



Plazma – czwarty stan materii

Dariusz Twaróg

IFJ PAN, Zakład Fizyki Transportu Promieniowania
(NZ 54)

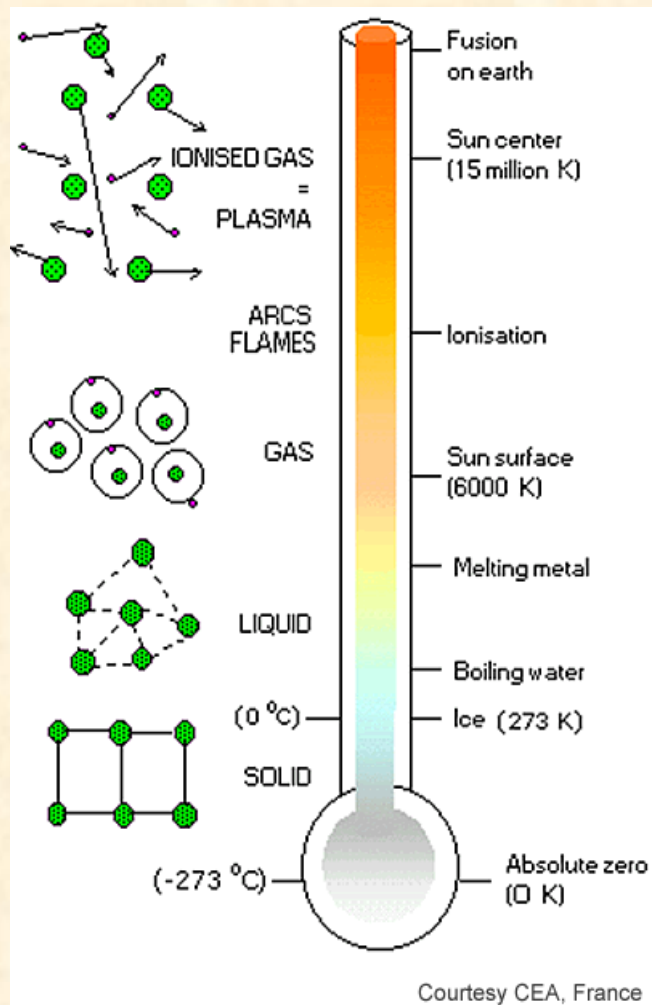
13.05.2011

Seminarium WFIS AGH

Plan:

1. Plazma 4 stan materii
2. Kontrolowana Synteza Termojądrowa
3. Tokamaki, parametry i budowa
4. Oddziaływanie plazma-materia
5. Projekt ITER

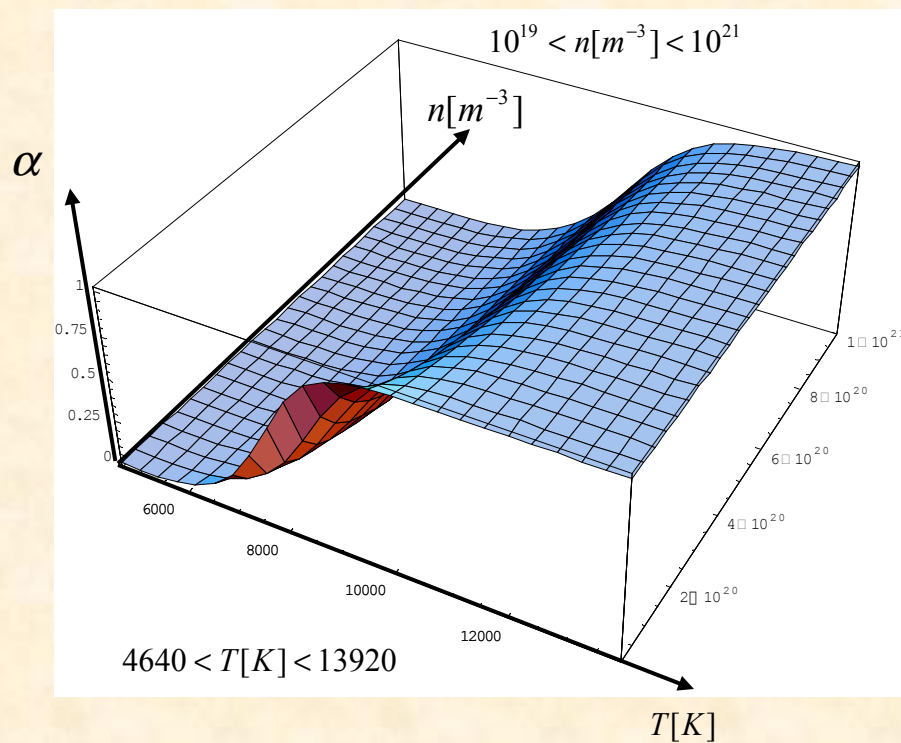
Plazma – 4 stan materii



Stopień jonizacji $\alpha = \sqrt{\frac{\beta / p}{1 + \beta / p}}$

gdzie: $\beta = g_e \frac{g_i}{g_n} \left(\frac{2\pi m_e}{h^2} \right)^{3/2} (kT)^{5/2} \exp\left(-\frac{eV_j}{kT}\right)$

ciężary statystyczne: $g_e = 2, g_i / g_n = 1$

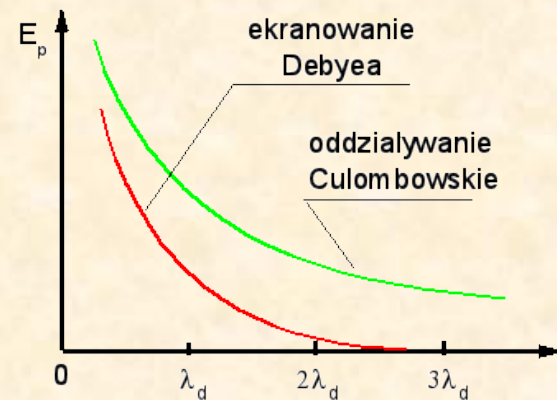


Plazma – podstawowe własności

1. Quasi-neutralność: $n_e = \sum_i n_i Z_i$ (min. 1~10% cząstek naładowanych + gaz neutralny)

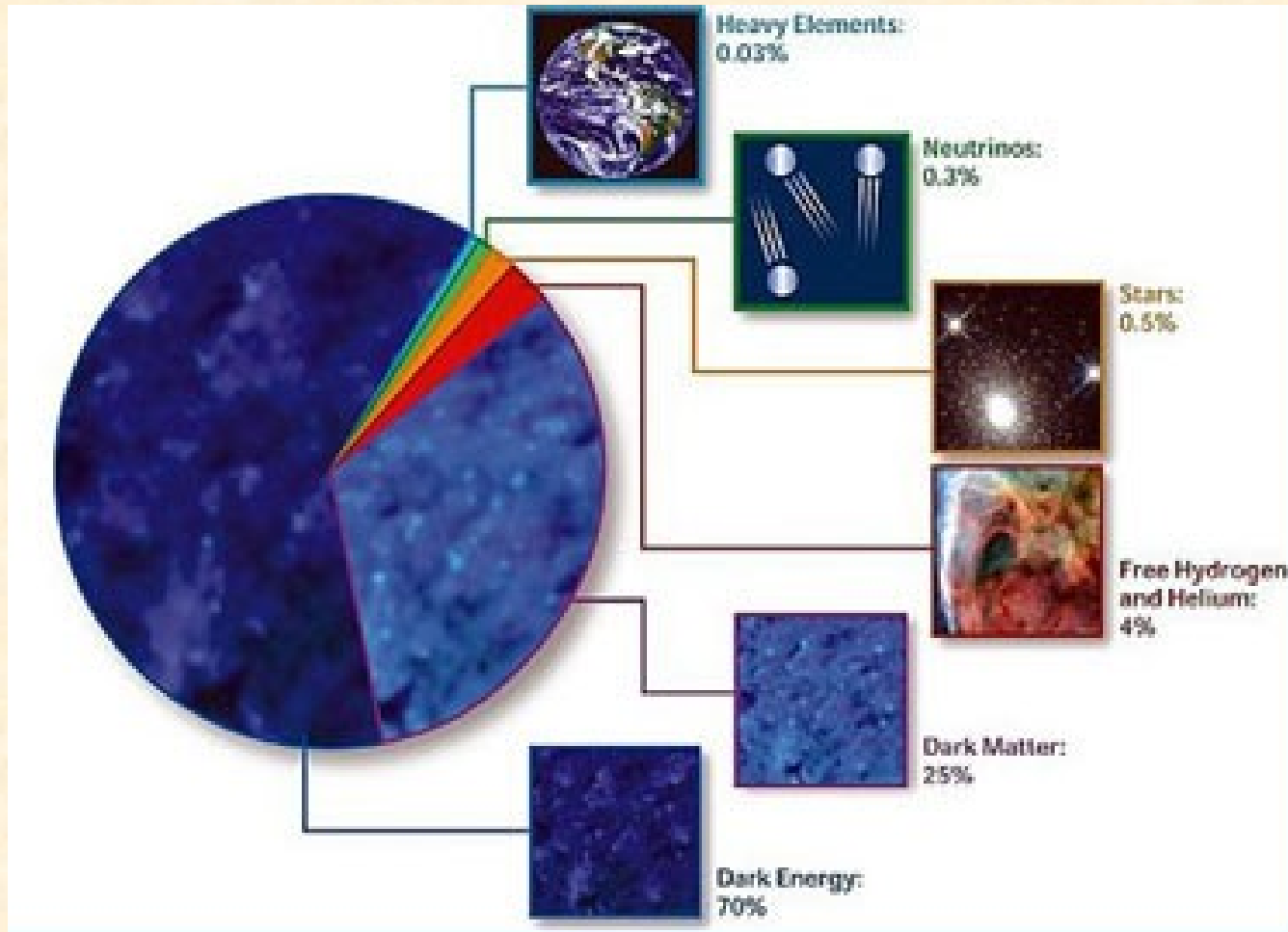
2. Rozmiar obłoku plazmowego musi być dużo większe od promienia Debyea

$$L \gg \lambda_d \quad \text{gdzie:} \quad \lambda_d = 2.35 \cdot 10^5 \left(\frac{T}{n} \right)^{1/2} [m] \quad T \text{ w [keV]}$$



