristiti za generaciju pare.

Plazma postaje *samo-održiva* ili *goruća* kada ima dovoljno α snage da balansira gubitke iz plazme.

- U *zvezdama* plazmene čestice (uključujući i atome) su konfinirane uglavnom *gravitacijom* a plazma sa velikom gustinom naelektrisanja se dostiže
- Na *Zemlji*:



- Visoko-temperaturna gusta plazma može biti konfinirana u magnetnim poljima (*Magnetno konfinirana fuzija*)
- Supergusta plazma se može dobiti implozijom čvrste deuterijum-tricijumske mete (*Inercijalno konfinirana fuzija*)



Temperatura “paljenja” plazme

Gustina fuzione energije generisane u cm^3 :

$$W = n_1 n_2 \langle \sigma v_r \rangle \mathcal{E}$$

$n_{1,2}$	gustina čestica (D,T)
σ	presek za fuzionu reakciju
v_r	relativna brzina čestica
\mathcal{E}	energija po fuzionoj reakciji

Gubici usled zakočnog zračenja po cm^3

$$W_G = 5 \cdot 10^{-31} Z^2 n^2 (kT_e)_{keV}^{1/2}$$

(*bremsstrahlung*) :

Z	redni broj
T_e	temperatura elektrona

Temperatura paljena se može dobiti izjednačavanjem gore navedenih gustina energija i za D-T reakcije je oko 4keV-a a za D-D reakcije oko 35 keV

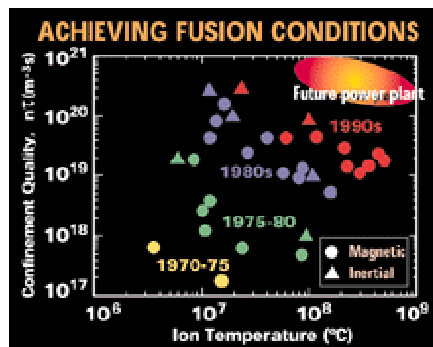
Gustina fuzione energije daleko brže raste sa povećanjem temperature od energije gubitaka!

Lawson-ov kriterijum

Dobijanje energije fuzijom koja je veća od potrebne energije za grejanje plazme i radijacione gubitke nameće uslove, osim temperature, i za plazmenu gustinu n i vreme održavanja (konfiniranja) plazme τ .

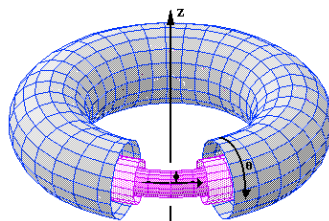
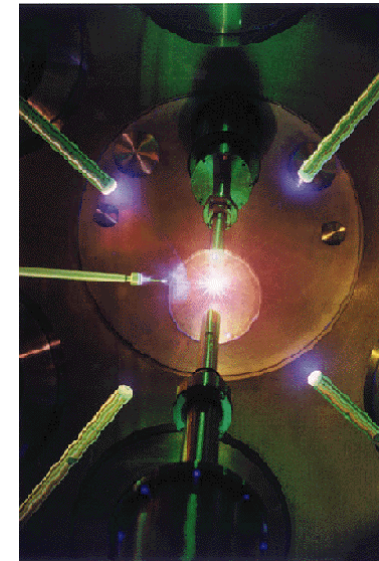
Pretpostavlja se da se fuzionna energija, radijacioni gubitci, kinetička energija čestica koje “beže” iz plazme (određena vremenom τ) mogu vratiti termalno sa efikasnošću od 33%.

Tada je minimalna vrednost $n\tau$ za $D-T$ reakciju oko $10^{14} \text{cm}^{-3}\text{sec}$ i oko $10^{16} \text{cm}^{-3}\text{sec}$.

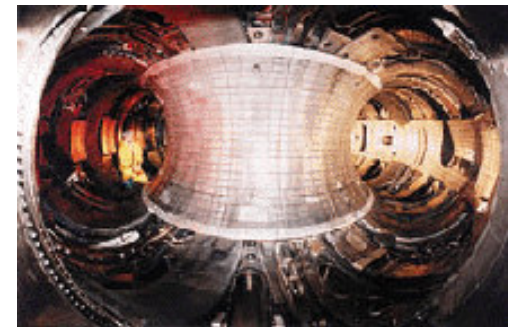
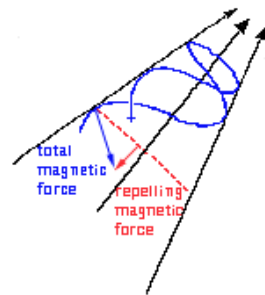
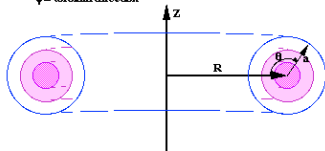


Glavni problemi fuzionog reaktora

- Održavanje plazme-magnetno inercijalno ;
- Grejanje plazme Omsko, snopom ubrzanih neutralnih čestica, radio talasima
- Fuzionna tehnologija-nečistoće

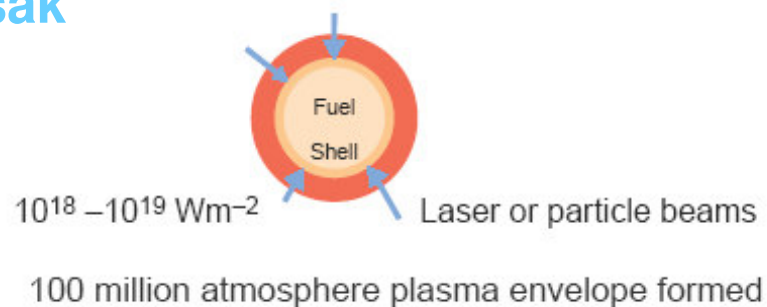


View of a tokamak showing nested toroidal flux surfaces and coordinate system where:
 θ = poloidal direction
 ϕ = toroidal direction



Inercijalno održavanje (konfiniranje)

- Laserska implozija male (3mm dijametar) čvrste deuterijum–tricijske mete produkuje fuzione uslove
- Generiše pritisak**



