

# PRESENEČENJA V FIZIKI -- MIONSKA KATALIZA FUZIJE

Mitja Rosina

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko,  
in Institut Jožef Stefan. [mitja.rosina@ijs.si](mailto:mitja.rosina@ijs.si)

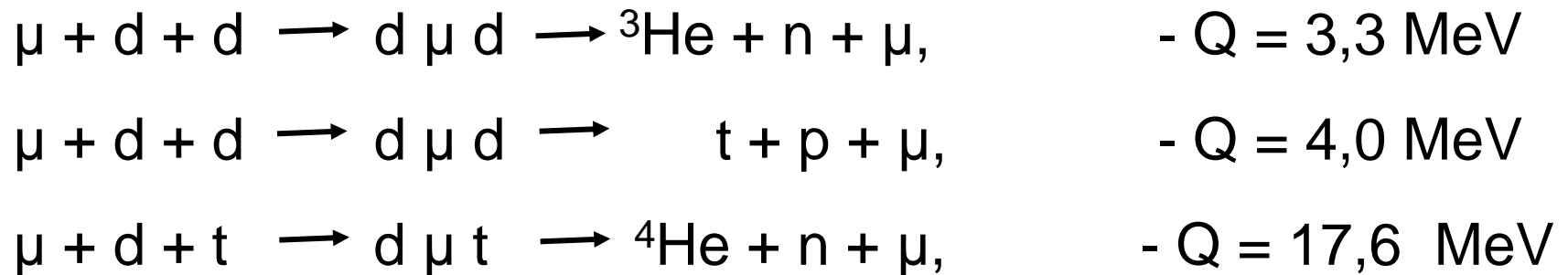
**Povzetek:** Po dobi drv, premoga, nafte in uranovih reaktorjev se oziramo na bodočnost proizvodnje energije v drugi polovici 21. stoletja. Kaj bo prevladalo, vetrnice, sončne celice ali zlivanje jeder (fuzija)? Razvoj fuzijskih reaktorjev se srečuje z vrsto uspehov in težav. Poleg ogromnih in dragih tokamakov je še nekaj alternativ za fuzijo. Kot zgled bom govoril o zelo zanimivem pristopu -- mionski katalizi fuzije in njeni perspektivi v bodočnosti.

Mion v življenski dobi 2 mikrosekund lahko katalizira 150 fuzij  $\text{deuteron} + \text{triton} \rightarrow \text{helij}$ , kar za pozitivno energijsko bilanco več kot zadošča, ni pa še ekonomično. Če bodo nadaljevali in uspeli z razvojem tehničnih rešitev, se obeta čista in varna proizvodnja energije.

# PROGRAM PREDAVANJA

1. MIONSKA KATALIZA FUZIJE
2. PROBLEMI IN USPEHI PRIDOBIVANJA ENERGIJE S FUZIJO
3. NEKAJ O TOKAMAKU
4. DRUGE ALTERNATIVE: STISKANJE Z LASERJEM ALI CURKI DELCEV...

# 1. MIONSKA KATALIZA FUZIJE

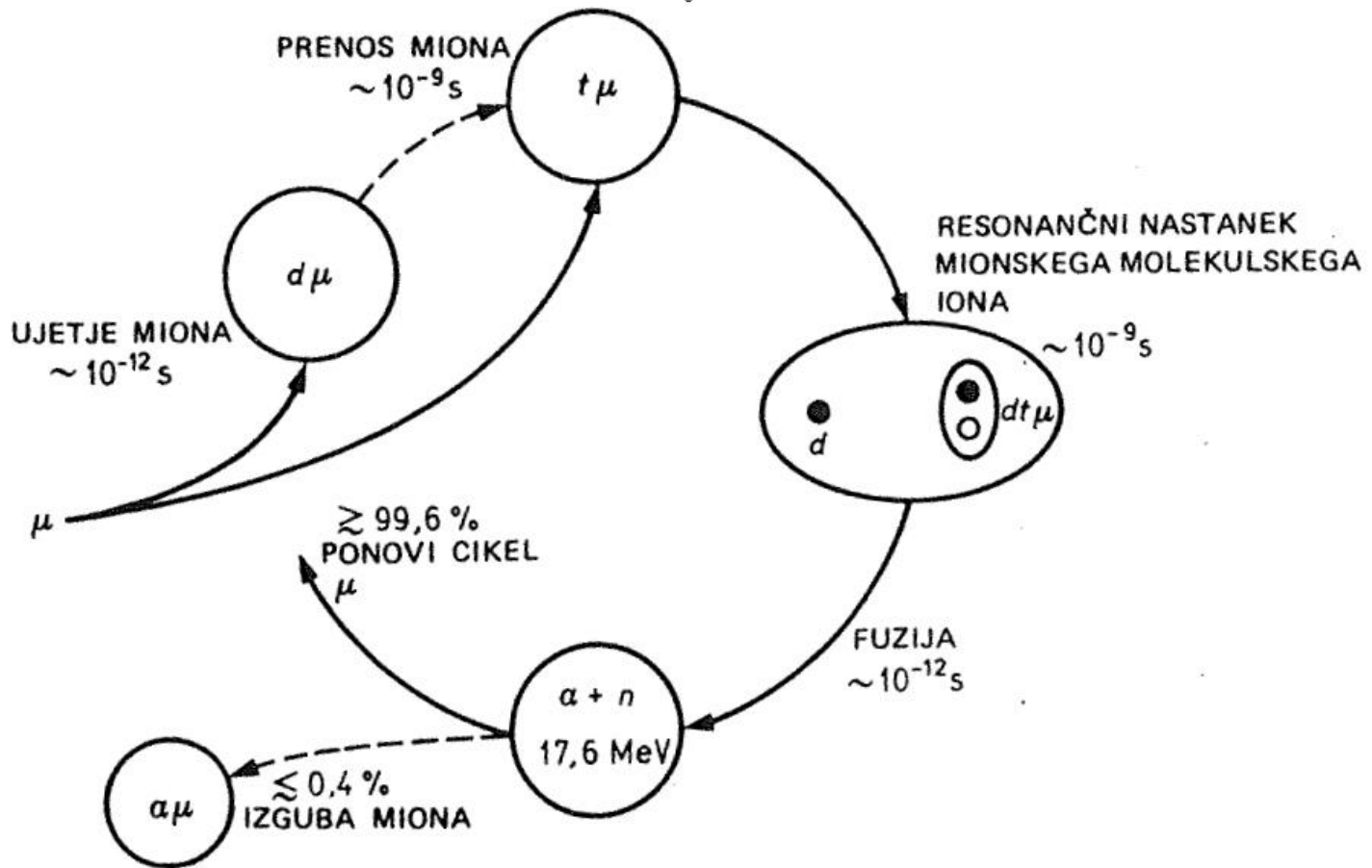


Najprej so bili veseli, da so pri zgornji reakciji opazili sploh kakšno fuzijo. Potem so upali, da jih bo kataliziranih kaj več.

Ruski teoretiki so jih pri reakciji s tririjem predvideli šez 100, če pomaga resonanca (S.S.Gershtein, L.I.Ponomarev, Phys.Lett.72B (1977) 80).