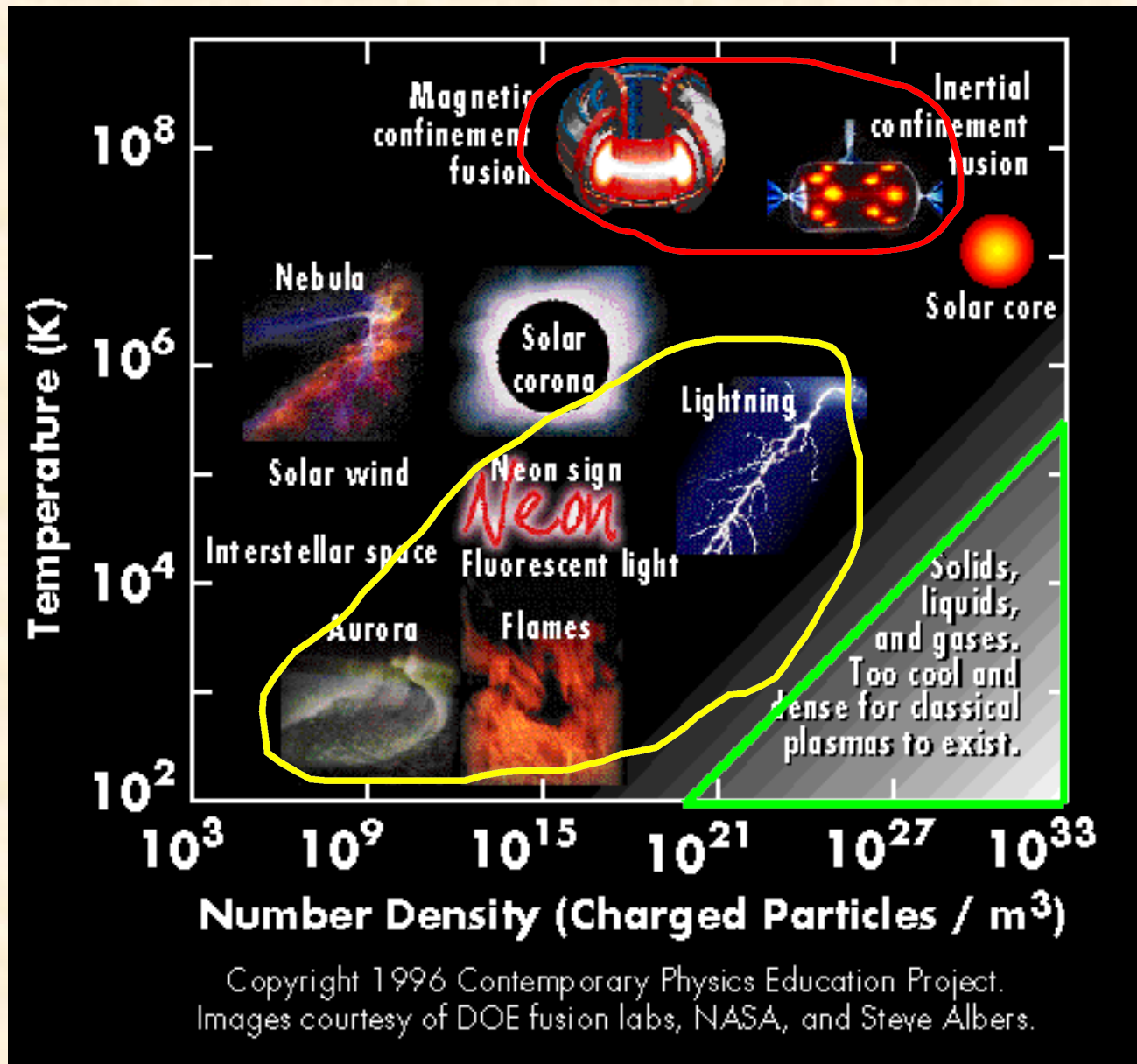
dla: $T = 10 [keV]$, $n = 10^{20} [m^{-3}]$ otrzymujemy $\lambda_d = 6.9 \cdot 10^{-6} [m]$

Plazma - występowanie

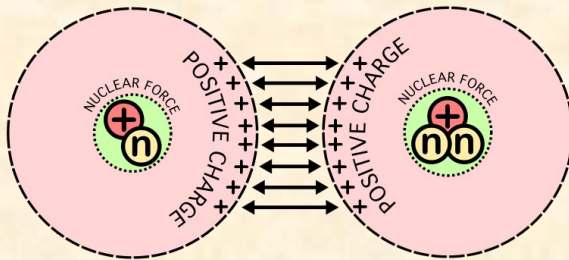


Obserwujemy około 4,83% materii we wszechświecie z czego 93,167% znajduje się w stanie Plazmy!!!

Plazma - występowanie

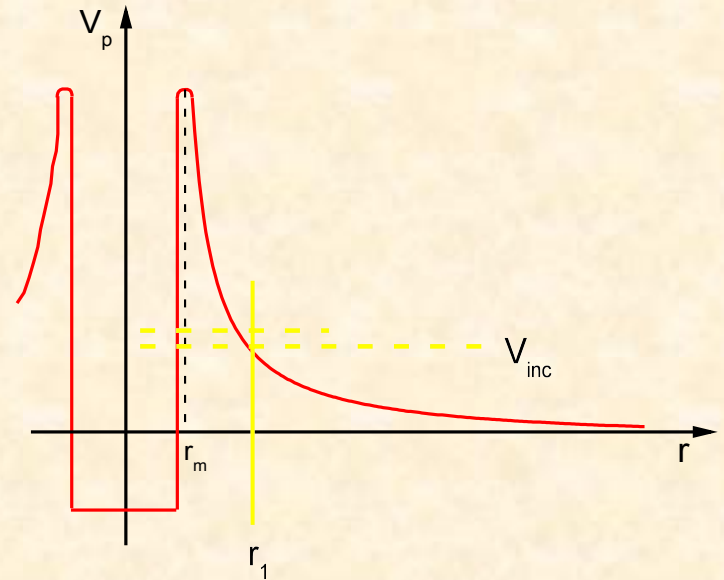


Efekt tunelowy

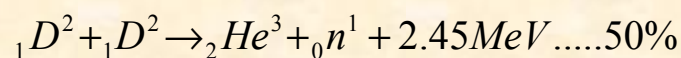
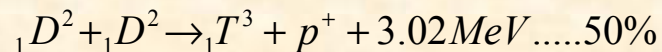
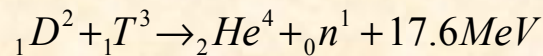


Energia potencjalna: $V_p = \frac{Z_1 Z_2 q^2}{4\pi\epsilon_0 r}$

zasięg silnych oddziaływań jądrowych: $r_m \approx 10^{-15} [m]$



Prawdopodobieństwo przejścia: $P \approx \exp\left(-2 \int_{r_m}^{r_1} \sqrt{(2m/\hbar^2)[V_p(r) - V_{inc}]} dr\right)$

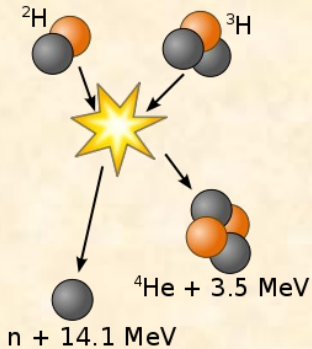
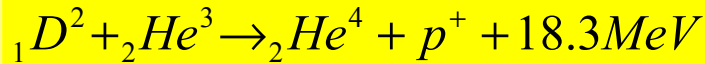
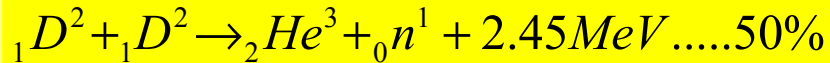
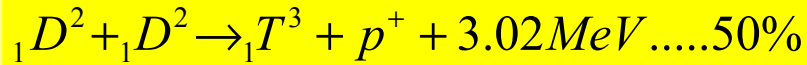
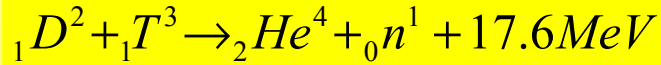


→ 0.68 [MeV]

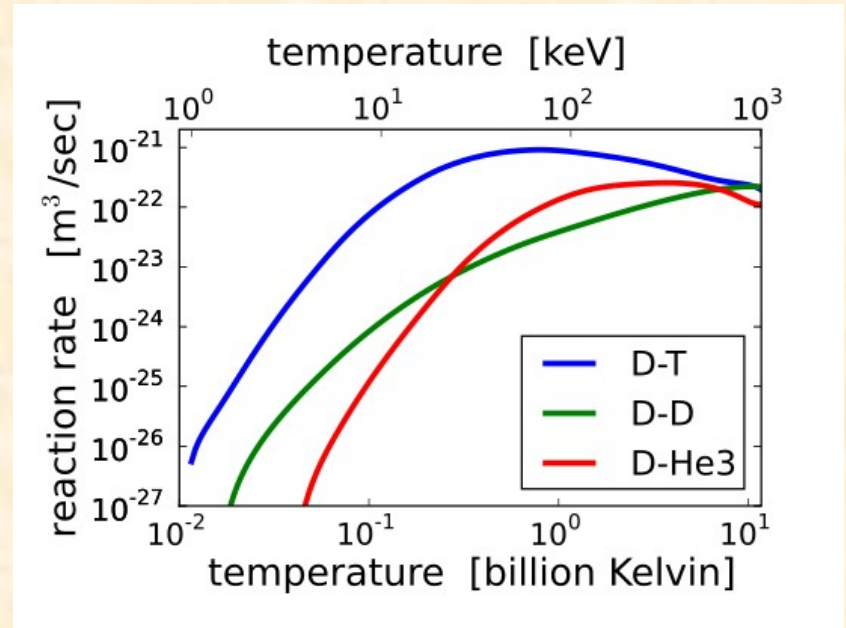
→ 0.76 [MeV]