- Kompresija**

Gorivo se komprimira kao u raketama
200,000 miliona atmosfera u centru

- Paljenje i sagorevanje**

50M°C / 10⁴ tonne
per m⁻³ in core

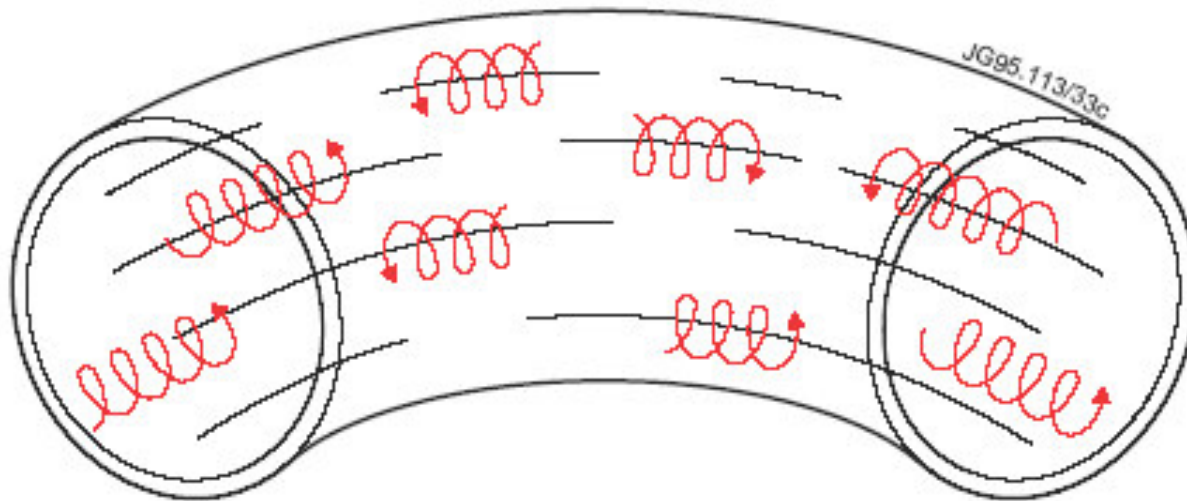


$$\tau_E \sim R/4c_s$$

- Kompresija goriva u piku dostiže 1000-10000 puta gustinu tečnosti za ekstremno kratko vreme (10⁻¹¹ s)
- Jezgro se zagreva i javlja se 'varnično paljenje'.

Magnetno konfiniranje

- **Magnetno polje** uzrokuje da se naelektrisane čestice kreću oko njihovih linija po spirali. Plazma čestice se gube na zidovima suda samo relativno sporom difuzijom **poprečno** linijama polja.



- **Torusni** (oblik prstena) sistem izbegava da plazma udari o krajeve suda
- Najuspešniji uređaj za magnetno konfiniranje je **TOKAMAK**

Nije sve idealno-čestice “beže” iz plazme na zidove suda

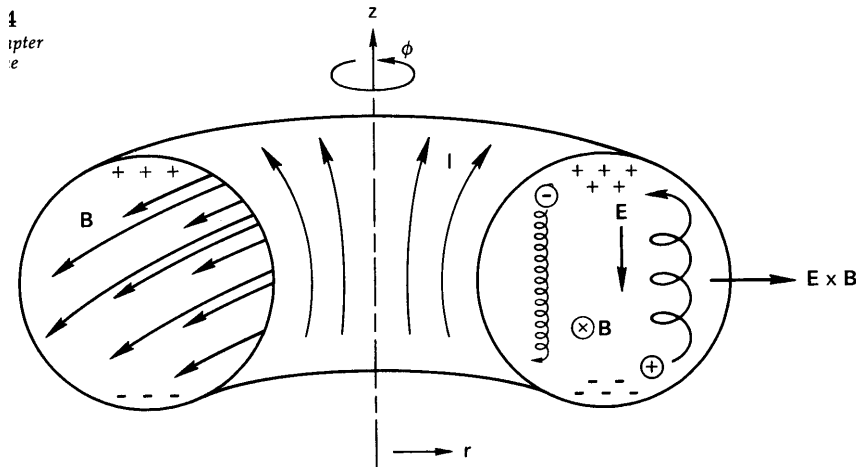


FIGURE 9-1 In a simple torus in which the lines of force are closed circles, the magnetic field varies as $1/r$. The resulting ∇B drifts cause a vertical charge separation, which in turn causes the plasma to drift outward.

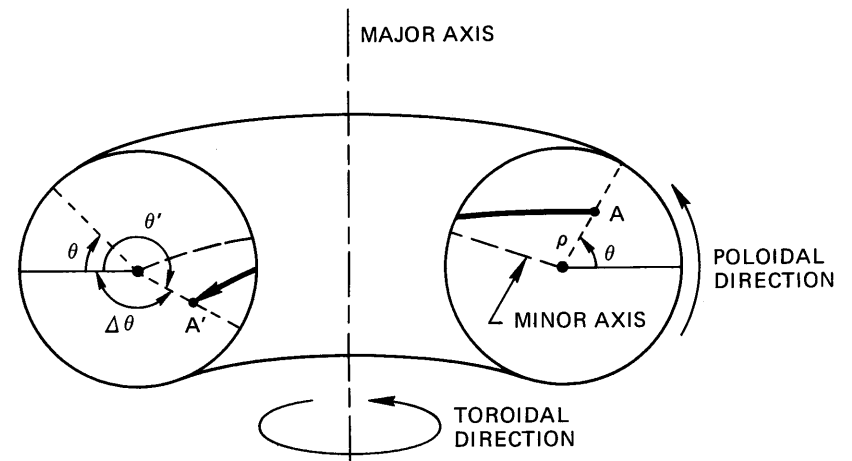
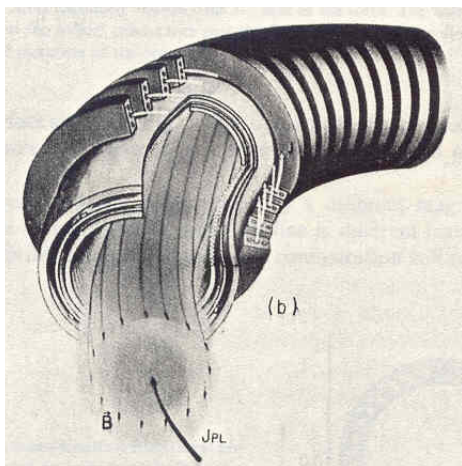
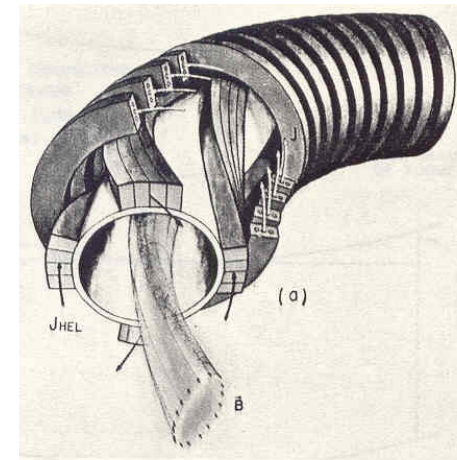


