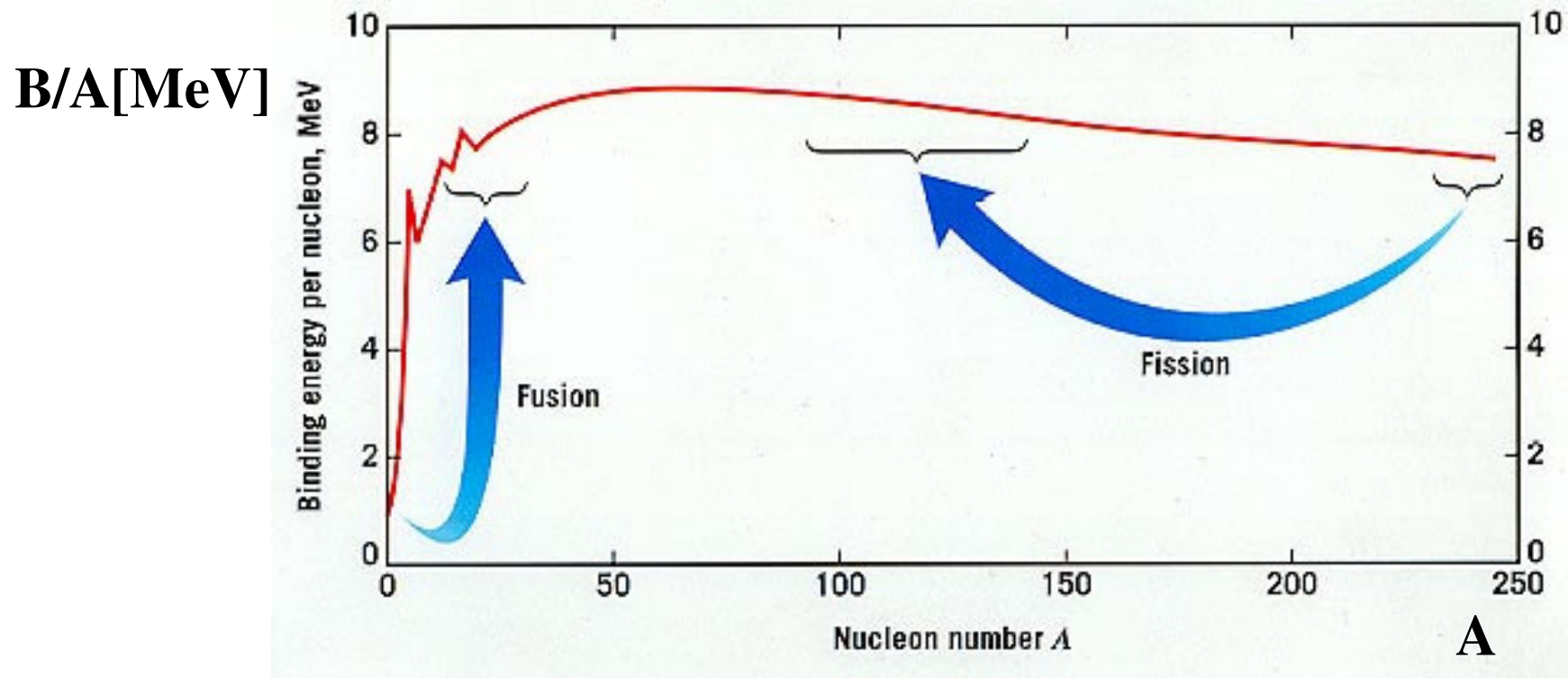


# Reakcje syntezy lekkich jąder

1. Synteza jąder lekkich w gwiazdach
2. Warunki wystąpienia procesu syntezy
3. Charakterystyka procesu syntezy
4. Kontrolowana reakcja syntezy termojądrowej
5. Zasada konstrukcji reaktora termojądrowego
6. Broń termojądrowa
7. Zalety energetyki termojądrowej