Efekt tunelowy → $\cong 10 [keV]$

Kontrolowana Synteza Termojądrowa



reakcja D+T wydaje się być najłatwiejszą do zrealizowania

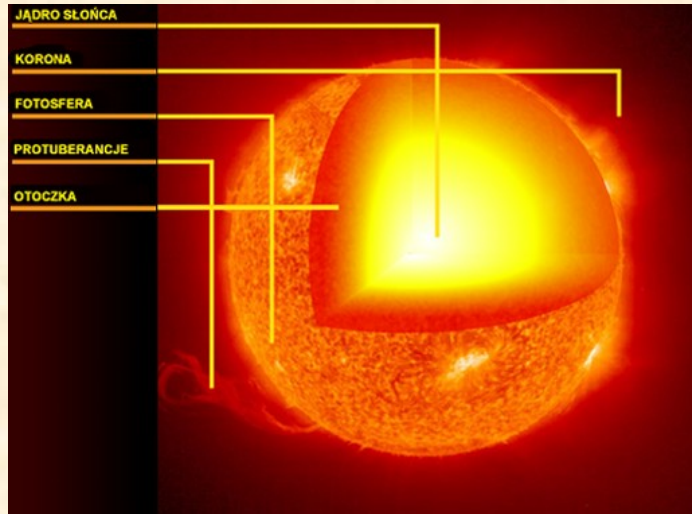


The „triple product”: $nT\tau_E > 5 \times 10^{21} [keVsm^{-3}]$

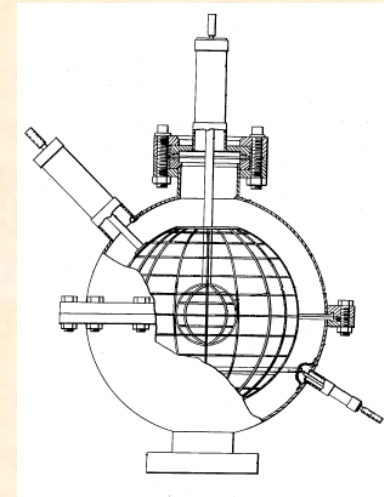
współczynnik Q: $\frac{P_{syntezy}}{P_{orzewania}}$ dla reaktora: $Q \geq 15$

Metody utrzymania plazmy

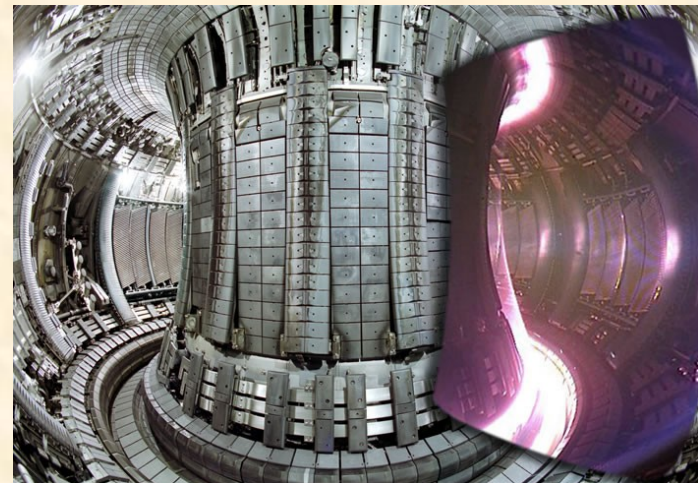
1. Grawitacyjne



2. Elektrostatyczne



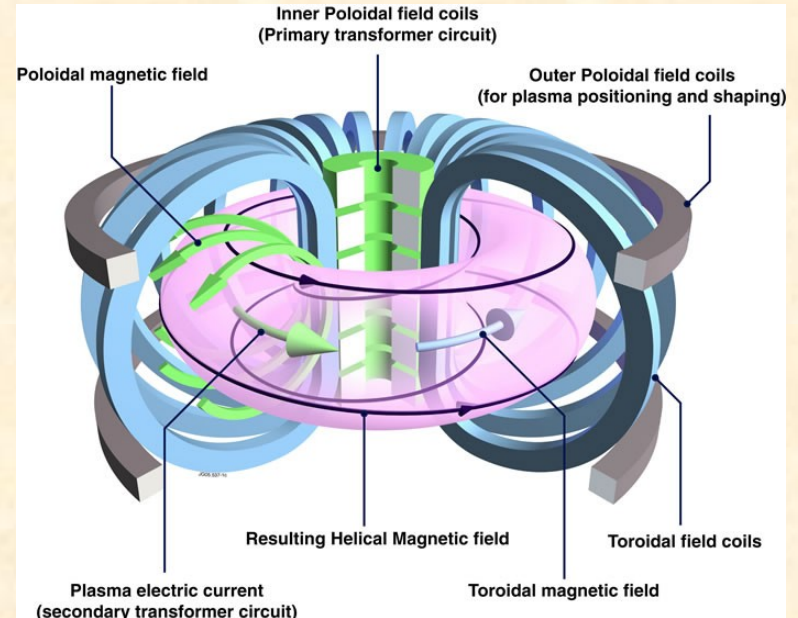
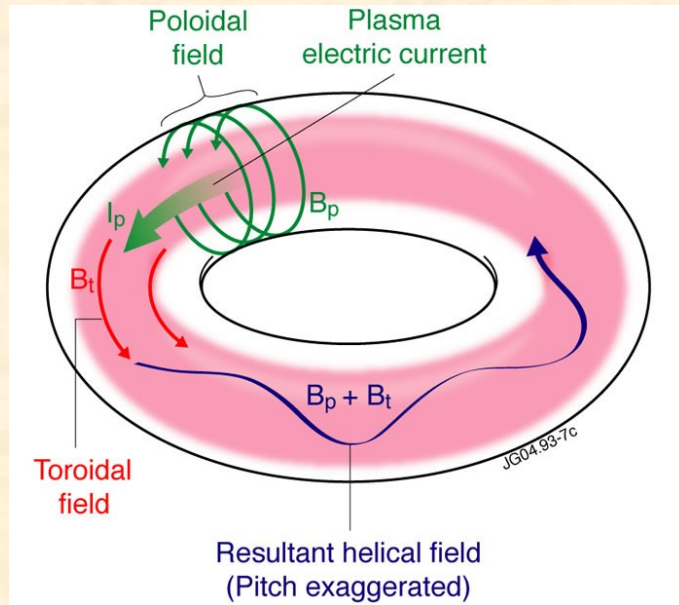
3. Inercyjne $nT\tau_E > 5 \times 10^{21} [keVsm^{-3}]$ 4. Magnetyczne



Zamknięte pułapki magnetyczne - Tokamak



Igor Tamm & Andrei Sakharov w oparciu o koncepcję Oleg Lavrentyev „projektują” pierwszy Tokamak T1 (1956r.)



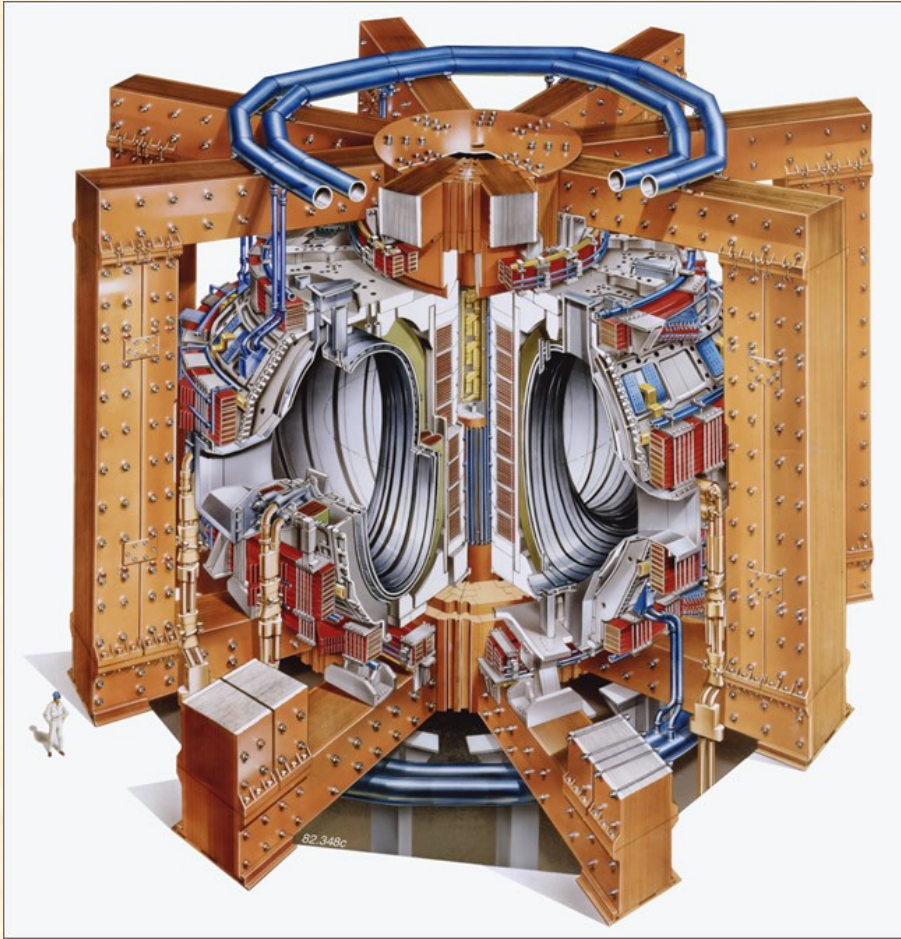
pole magnetyczne: $B_T \approx 10 \cdot B_P$, $B_T \sim 1/R$

niskie ciśnienie: $nk(T_e + T_i) \ll \frac{B^2}{2\pi\mu_0}$, $\beta \ll 1$

$$\nabla p = j \times \vec{B} [Nm^{-3}]$$

Zamknięte pułapki magnetyczne - Tokamak

JET – Joint European Torus, Culham, Anglia (1983r.)