FIGURE 9-2 In a torus with rotational transform, a line of force $A-A'$ changes its azimuthal angle θ around the minor axis as it winds around the major axis.



Tokamak i
Stelerator

D-forma plazme



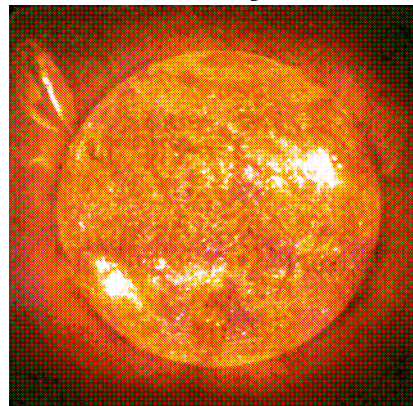
Kratka istorija

Prva ideja o fuziji 1920



- 1920 Artur Eddington

engleski astronom je prvi predložio hipotezu da enormnu energiju Sunca obezbeđuju procesi sjedinjavanja vodonika, najčešćeg elementa na Suncu, u helijum.



Precizno opisivanje ideje fuzije 1938



- 1938 Nobelovac Hans Bethe

nemački fizičar je precizno izračunao kako se protoni u Suncu sjedinjavaju u helijum.

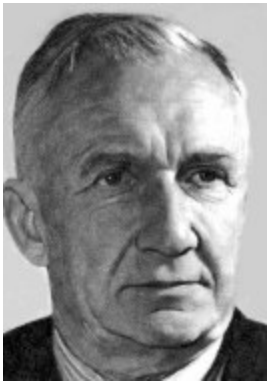
Prva ideja o dobijanju energije kontrolisanom termonuklearnom fuzijom 1950



- 1950 Oleg Lavrentijev

ruski vojnik je u pismu Staljinu predložio koncept dobijanja energije iz kontrolisanih nuklearnih reakcija

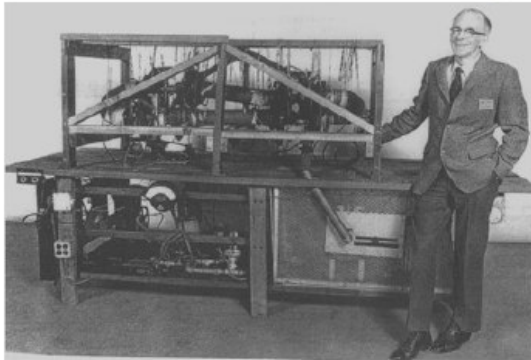
Prva potvrda o mogućnosti kontrolisane termonuklearne fuzije 1951



- 1951 Ruski Nobelovci Igor Tam i Andrej Saharov

Njihov predlog o “torusnoj magnetnoj klopci” je potvrđen

Stellarator



Lyman Spitzer

- 1951 Lyman Spitzer

Počinja da radi sa steleratorom u plazma laboratoriji u Prinstonu

Kolateralna šteta ideje



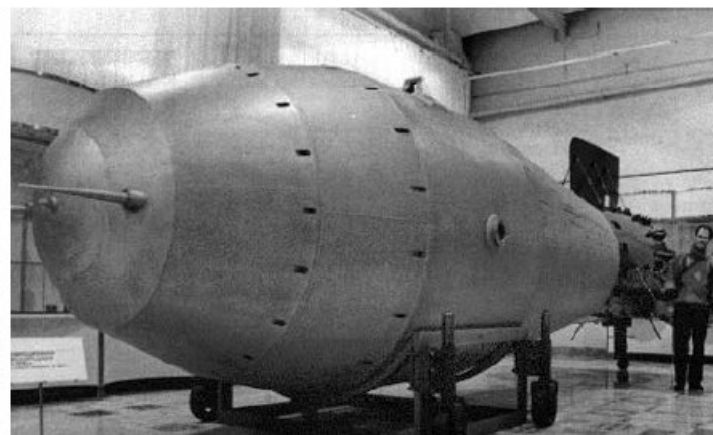
1952 -SAD
Mike bomba



1953 SSSR
400KT



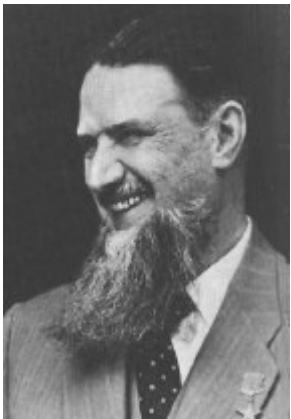
SAD 1MT TNT
MARK-17



SSSR 50MT
Car bomba
"Veliki Ivan"

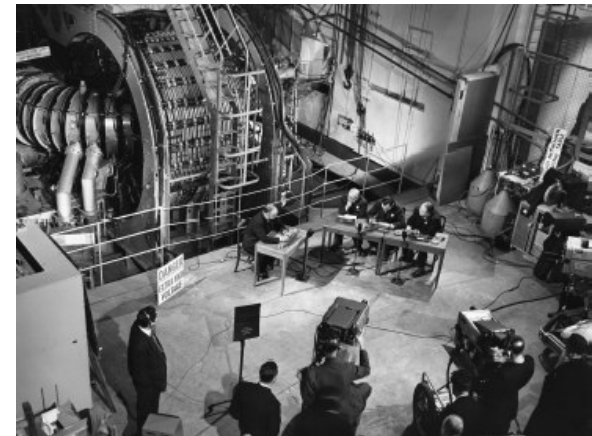
1953-1954

- 1953 SAD i SSSR su razvili tzv “pinč” uređaje
- 1954 ZETA mašina (Zero Energy Thermonuclear Assembly)