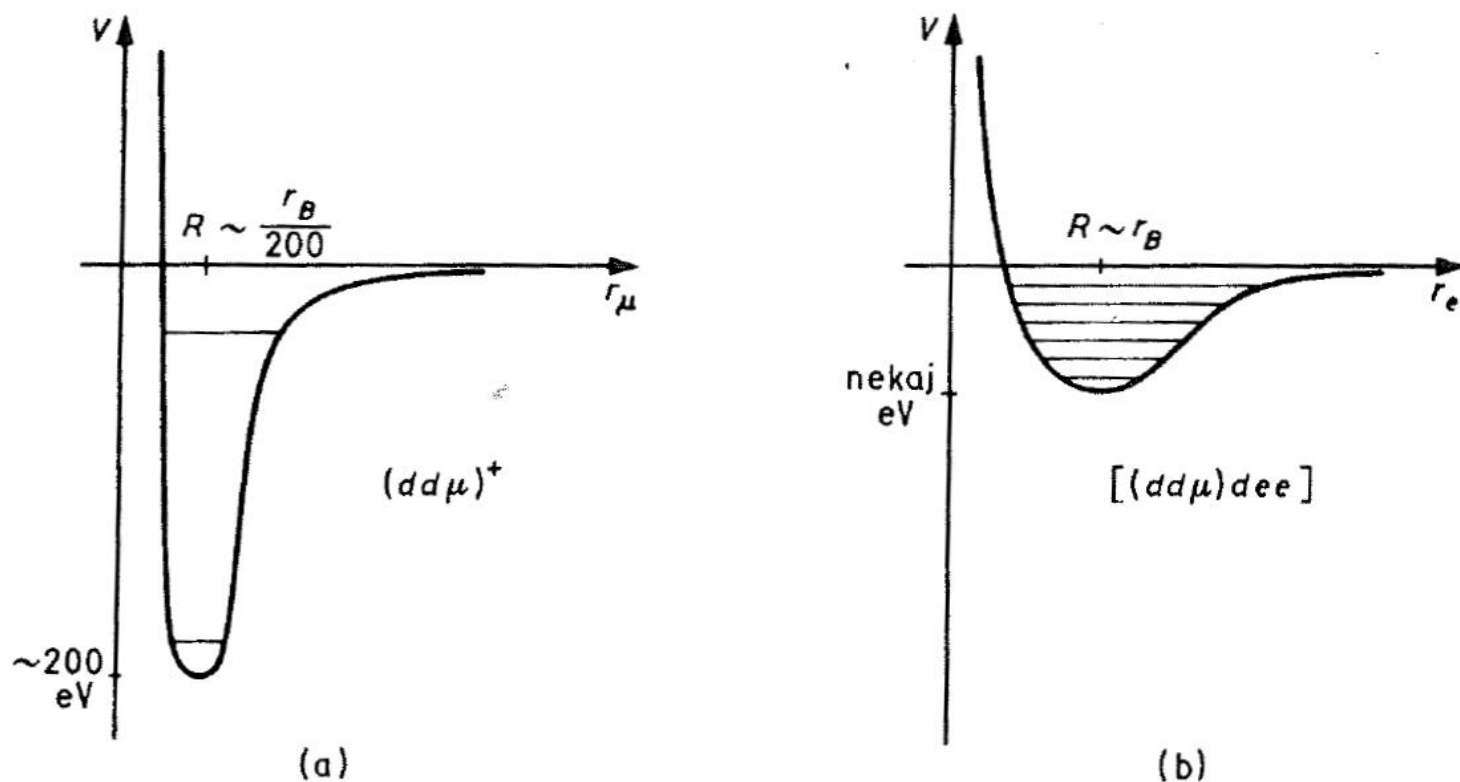
Eksperiment v SIN/PSI (Schweicherisches Institut für Kernforschung, danes Paul Scherrer Institute, Villigen pri Zürichu) pa je presegel vsa pričakovanja: 150 FUZIJI! (P.Baumann et al., Phys.Rev.Lett. 70 (1993) 3720).

Poročali smo tudi v Obzorniku za matematiko in fiziko:  
M.Olenik, Mioni kot katalizatorji za fuzijo, OMF 35 (1988) 35;  
M.Rosina, Mioni katalizirajo fuzijo, OMF 39 (1992) 157.



Mionska kataliza fuzije  $d + t$  (Olenik, OMF)

$$K_{\text{mionski}} \sim 200^3 K_{\text{elektronski}}$$



Sl. 3. Približni potek potenciala mionskega molekulskega iona  $(dd\mu)^+$  v odvisnosti od razdalje med devteronoma (a) in potenciala elektronske molekule  $[(dd\mu)dee]$  v odvisnosti od razdalje med ionom  $(dd\mu)^+$  in devteronom (b)

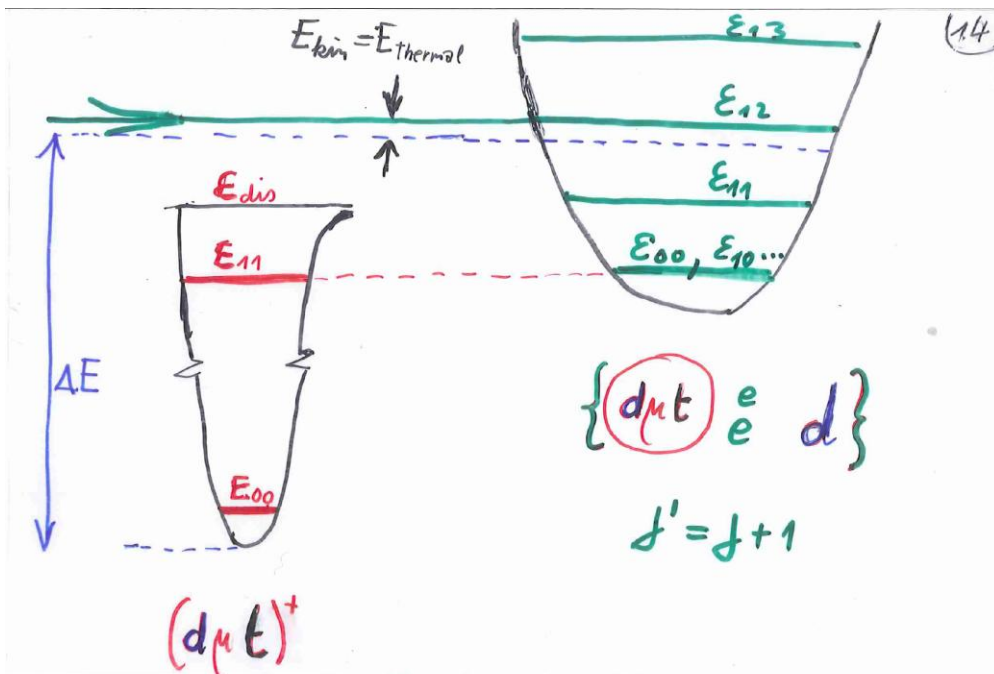
Resonančna sinteza  
molekule  $\{(d \mu t) ee d\}$  v  
"dveh nadstropjih".

$\mu$  veže ion  $(d + t)$ ,  
 $ee$  pa veže molekulo  
 $\{(d \mu t) + d\}$  kovalentno.