duży promień R	2.96	[m]
Mały promień r	1.25	[m]
objętość plazmy	100	[m ³]
natężenie prąd	4.8	[MA]
pole toroidalne	3.45	[T]
moc fuzji	16.1	[MW]
czas utrzymania	>60	[s]
współczynnik Q	0.7	

„triple product” $4.4 \cdot 10^{22} [keVsm^{-3}]$

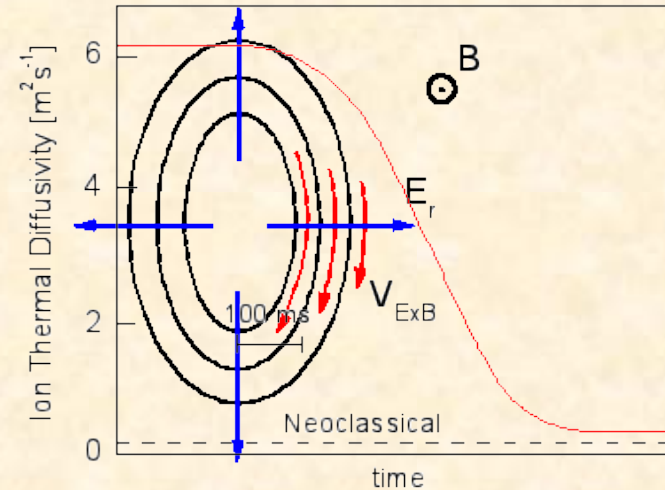
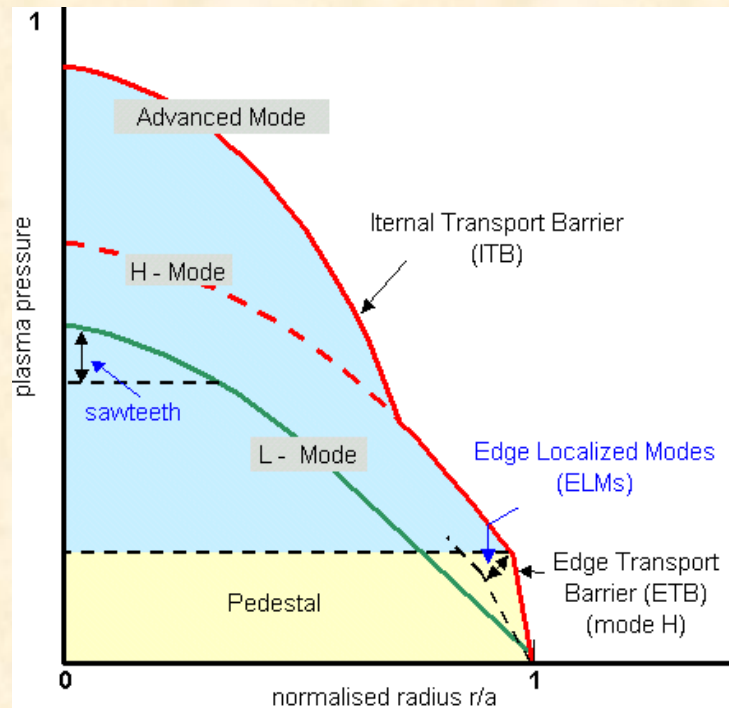
wymagana wartość $nT\tau_E > 5 \times 10^{21} [keVsm^{-3}]$

Zalety: prostota konstrukcji, duża objętość pułapowanej plazmy

Wady: niskie ciśnienie plazmy, niestabilności MHD i kinetyczne, praca w trybie **impulsowym**

High Level Mode

1982r. w tokamak ASDEX zaobserwowano przejście z modu L do H (dwukrotnie dłuższy czas utrzymania, temp. i koncentracja). Występowanie modu H jest uwarunkowane jest pojawieniem się tzw. Internal Transport Barrier (ITB) obszaru w którym fluktuacje gęstości są silnie zredukowane.



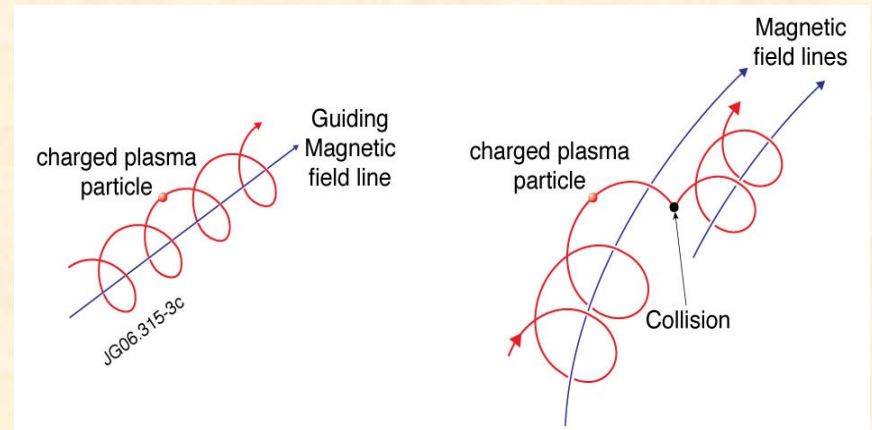
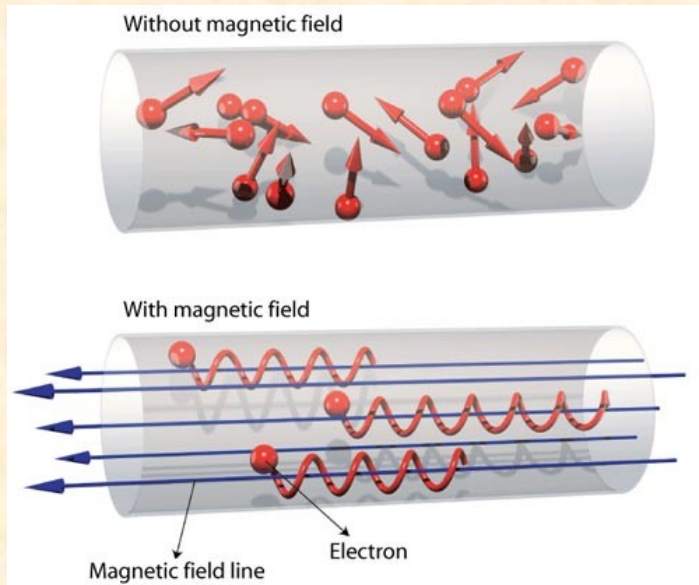
E_{xB} „velocity shear” pomaga zredukować turbulencje, są one stabilizowane przez tzw. shear rate

$$E_r = \frac{\nabla p}{en_i Z_i} - v_P B_T + v_T B_P$$

$$\omega_{ExB} = \left| \frac{dv_{ExB}}{dr} \right|$$

Dane eksperymentalne pokazują iż wartość ω_{ExB} jest blisko 2~3 razy różna od liniowego tempa wzrostem większości z niestabilnych modów

Plazma w polu magnetycznym



w poprzek pola magnetycznego:

$$D_{\perp} \equiv \frac{D_{e,i}}{1 + (\omega_{e,i} \tau_{ei})^2} \approx \frac{D_{e,i}}{(\omega_{e,i} \tau_{ei})^2}$$

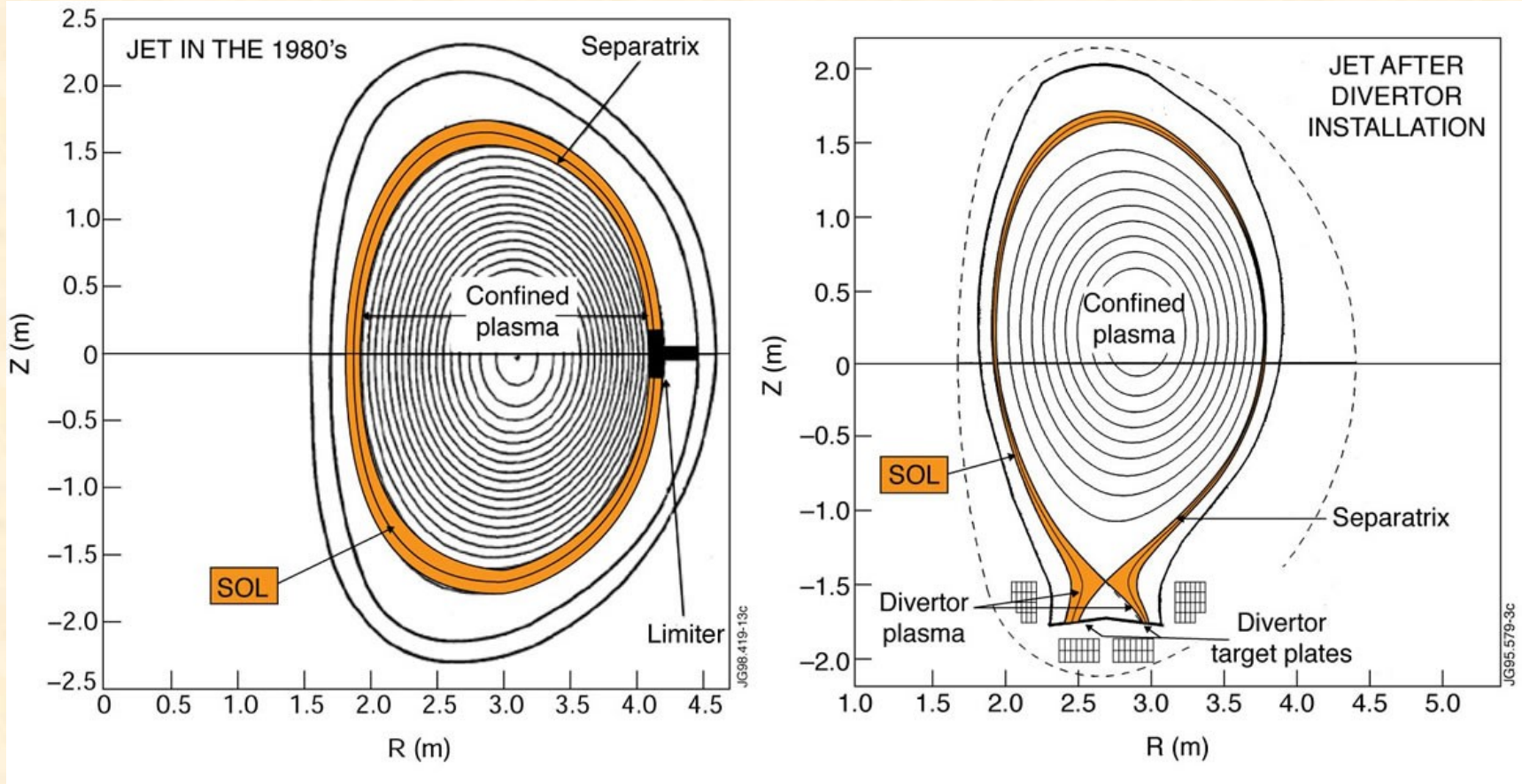
Plazma jest ośrodkiem turbulencyjnym !!!