1956

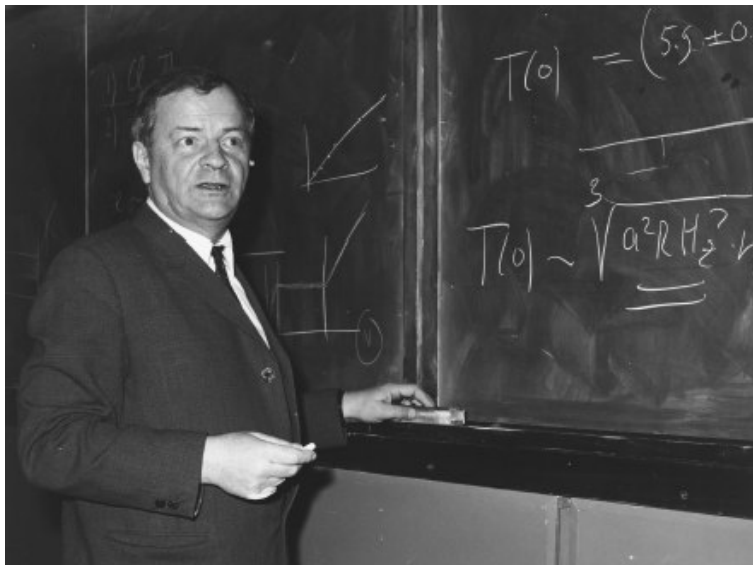
- SSSR otvara fuziona istraživanja na čelu sa Igorom Kurčatovim



1958-1968 dekada sumnji i frustracija!

1968 Prvi realni uspeh

Pobeda ideje TOKAMAKA



Počínje izgradnja velikog broja TOKAMAK sistema širom sveta !

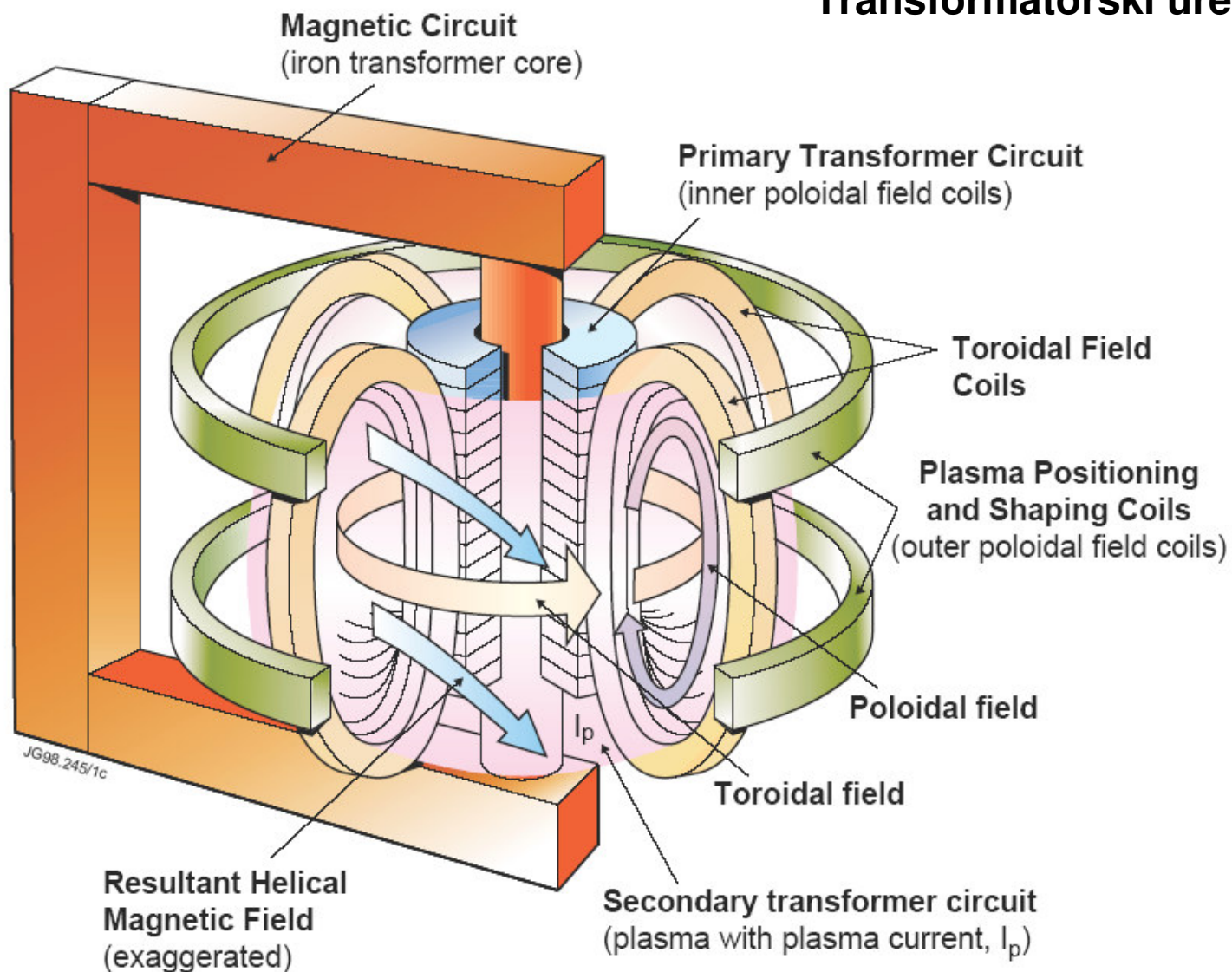
- 1968 IAEA Konferencija u Novosibirsku

Lav Arcimovič

je tvrdio da je u T-3 i TM-3 tokamacima dostignuta elektronska temperatura od 10 miliona stepeni i plazma se održavala 10-20 mikrosekundi.