Težki vodik de in "atom"  
 $(d \mu t)e$  se pociljata  
naravnost v resonanco.

Vezavno energijo -319 eV  
kompenzirata z rotacijsko  
( $J=1$ ) in vibracijsko ( $V=1$ )  
energijo težke gruče  
ter z rotacijsko ( $j=1$ ) in  
vibracijsko ( $v=2$ ) energijo  
cele molekule.

Primanjkljaj krijeta s  
termično kinetično  
energijo pri 500-600°C.



$$E_{t\mu} + E_{dee d} + E_{kin} = E_{(d\mu t)ee d} + E_{JV} + E_{jv}$$

$$\Delta E + E_{kin} = E_{JV} + E_{jv}$$

JV	$p\mu d$	$d\mu d$	$d\mu t$	$t\mu t$
00	-222 eV	-325 eV	-319 eV	-363 eV
10	-97	-227	-232	-289
20		-86	-102	-172
30				-49
01		-35,8	-34,9	-84
11		-1,9	-0,60	-45

## USPEHI

1) Tudi zlitje (fuzijo)  $t + d$  pospeši RESONANCA:

$t + d \rightarrow {}^5\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + n$ . Zato je zlitje v 1 ps pravočasno, saj je življenjska doba miona  $2 \mu\text{s}$ .

2) Proces je čist (če le nevtroni ne aktivirajo okolice).

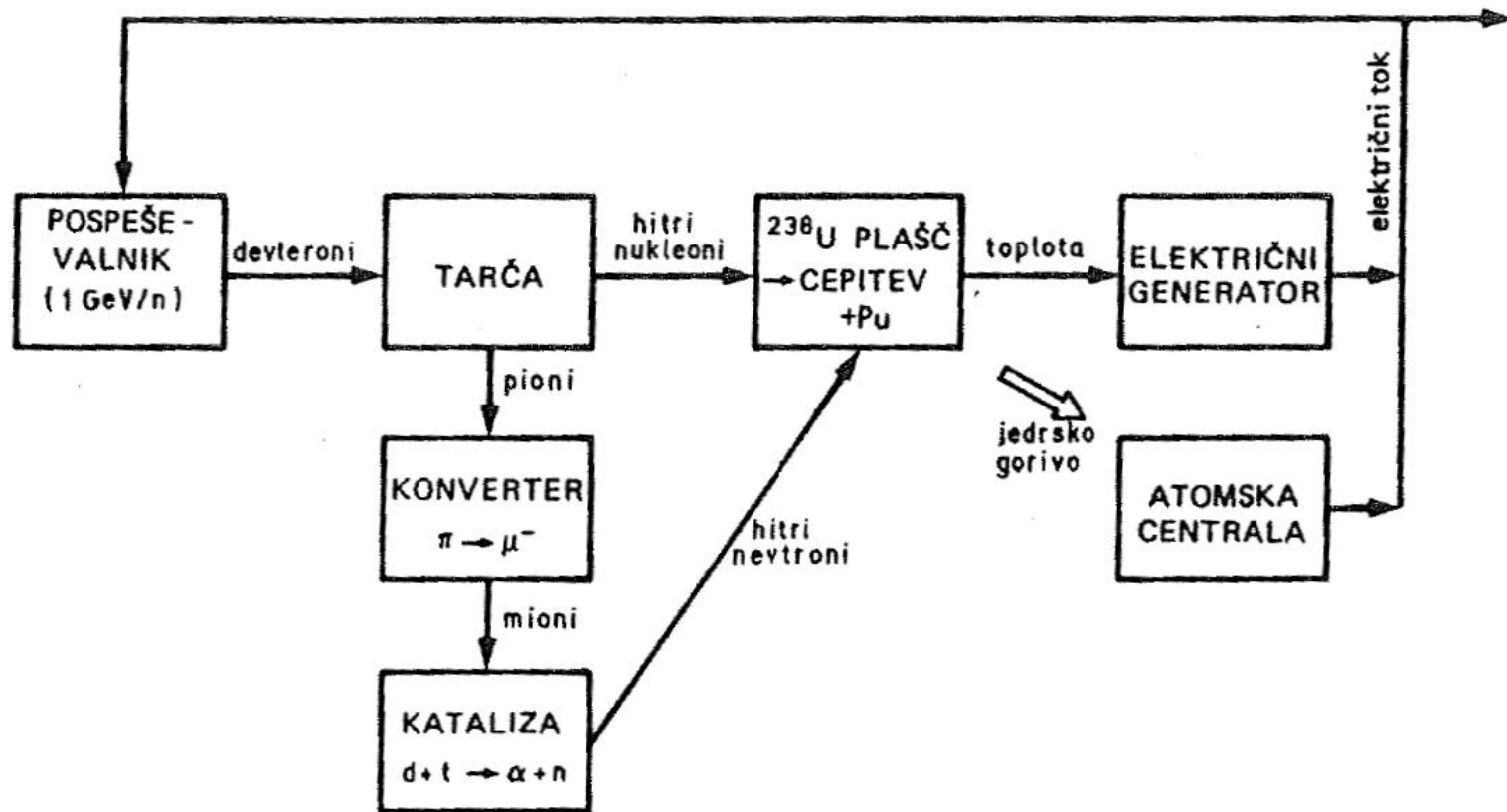
3) Moč zlahka kontroliramo z jakostjo mionskega curka.

## TEŽAVE

1) 0,4% mionov se ujame v nastalem heliju in "zaspijo" do smrti. Torej mion lahko v povprečju katalizira največ 250 fuzij.

2) Mioni so dragi. Res da imajo lastno energijo (maso) le 100 MeV in bi se amortizirali s 6 fuzijami, toda dobimo jih v treh stopnjah: S pospeševalnikom streljamo v primerno tarčo protone, ki sevajo pione, te pa v primerni tarči razpadejo v mione in le del jih pride naprej v "fuzijski reaktor". TREBA JIH BO POCENITI!

3) Energija, sproščena pri fuziji (pa tudi pri izdelovanju mionov), gre v toploto in nagaja gospod Carnot, le kakih 40% uporabimo za elektriko (za pospeševalnik in ostale naprave, ter za prodajo).



Primer hibridnega reaktorja, ki ga je leta 1980 predlagal sovjetski fizik V. Petrov

**PREDNOST:** Pri vsakem zlitju morda lahko pridobimo še 200 MeV z razcepom. Porabljeni nevtron se povrne 2-3 krat in služi za proizvodnjo tririja in še plutonija.

**SLABA STRAN:** Bolj kompliciran, umazan, radioaktivni odpadki.



## 2. PROBLEMI IN USPEHI PRIDOBIVANJA ENERGIJE S FUZIJO

2.1) Devterija je v svetovnih vodah veliko (glede na navadni vodik ga je 0,012 %), tritija pa skoraj nič, saj je radioaktiven z razpolovnim časom 12,5 leta.

Pridobivajo ga z reakcijo  $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + t$ . K sreči dobimo kot stranski produkt pri fuziji enako nevtronov, kot jih porabimo za proizvodnjo tritija.