$$D_{\perp} \approx 1/B^2 \quad \delta B, \delta E, \delta T, \delta n \quad \longrightarrow \quad D_B \equiv \frac{kT_e}{16eB}$$

dla $T=100[\text{eV}]$, $B=1[\text{T}]$:

$$\begin{cases} D_{\perp} = 5.49 \cdot 10^{-4} [\text{m}^2 \text{s}^{-1}] \\ D_B = 6.25 [\text{m}^2 \text{s}^{-1}] \end{cases}$$

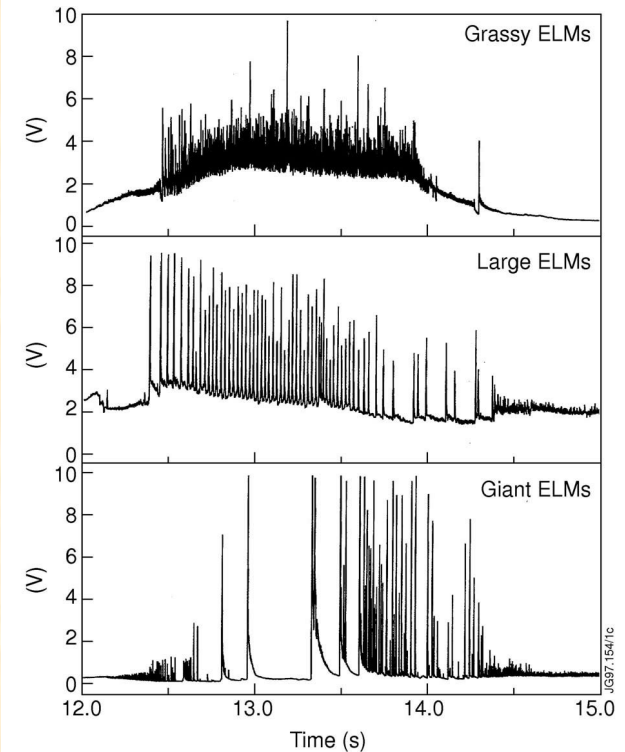
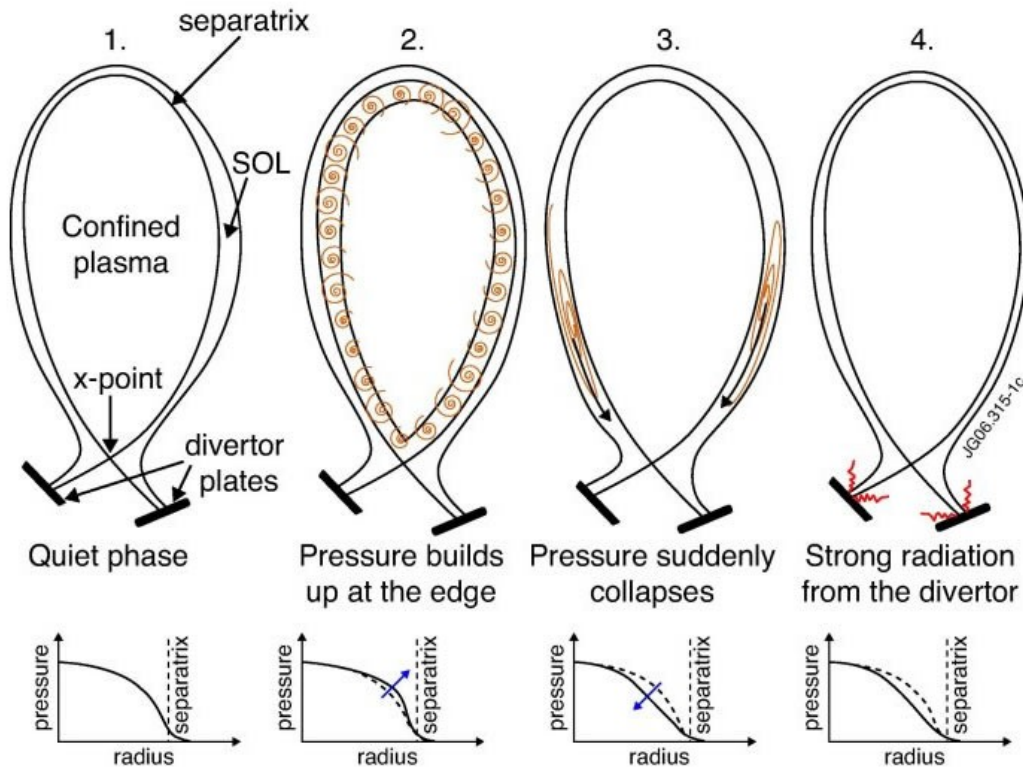
Limiter, Divertor



szerokość warstwy SOL: $\lambda_n = \left(\frac{D_{\perp} L_C}{c_s} \right)^{1/2}$ dla JET: $L \approx 30[m]$, $T_{LCFS} \approx 100[eV]$, $c_s \approx 10^5[ms^{-1}]$

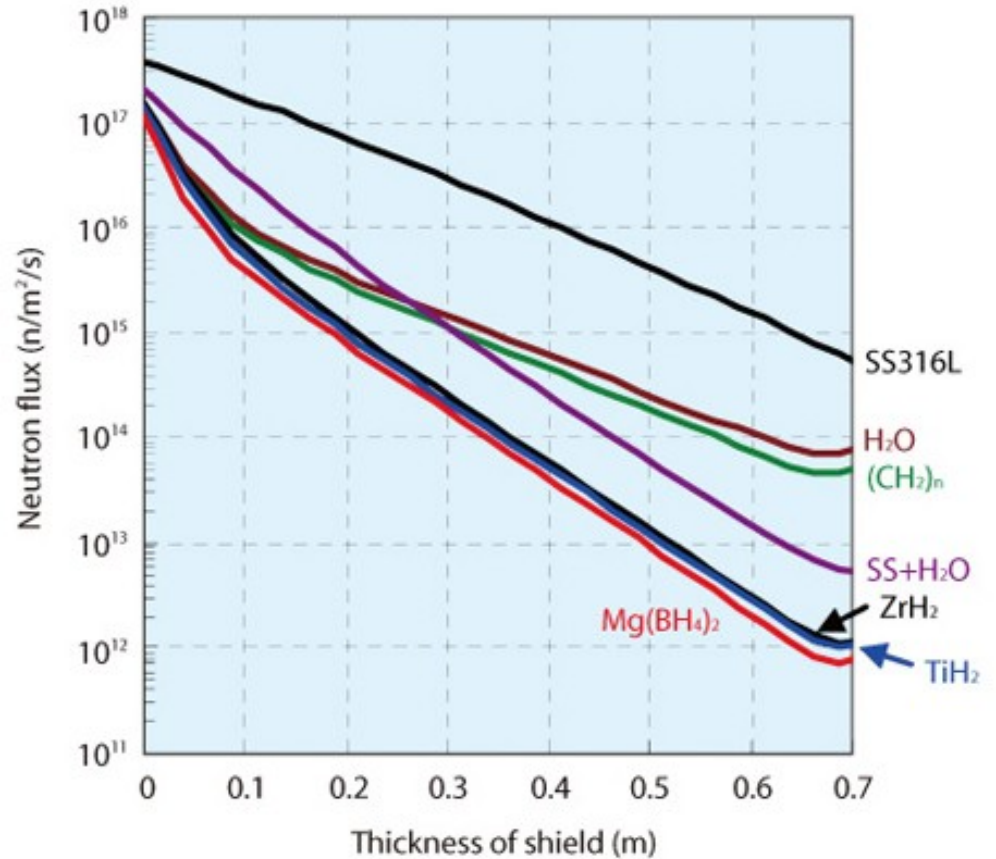
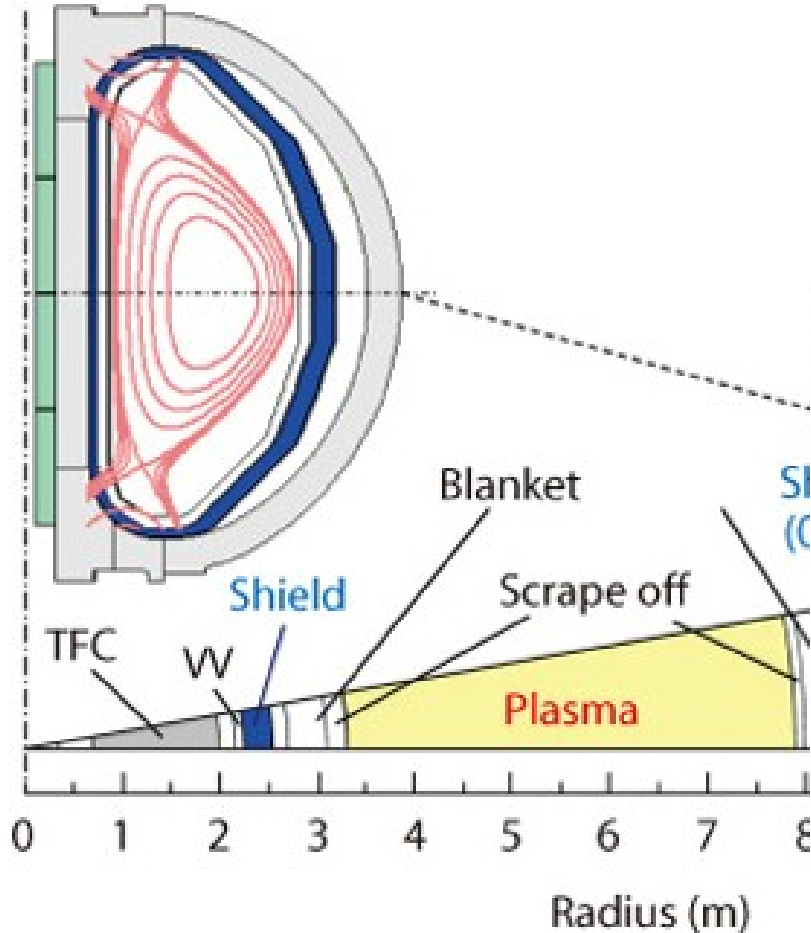
w pobliżu SOL: $D_{\perp} \approx 1[m^2s^{-1}]$, stąd: $\lambda_n \approx 1.7[cm]$, gęstość energii: $< 5[MW/m^2]$