# Synteza jąder lekkich

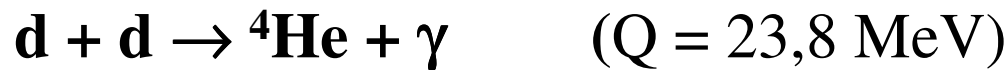
## 1. Oddziaływanie jądrowe



## 2. Oddziaływanie kulombowskie

# Synteza jąder lekkich w gwiazdach

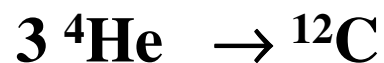
Najprostsze reakcje syntezy:



Proces pp w gwiazdach:

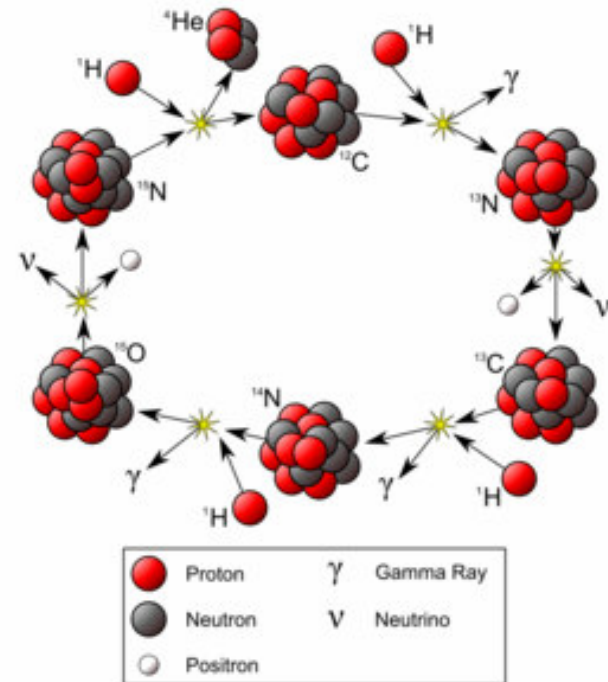
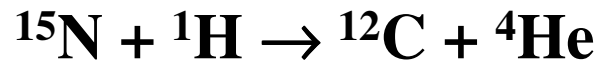
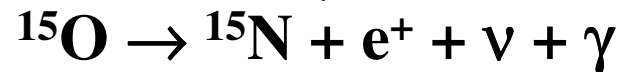
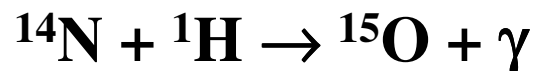
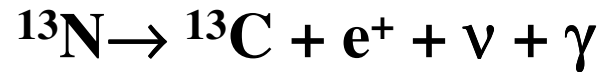
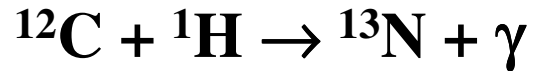


$$Q (4 {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}) = [4 M ({}^1\text{H}) - M({}^4\text{He})]c^2 = 26,7 \text{ MeV}$$



# Synteza jąder lekkich w gwiazdach

Cykl węglowo-azotowy (CNO):