2.2)  ${}^6\text{Li}$  je v naravnem litiju malo, le 7,6%. Pa še ta je marsikdaj “pokraden” kot vojaško zanimiva surovina. Zanimivost: Na IJS so nekoč umerjali masni spektrometer z razmerjem  ${}^6\text{Li}$  in  ${}^7\text{Li}$ , pa so dobili narobe, dokler niso pogruntali, da je  ${}^6\text{Li}$  “pokraden”.

2.3) Težko je spraviti skupaj dovolj blizu devterone in tritone. V vroči plazmi lahko pomagajo trki z zelo visoko energijo, toda plazmo moramo držati skupaj z močnimi magnetnimi polji. Tak TOKAMAK mora biti ogromen, da ni preveč izgub na stenah. Zato iščejo tudi alternative.

2.4) USPEH pa bo, ko bodo ukrotili te težave, saj je proizvodnja energije s fuzijo dokaj čista in varna.

## ZALOGE ENERGIJE

Premog	$10^{14}$ GJ	300 let
Nafta	$10^{13}$	40
Plin	$10^{13}$	50
Uran 235	$10^{13}$	30
Uran 238	$10^{16}$	30 000
Litij – kopno	$10^{16}$	30 000
Litij – morje	$10^{19}$	30 000 000

### 3. NEKAJ O TOKAMAKU

STELLARATOR (Princeton 1958),(Wendelstein 7-X, Greifswald,D,2015)

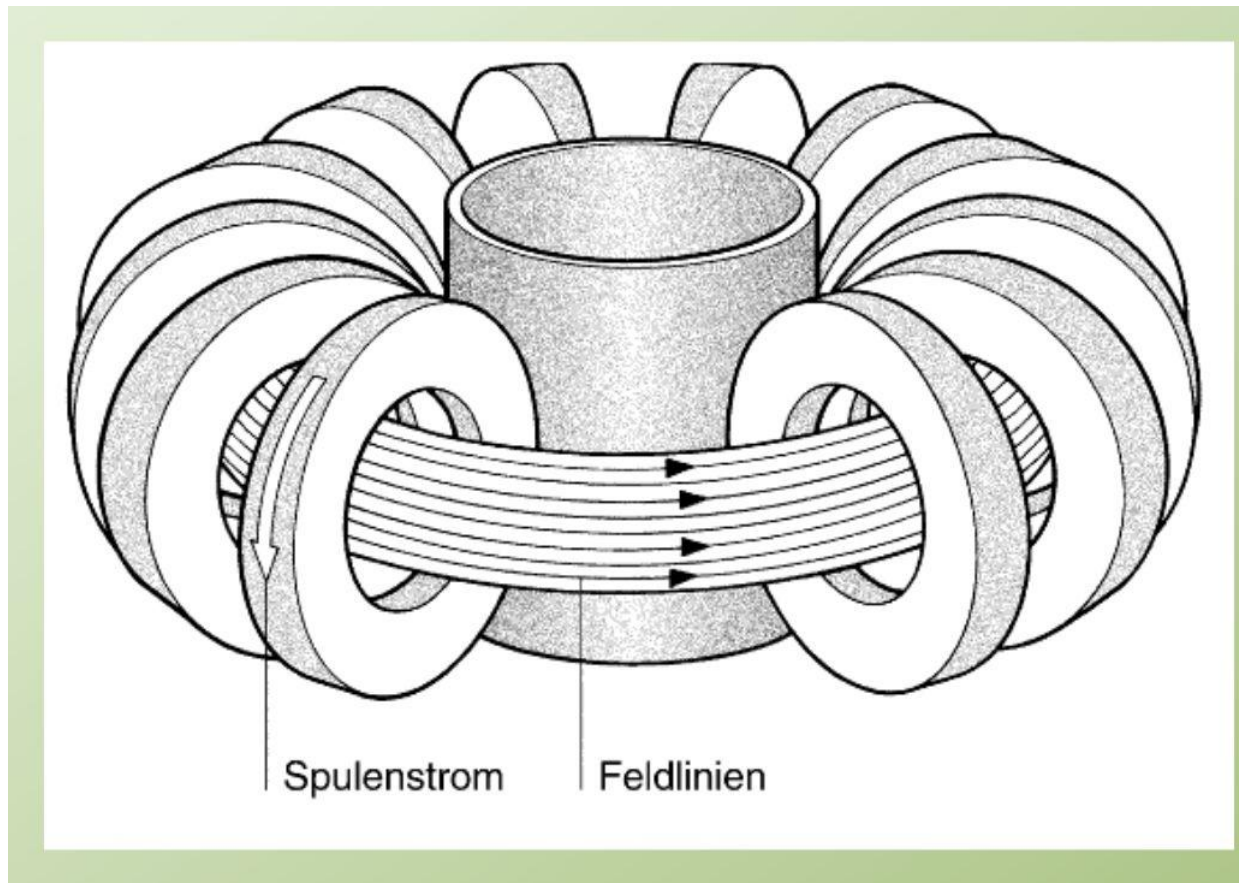
TOKAMAK = TOroidaljnaja KAMera s MAgnitnymi Katuškami  
ali TOroidaljnaja KAMera s AKsialnym magnetnym poljem

JET = Joint European Torus (Culham, Oxfordshire, U.K.; od 1984)  
(16 MW, 1 sekundo), [porabi pa v pulzu 500-1000 MW ← gen.vztrajnik]

ITER = International Thermonuclear Experimental Reactor  
(Cadarache, Francija. Načrti 2005, gradnja 2013-2019,  
plazma 2020, začetek fuzije 2027).  
Moč bo 500 MW, 500 sekund → bodoča elektrarna 3-4 GW

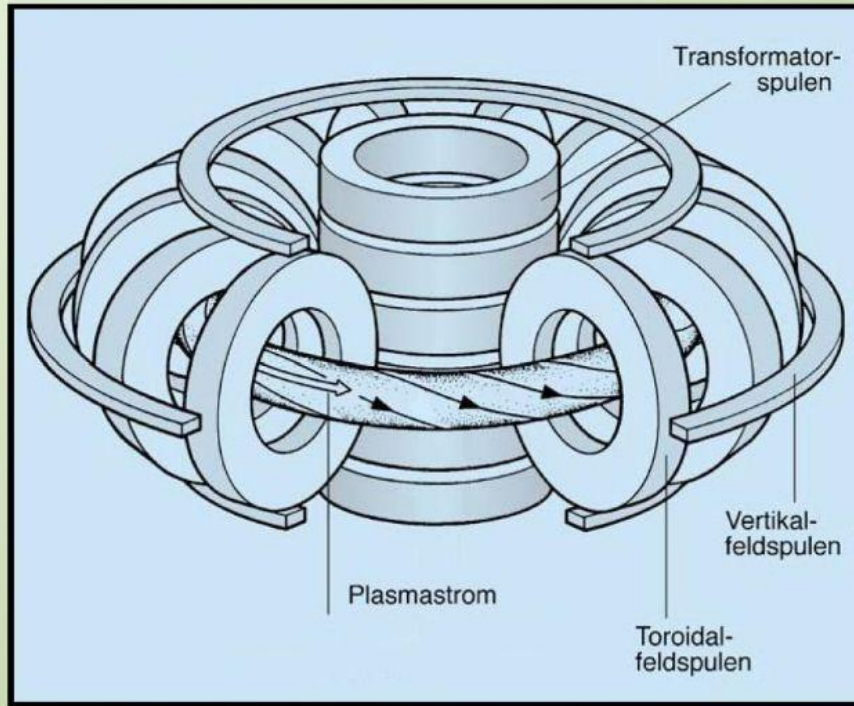
#### POGOJI ZA VŽIG:

Temperatura plazme	$100-200 \times 10^6 \text{ K}$
Gostota plazme	$10^{14} \text{ delcev/cm}^3$
Čas zadrževanja energije	1-2 s

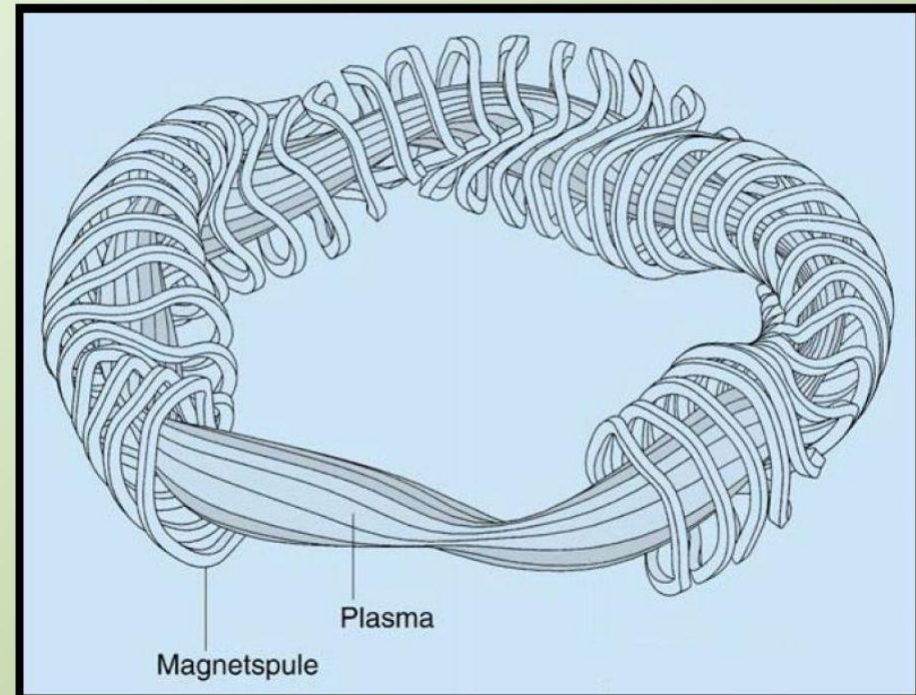


Princip tokamaka: nabiti delci krožijo po vijačnici okrog magnetnih silnic