Edge Localised Modes

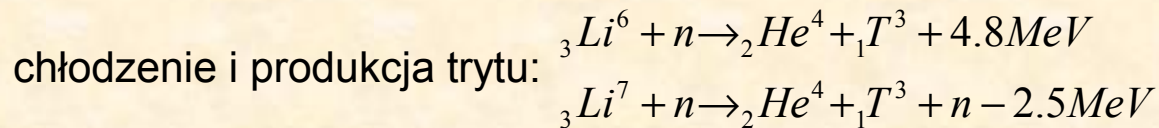


ELMsy (obecnie znanych jest ich 5 rodzajów) pobierają od 1 do 7% energii i cząstek, w tokamaku JET pojedyncze wyładowanie: $\sim 0.5 [MJ / m^2]$

Wpływ neutronów na pierwszą ściankę

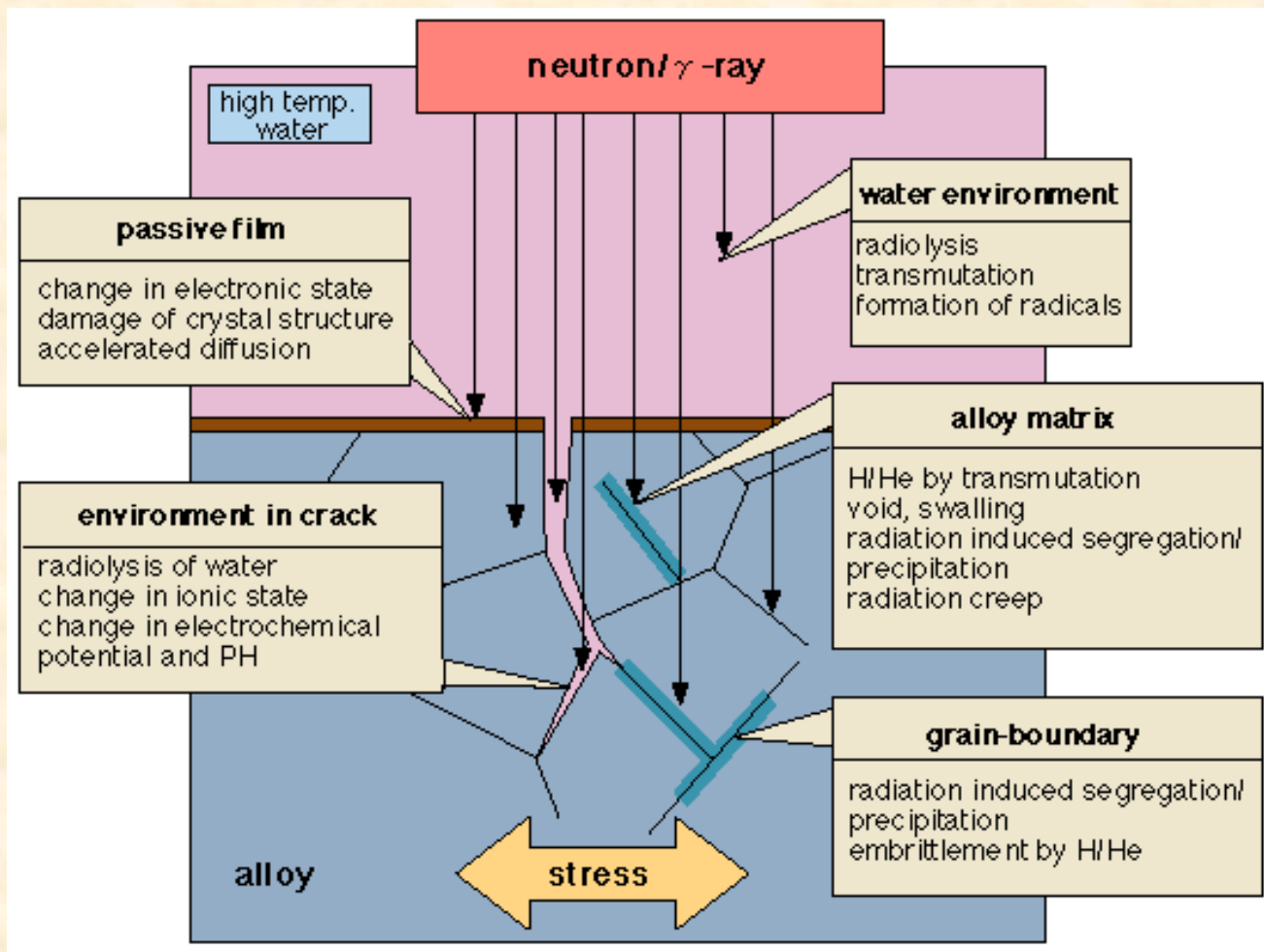


bezpieczna wartość strumienia neutronów dla materiałów nadprzewodzących $\sim 2 \cdot 10^{12} [n / sm^2]$



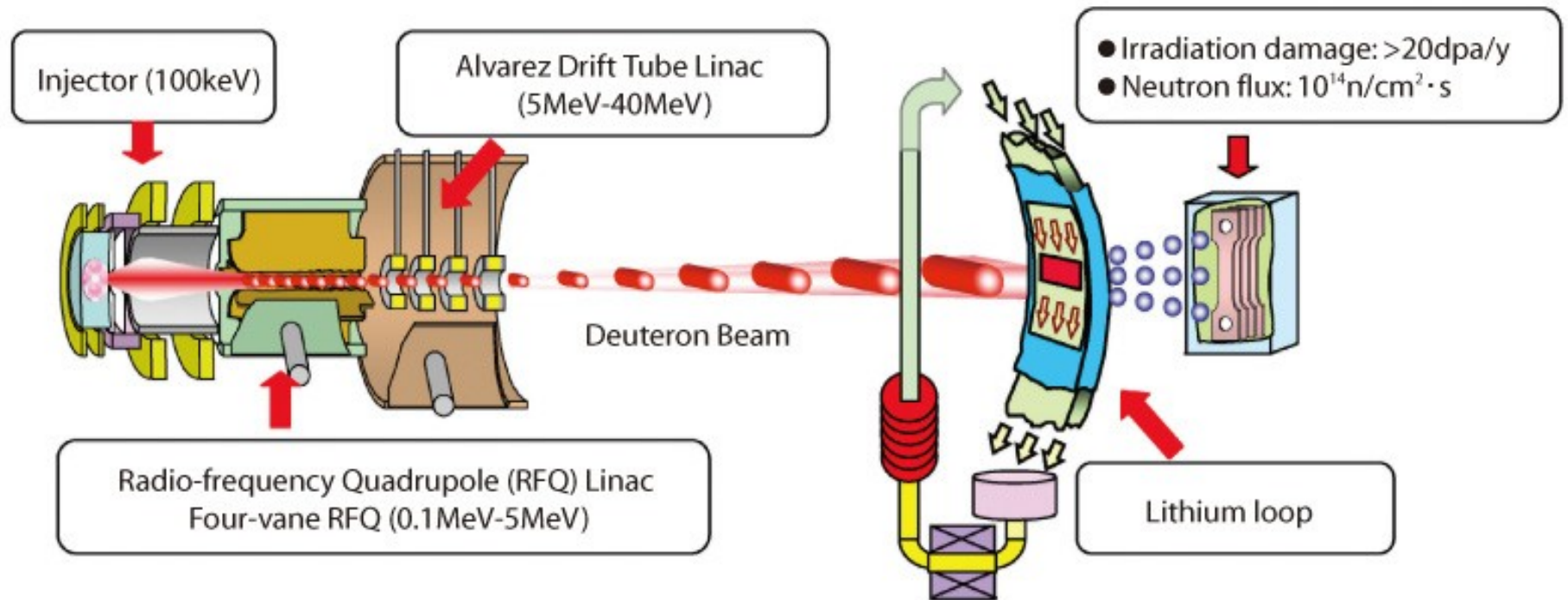
Wpływ neutronów ?