ТОКАМАК: ТОк КАмера МАгнит Катушка

Transformatorski uređaj



Koliko veliki uređaj?

- Za paljenje fuzione plazme:
 - Mora biti **dovoljna koncentracija** deuterijumskih I tricijumskih jona (n_i);
 - Joni koji učestvuju u reakciji moraju biti **”dovoljno vrući”** (T_i);
 - **Energija fuzije** \propto čestica mora biti **konfinirana dovoljno dugo** (τ_E).

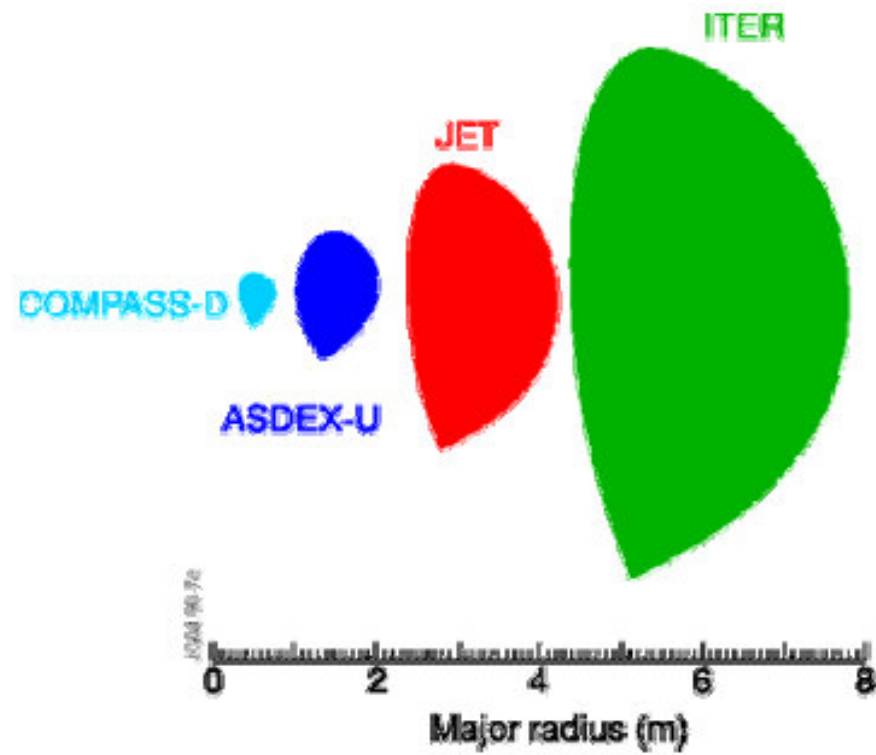
τ_E se uvećava sa kvadratom dimenzija mašine
– veća mašina je potrebna.

- **Fuzioni trostruki proizvod** ($n_i T_i \tau_E$) i **jonska temperatura** (T_i) moraju biti dovoljno veliki (ispod određene temperature verovatnoća za fuzione reakcije je verovatno suviše mala)

pritisak ($n_i T_i$) ≥ 2 atmosfere

Vreme konfiniranja > 5 sekundi

Plazmena jonska temperatura $\approx 100-200$ Miliona $^{\circ}\text{C}$



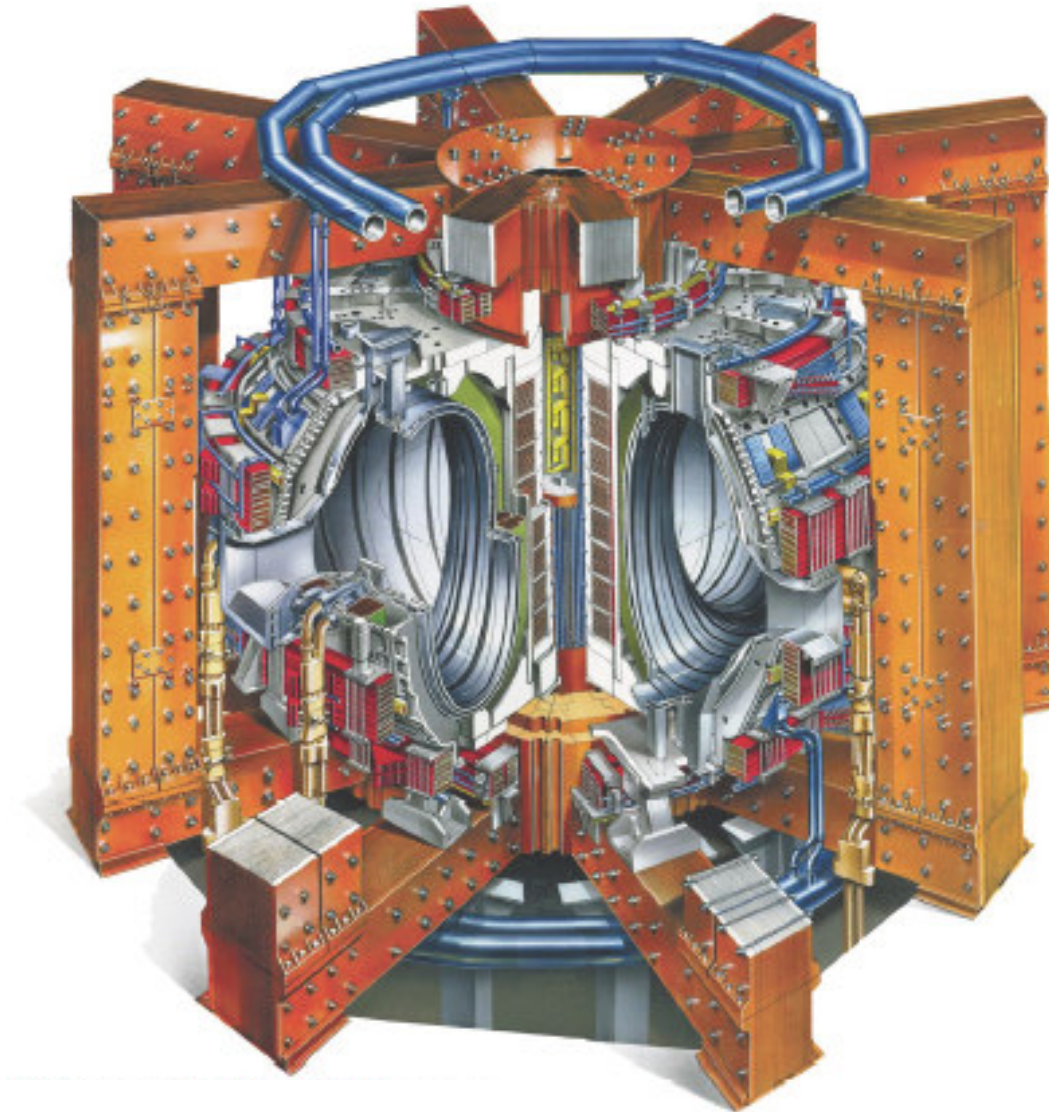
Poprečni presek D-forme TOKAMAKA u EU

JET

(Joint European Torus)