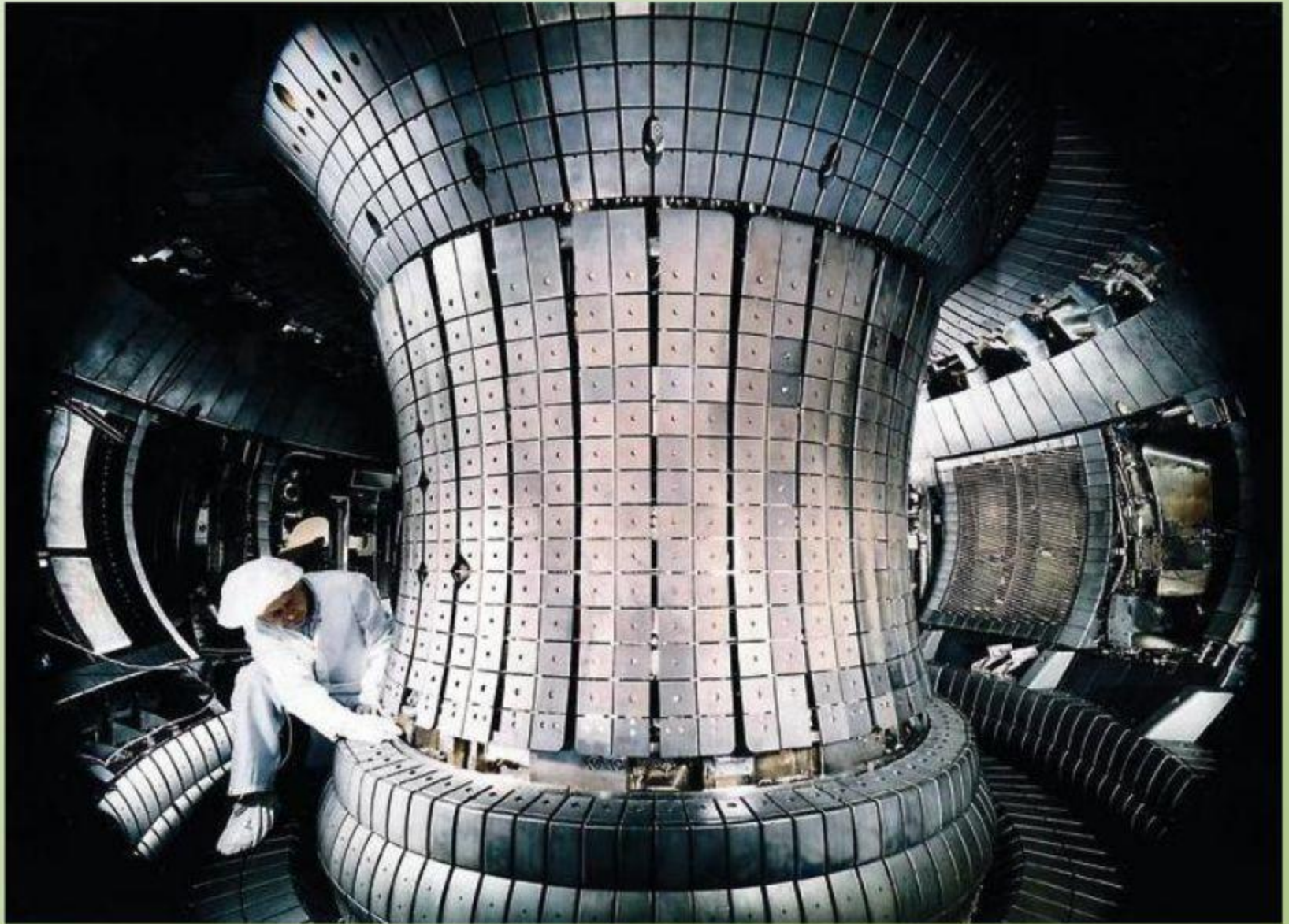
## Tokamak



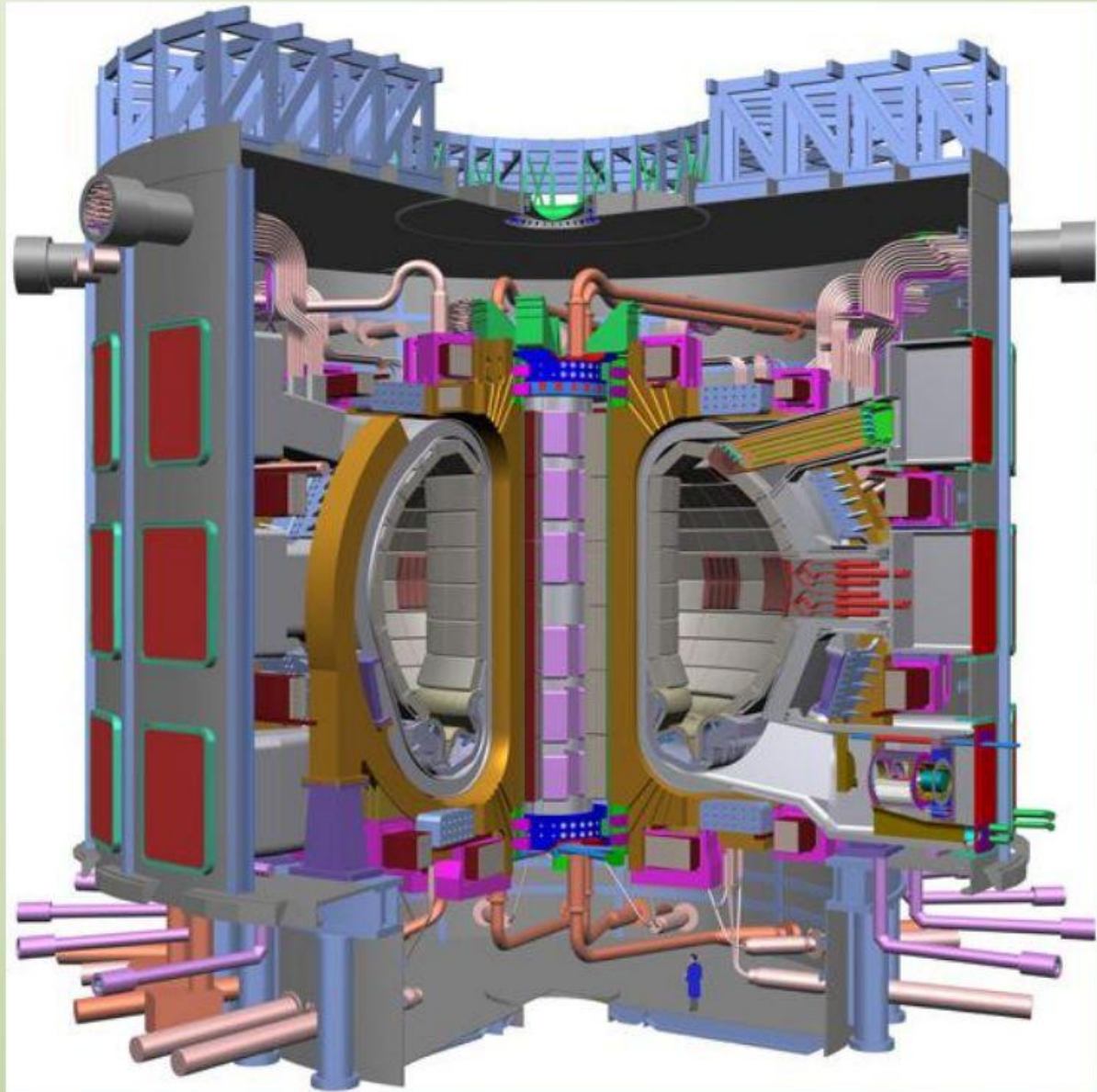
## Stellarator

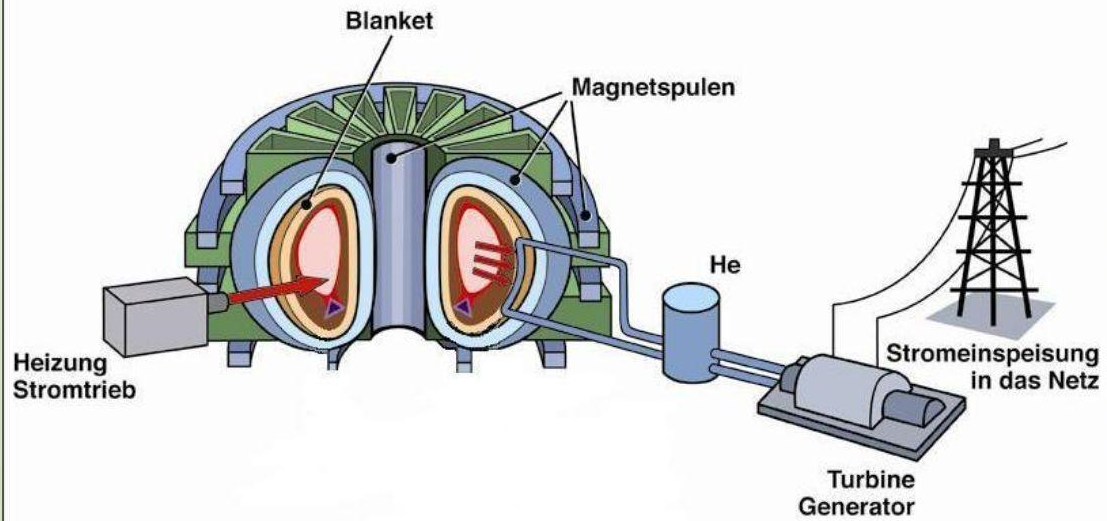
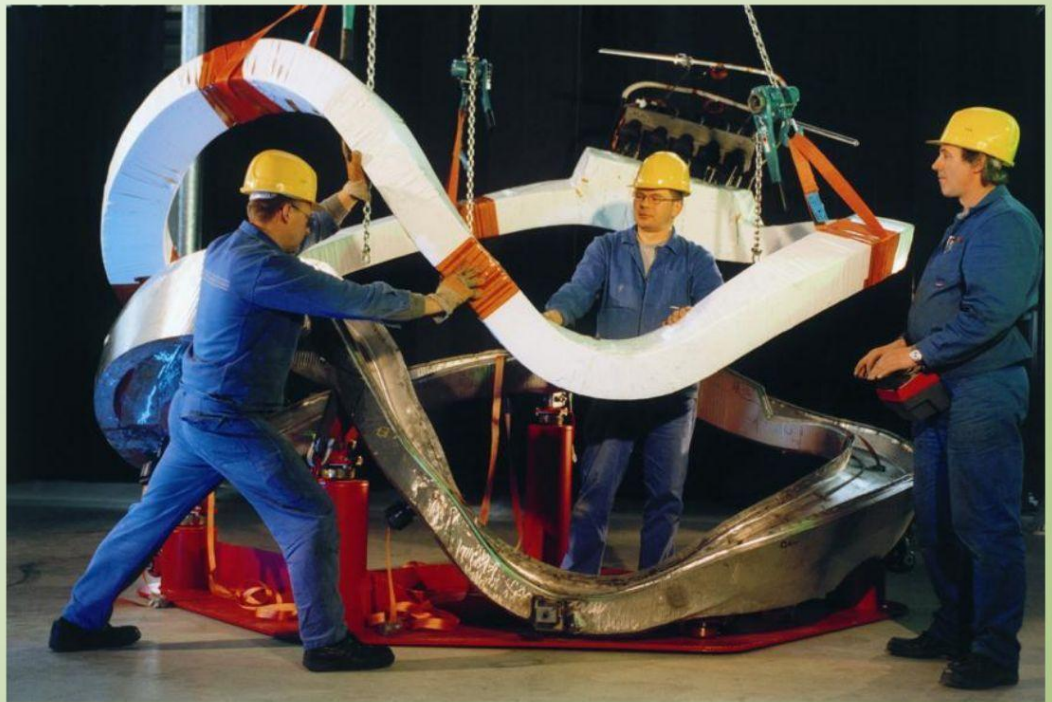