Spodziewane uszkodzenia radiacyjne: ~200 dpa/y (displacement pre atom)
w obecnych elektrowniach jądrowych wynosi on ~10 dpa/y



International Fusion Material Irradiation Facility - IFMIF

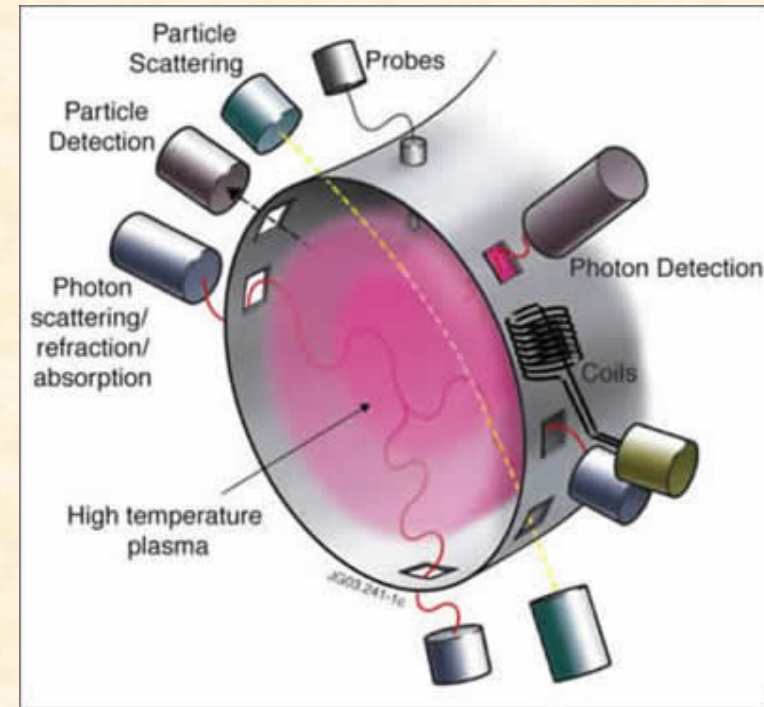
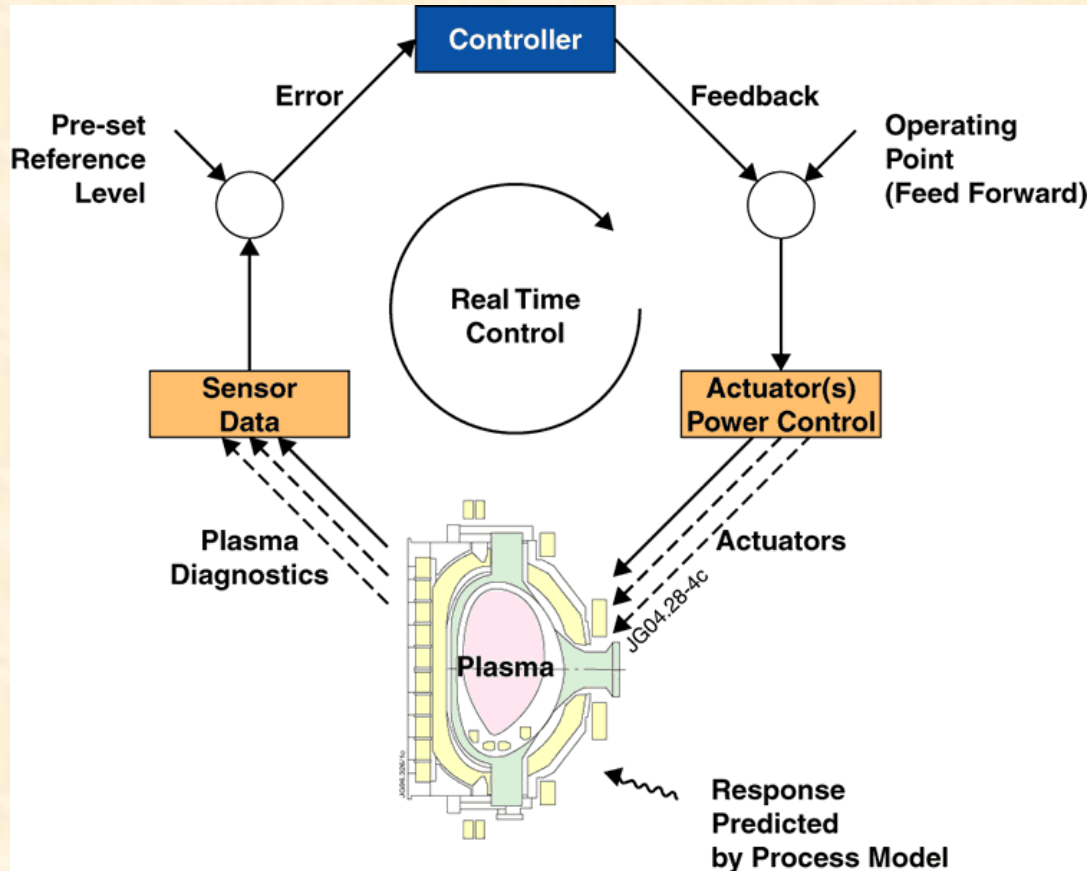
(EU, Rosja, USA, Japonia)



40[MeV] deuterony, natężenie prądu deuteronów $I = 250$ [mA]

Spodziewane uszkodzenia radiacyjne ~ 200 dpa/y (displacement pre atom)

Diagnostyka plazmy

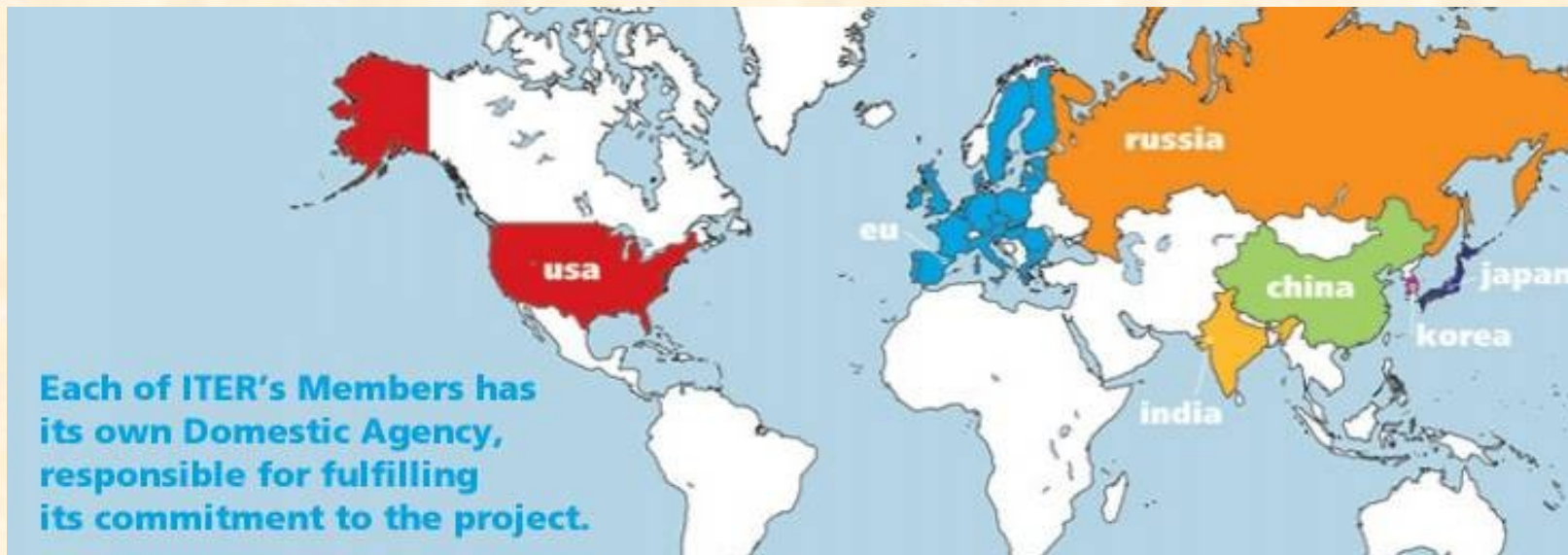


1. Poszukiwanie metod za pomocą których można uzyskać „stabilną” plazmę, poznanie niestabilności MHD.
2. Określenie czasu utrzymania oraz współczynników transportu.
3. Badanie i kontrola poziomu zanieczyszczeń.
4. Badanie fluktuacji w celu określenie ich wpływu na transport.
5. Rozwój metod ogrzewania plazmy.



International Thermonuclear Experimental Reactor

Genewa listopad 1985 (Francja, W. Brytania, ZSRR, USA), Japonia, Chiny (2003), Korea Południowa (2003), Indie (2005), Kazachstan (?), Kanada (2003-wycofanie)