- The *Joint European Torus* (“JET”) je najveći magnetni test uređaj za fuziju u svetu.
- Nalazi se u Culhamu, Oxfordshire, JET:
 - Konstruisan je između 1978-1983;
 - U operativi je od 1983 - danas;
 - *To je najveći projekat u fuzionom programu Evropske Unije*
- Države učesnice su 15 EU nacija + Švajcarska
- Projekat ima *kapitalne investicije preko £500 miliona* i *godišnji budžet oko £53 miliona*

JET



- *JET* je *Tokamak* sa:
 - Torusnim radijusom 3.1m
 - Vakuumskim 3.96m visina x 2.4m širina
 - Zapremina plazme 80m³
 - Struja kroz plazmu do 5MA
 - Glavno polje za konfiniranje do 4 Tesla (nedavno dograđen od 3.4 Tesla)

Progres sa magnetno konfiniranom fuzijom

- **JET** i slični veliki Tokamaci u:
 - **USA** Tokamak **Fusion Test Reactor (TFTR)**
Doublet IIID Tokamak (DIIID)
 - **Japan** Japanese Tokamak – **60U (JT-60U)**

su napravili veliki progres u:

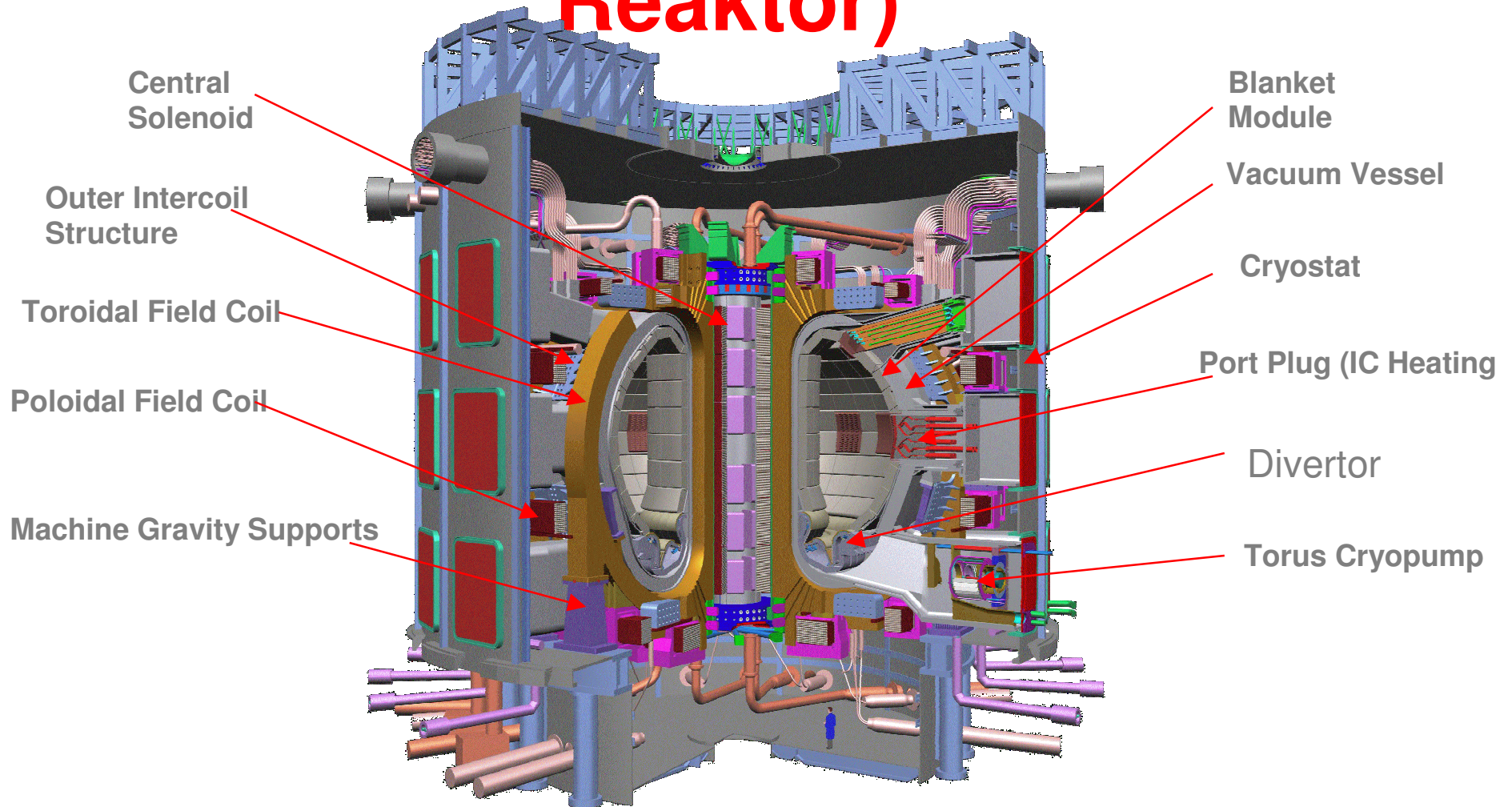
- Fuzionoj tehnologiji;
- Dostizanju uslova visoko-temperaturne “goruće” plazme;
- Predviđanje ponašanja reaktorske plazme;
- Kontrola nečistoća koja ulazi u plazmu
- Operativnošću sa tricijumskim gorivom