# JET

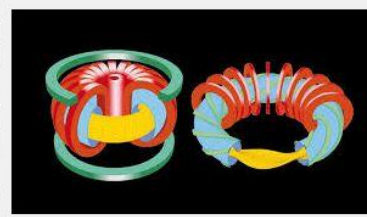
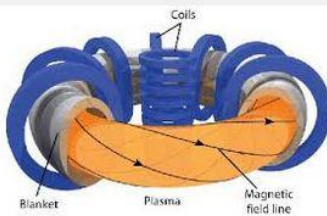
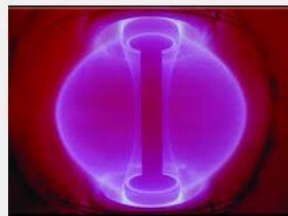
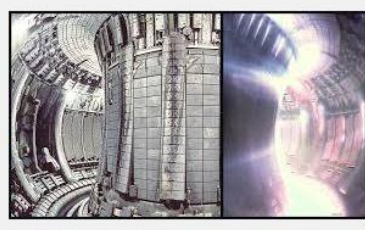
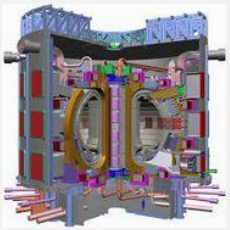
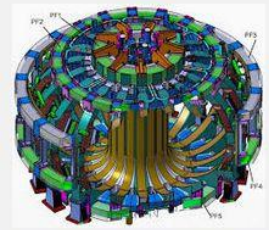
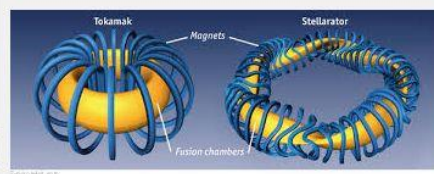
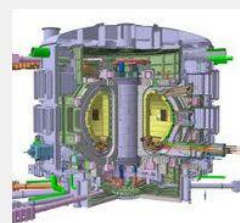
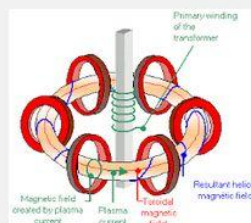
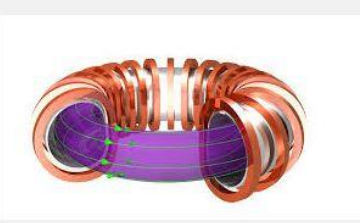
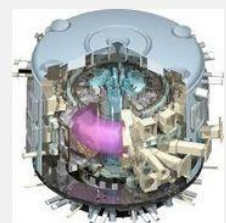


# ITER









## 4. DRUGE ALTERNATIVE:

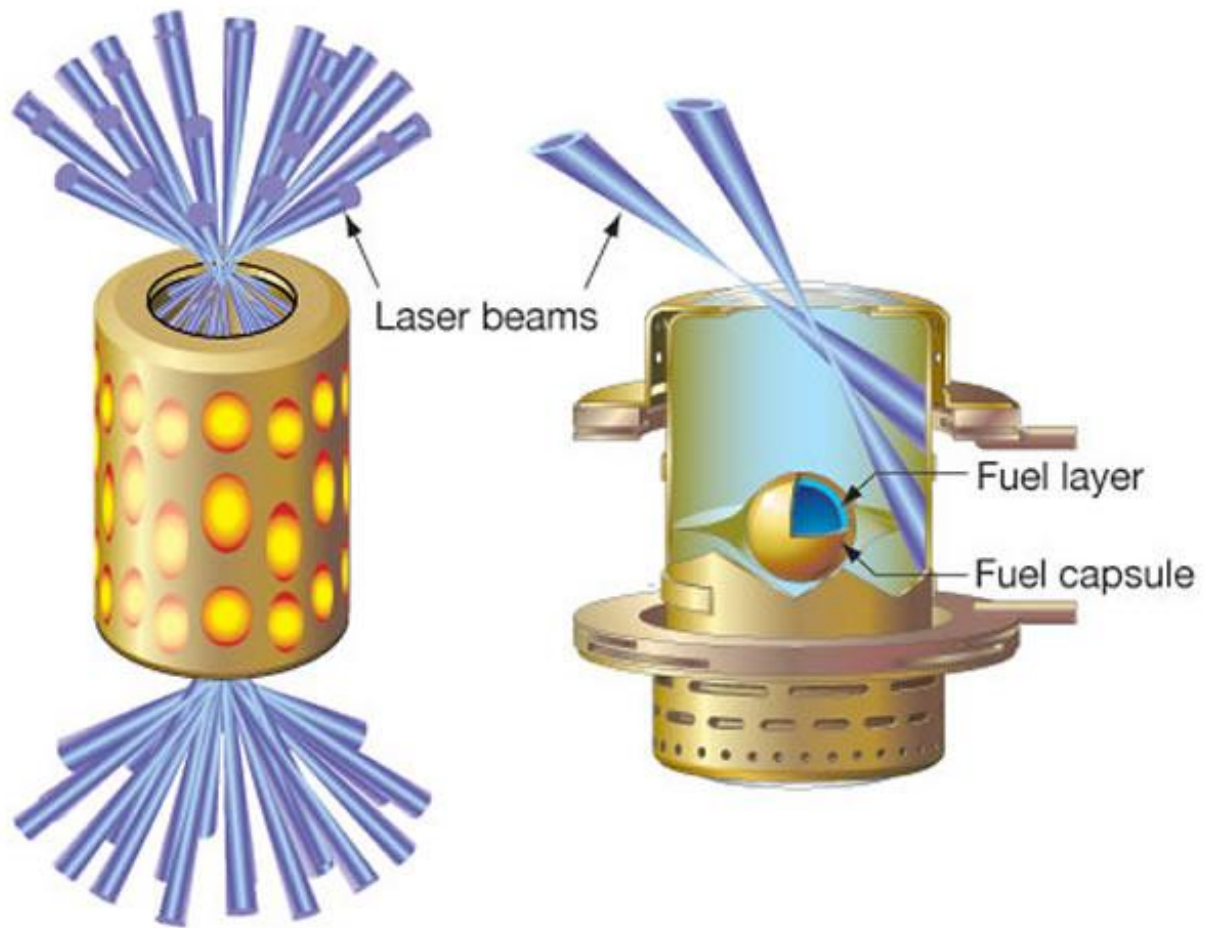
### STISKANJE Z LASERJEM ALI CURKI DELCEV...

NIF (National Ignition Facility), Livermore, Kalifornija 2009.  
192 laserskih žarkovnih linij sproži v nekaj ps blisk 500 TW.  
Do danes so dosegli le 1/3 energije potrebne za vžig.