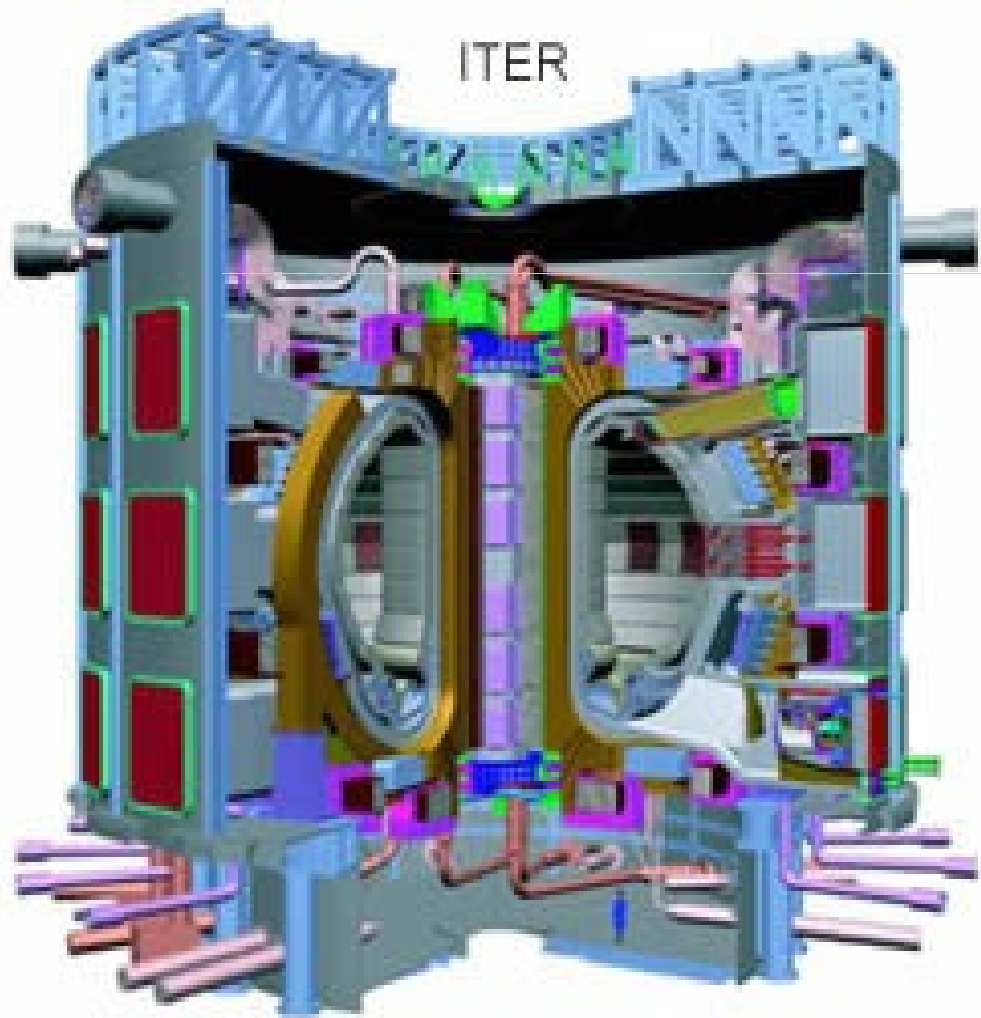
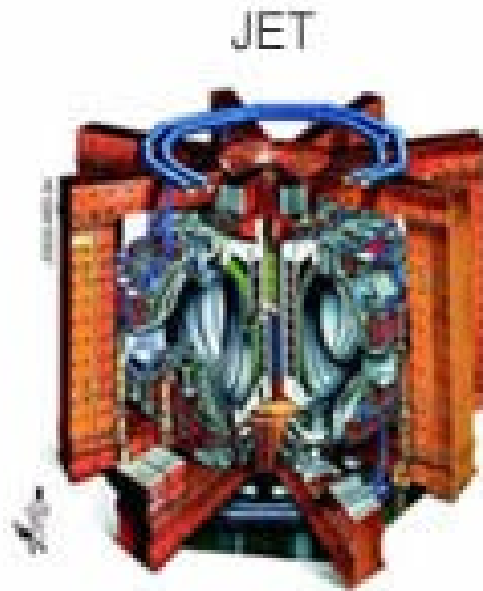
Cadarache (28 czerwca 2005)

>10 mld Euro (EU 4/11, Japonia 2/11, USA, Rosja, Korea, Chiny, Indie 1/11)



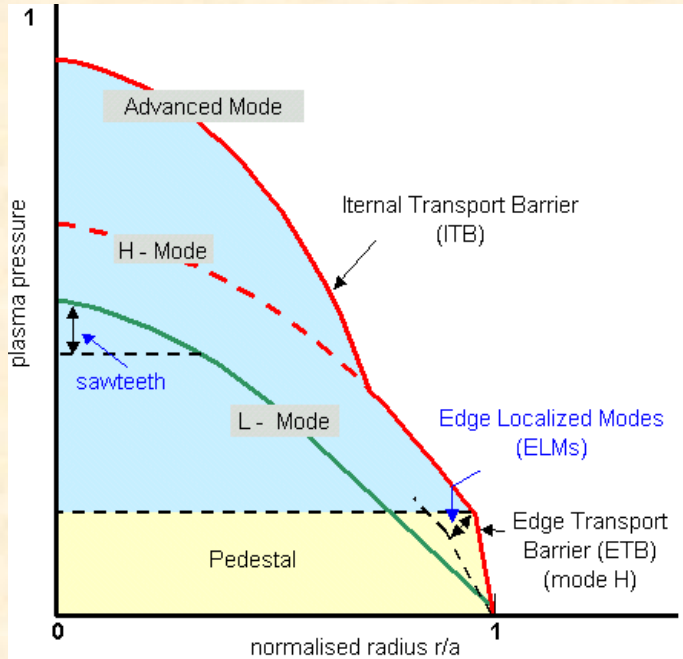
duży promień R	6.2	[m]
mniejszy prom. r	2.0	[m]
objętość plazmy	840	[m ³]
natężenie prądu	15.0	[MA]
pole toroidalne	5.3	[T]
moc fuzji	500	[MW]
czas zapłonu	>400	[s]
współczynnik Q	>10	

ITER - parametry

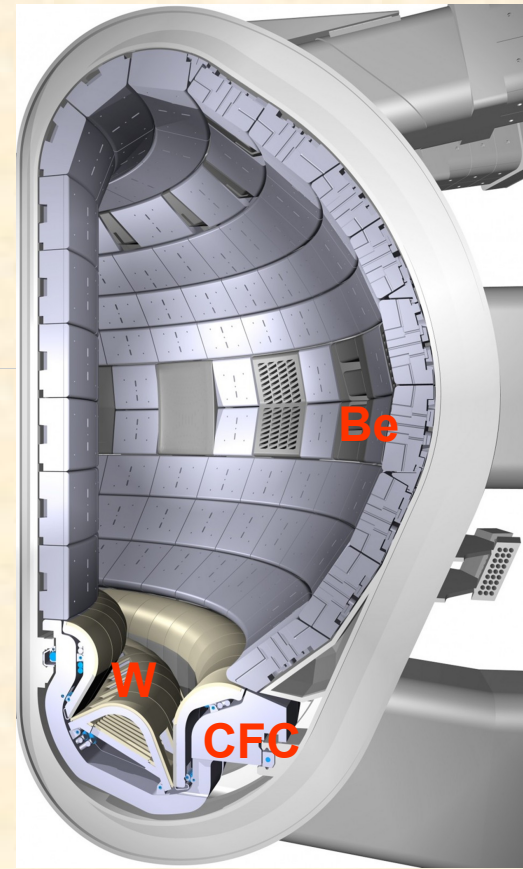


ITER – parametry i zadania

praca w tzw. H - high confinement mode

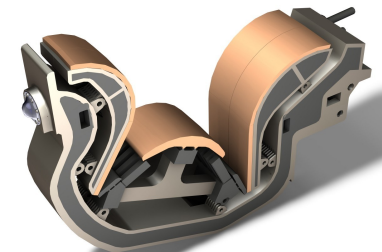


masa całkowita 23000 ton
w skład konstrukcji wchodzi:
440 Blanket modules
54 Divertor cassettes
18 cewek nadprzewodzących,
każda o masie 360 ton



Cele:

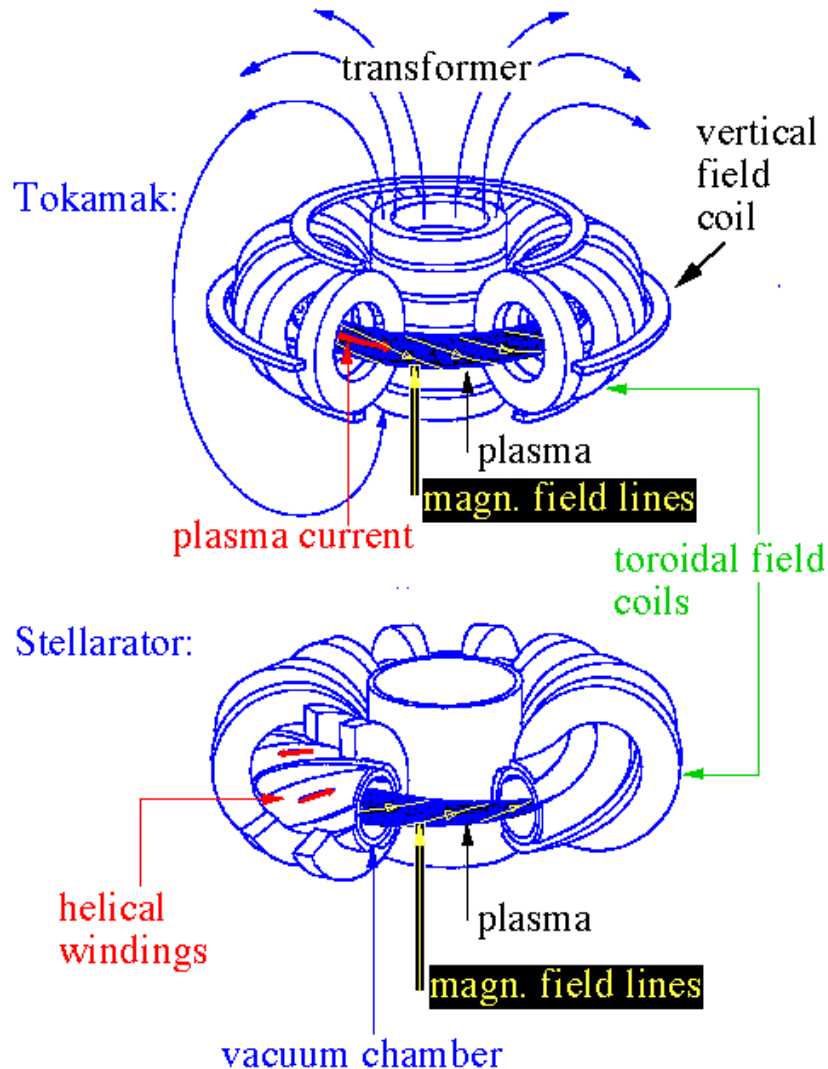
- osiągnięcie tzw. „steady - state plasma” $Q \sim 5$, $Q(\text{max.}) \sim 10$
- utrzymanie tych warunków przez około 500[s]
- rozwój technologii niezbędnych do budowy i użytkowania przyszłej elektrowni termojądrowej (magnesy nadprzewodzące, zdalna kontrola i obsługa reaktora)
- rozwiązanie problemów wynikających z obecności Trytu
- rozpoznanie problemów związanych z dużą wartością strumienia neutronów



Czym będzie DEMO ?

ts_1.mdp, J. V. Hofmann, 28-Oct-96

Tokamak + Stellarator



1. Duży bootstrap current, prąd indukcyjny tylko w fazie zapłonu lub do modyfikacji profilu gęstości prądu
2. Paliwo D,T lub D, He3