Kontrolisanje nečistoća

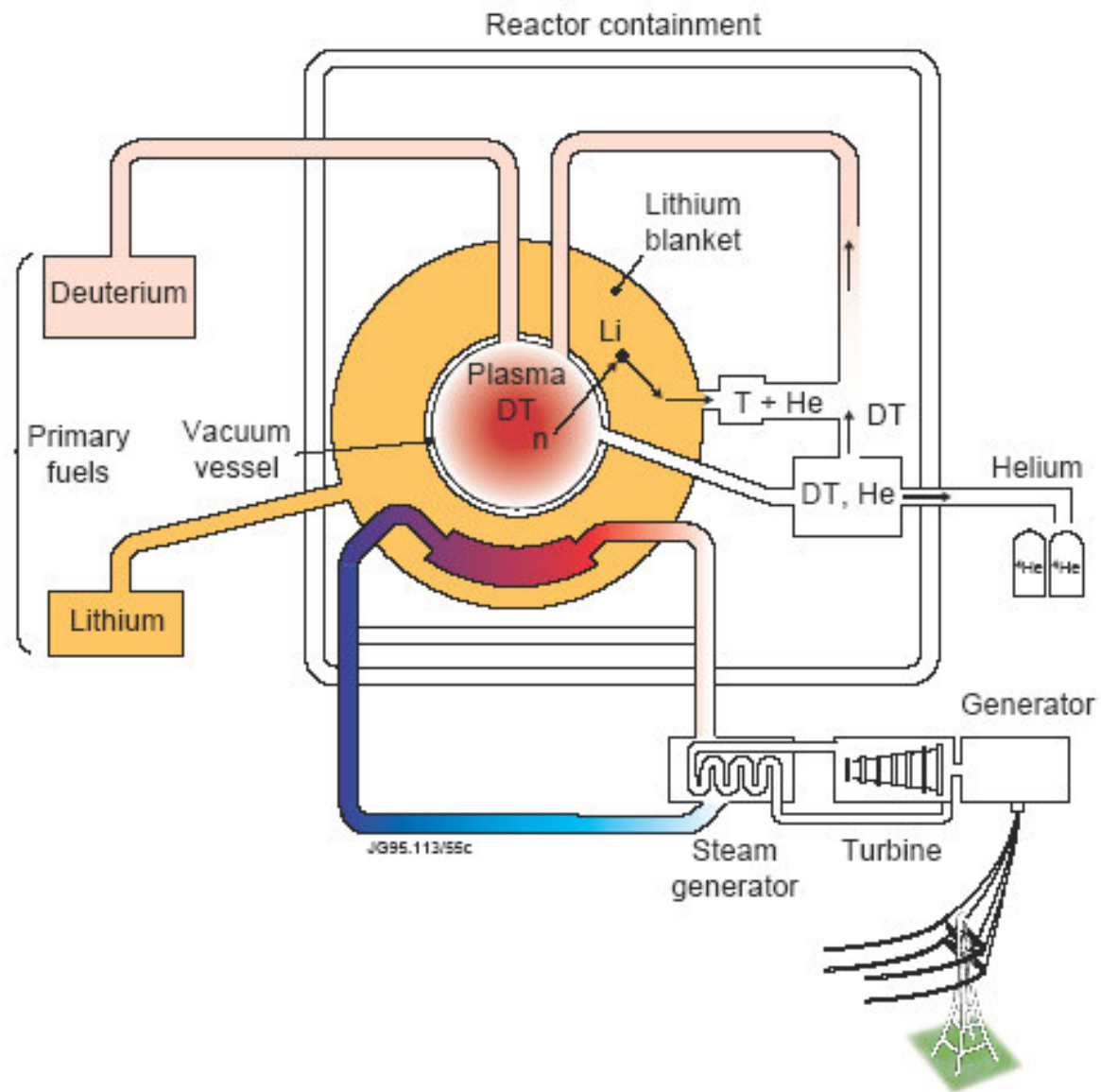
- **Nečistoće goriva** su glavne pretnje uspešnom radu reaktora
- **Dva primarna izvora nečistoća** su:
 - **Helijumski “pepeo”** od fuzione reakcije
 - Nečistoće materijala od **interakcije plazme sa zidovima suda**
- **Nečistoće se moraju kontrolisati:**
 - Zrače energiju i tako redukuju plazmenu temperaturu
 - Razblažuju gorivo i prema tome sprečavaju “paljenje”
- **“Magnetni divertor”** je uređaj za kontrolu nečistoća i uspešno je testiran u **JET-u**.

Tre različita koncepta su poređena i rezultati se slažu sa predviđanjima.

2010 ITER (International Thermonuclear Experimental Reaktor)



Šema fuzionog reaktora



ITER Ciljevi

Programski

- Demonstrirati naučnu i tehničku izvodljivost dobijanja fuzione energije u mirnodobske svrhe.

Tehnički

- Demonstrirati produženo gorenje DT plazme, sa stabilnošću kao krajnji cilj.
- Integrisati i testirati najbitniju fuzionu tehnologiju i komponente.
- Demonstrirati sigurnost i ekološku prihvatljivost fuzije.

PARAMETRI ITER-a

Ukupna fuzionna snaga	500 MW (700MW)
Q = fuzionna snaga/spoljašnja toplotna snaga	≥10 (induktivna)
Srednji fluks neutrona na zidove	0.57 MW/m ² (0.8 MW/m ²)
Plazmeno induktivno vreme “gorenja”	≥ 300 s
Plazmeni veliki radijus	6.2 m
Plazmeni mali radijus	2.0 m
Plazmena struja (induktivna, I _p)	15 MA (17.4 MA)
Vertical elongation @95% flux surface/separatrix	1.70/1.85
Triangularity @95% flux surface/separatrix	0.33/0.49
Safety factor @95% flux surface	3.0
Torusno polje 6.2 m radijus	5.3 T
Plazmena zapremina	837 m ³
Plazmena površina	678 m ²
Instalirano pomoćno grejanje/proticanjem struje	73 MW (100 MW)
Budžet	15 Milijardi EUR!