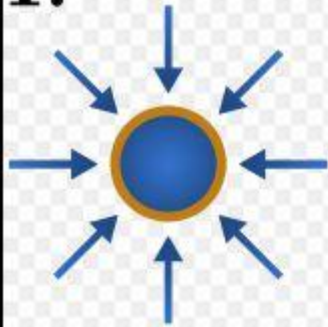
Laser Mégajoule, Bordeaux 2015.  
176 laserskih žarkovnih linij podeli 1,8 MJ vsaki tarči.

Zrno z mešanico  $^2\text{H}_2$ ,  $^2\text{H}^3\text{H}$  in  $^3\text{H}_2$  je obdano s težko kovino in litijem.  
Veliko je  $\sim 1\text{mm}^3$  (glavica bucke) in tehta  $\sim 10\text{ mg}$ .

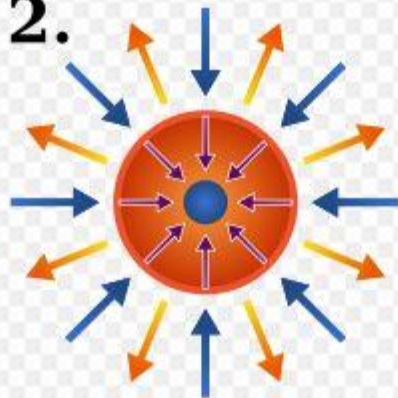
Zrno se segreje direktno (laser) in indirektno (laser sproži žarke X v steni votline). Vrhnja plast zrne eksplodira navzven. Zaradi reakcije implodira sredica zrna navznoter in doseže visoko temperaturo in gostoto in sproži nekaj fuzij. Kadar bosta dovolj veliki, bo prišlo do vžiga celega zrna.



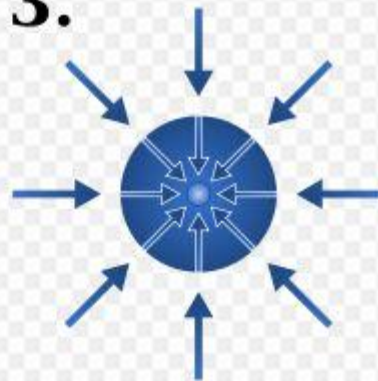
1.



2.

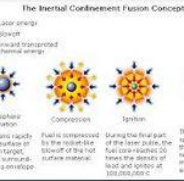
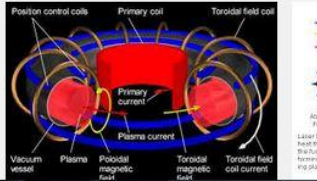
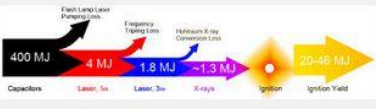
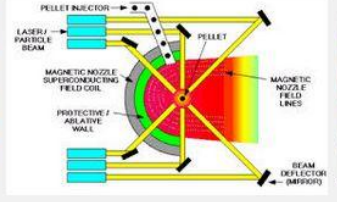
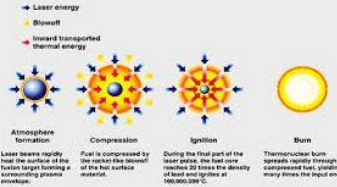
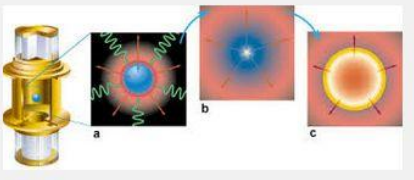
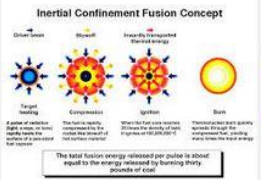
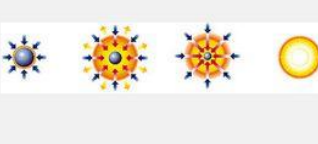
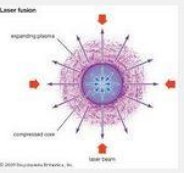
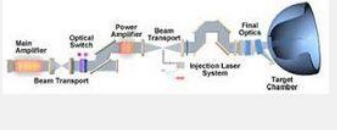
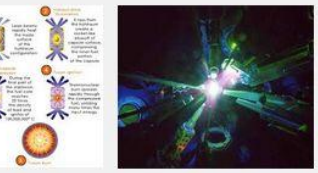
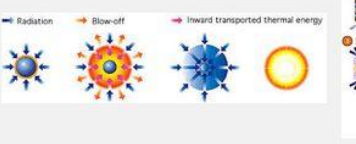
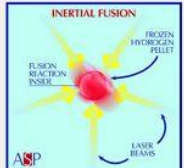
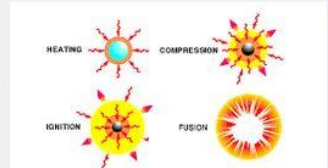
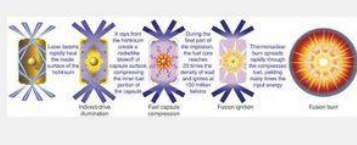
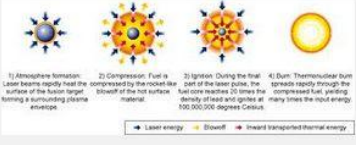
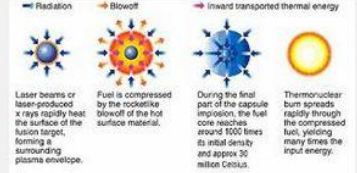
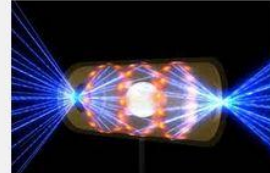
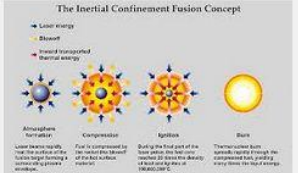
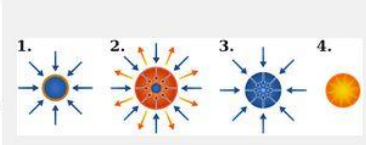
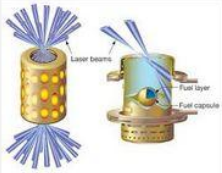


3.



4.





HLADNA FUZIJA – znamenita blamaža !

KAKO LAHKO PRIČARAMO TLAK  $10^{26}$  BAR?

(M.Rosina, OMF 36 (1989) 192)

M.Fleischmann in S.Pons (J.Electroanal.Chem 261 (1989) 301) sta objavila, da sta z elektrolizo težke vode dosegla fuzijo. Njun argument je bil butast.

*Z električnim potencialom na elektrodi dvignemo kemični potencial  $\mu$  vsakega devterona za 0,8 eV in dveh skupaj za 1,6 eV. Če uporabimo formulo  $\mu = \mu_0 + kT \ln p/p_0$ , ( $p_0$  je zunanji tlak 1 bar), temu ustreza tlak  $p=10^{26}$  bar. To pa je tlak znotraj atomskega jedra, ki drži nukleone dovolj blizu za fuzijo.*

To je seveda zloraba formule. Kemiki zaradi preglednosti res radi pišejo  $\mu = \mu_0 + kT \ln f(p,T)/f(p_0,T)$  in količino  $f$  imenujejo fugativnost. Vendar je enačba stanja ravno tako komplicirana, le da je komplikacija skrita v funkciji  $f$ .