Softicirana fuziona tehnologija

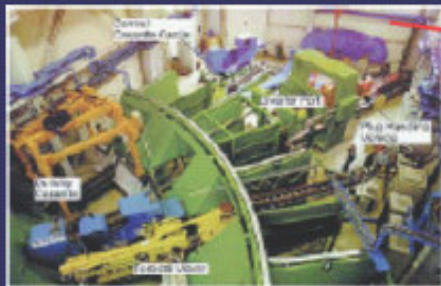
Completed 7 Large R&D by July 2001.



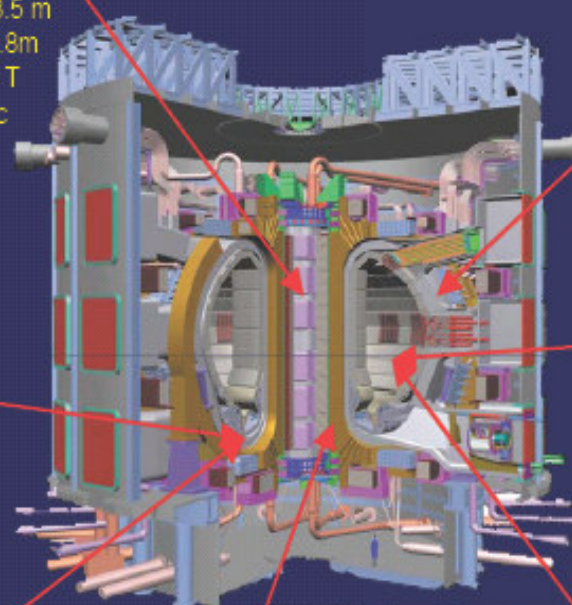
CENTRAL SOLENOID MODEL COIL

Radius 3.5 m
Height 2.8m
 $B_{max} = 13$ T
0.6 T/sec

REMOTE MAINTENANCE OF DIVERTOR CASSETTE
Attachment Tolerance ± 2 mm



DIVERTOR CASSETTE 20 MW/m²



VACUUM VESSEL SECTOR

Double-Wall,
 ± 5 mm



BLANKET MODULE



HIP Joining Tech
1.6 m x 0.93 m x
0.35 m

TOROIDAL FIELD MODEL COIL

Height 4 m
Width 3 m
 $B_{max} = 7.8$ T



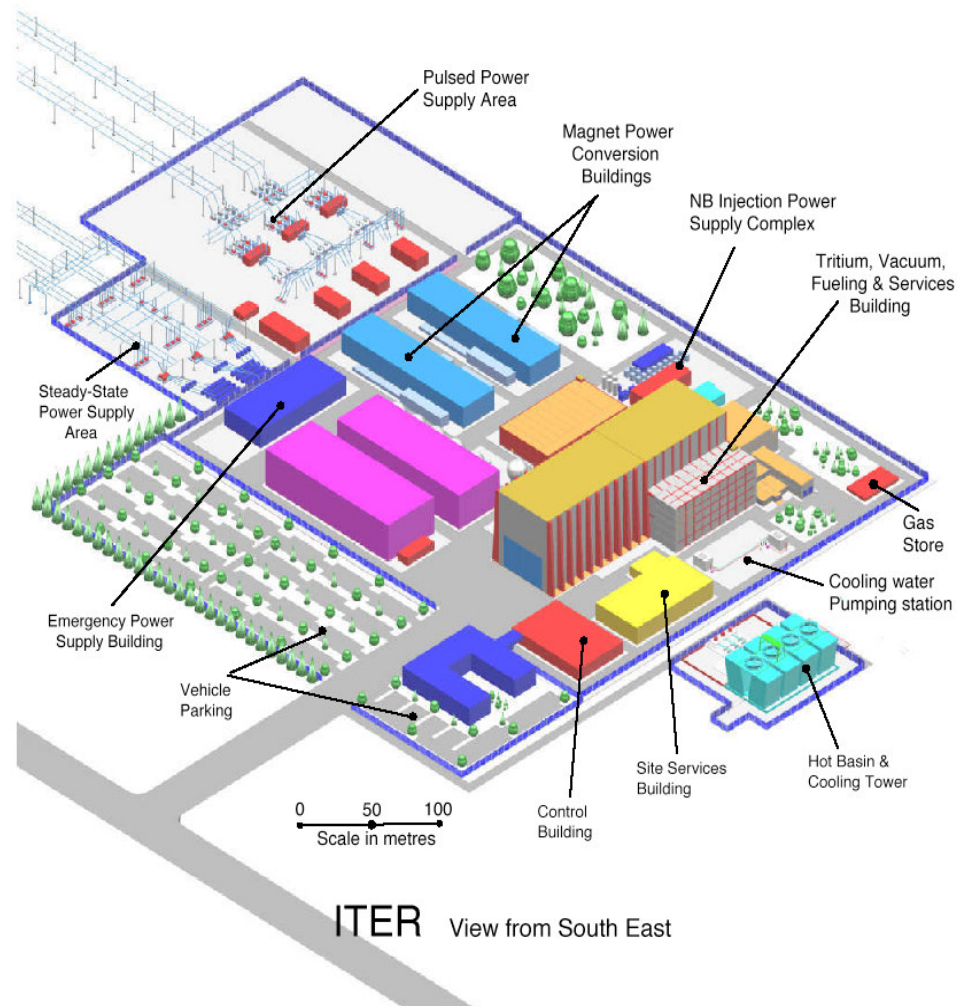
REMOTE MAINTENANCE OF BLANKET

4 tonne
 ± 0.25 mm



ITER

ITER plan



ITER Lokacija



Cadarache (Francuska)

Zaključak

- D-T fuzioni proces obećava:
 - virtualno beskonačni energetski izvor iz jeftinog goriva;
 - bez atmosferskog zagađenja gasovima staklene bašte;
 - malu radioaktivnost otpadi;
 - Nema rizika za ozbiljniji akcident.
- Ogroman progres je dostignut u poslednjim dekadama u fizici plazme i fuzionoj tehnologiji.
- Fuzionna istraživanja i razvoj uključuju izazove u raznim oblastima fizike i tehnologije i rešavaju se kroz eintenzivnu međunarodnu saradnju.
- Konstrukcija ITER-a će demonstrirati naučnu i tehnološku izvodljivost fuzione energije.

Hvala na pažnji!