Cykl CNO daje tyle samo energii co proces pp

CNO jest dominującym procesem w większych gwiazdach

# Reakcje syntezy w Słońcu

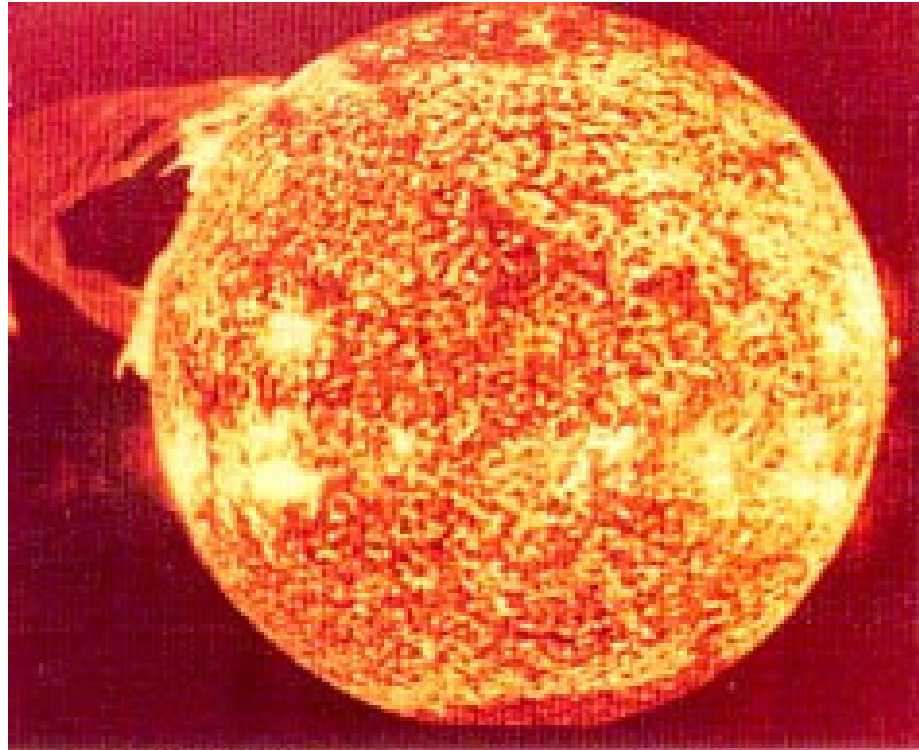
**Energia głównie  
z procesu pp**

**Reakcja syntezy zachodzi  
raz na  $10^{29}$  s**

**Słońce zawiera  $10^{59}$  jąder**

**Deuter jest wytwarzany  
z szybkością  $10^{12}$  kg/s**

**Dwa jądra  $^3\text{He}$   
spotykają się raz  
na  $10^5$  lat**

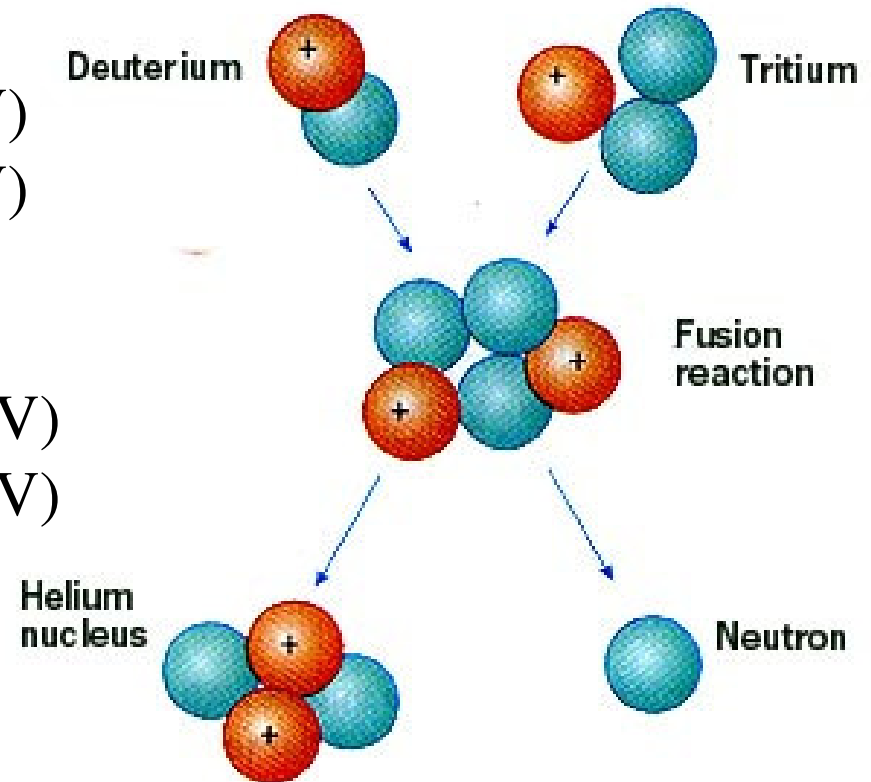


# Reakcje syntezy termojądrowej możliwe do realizacji w warunkach ziemskich

## Reakcja D-D:



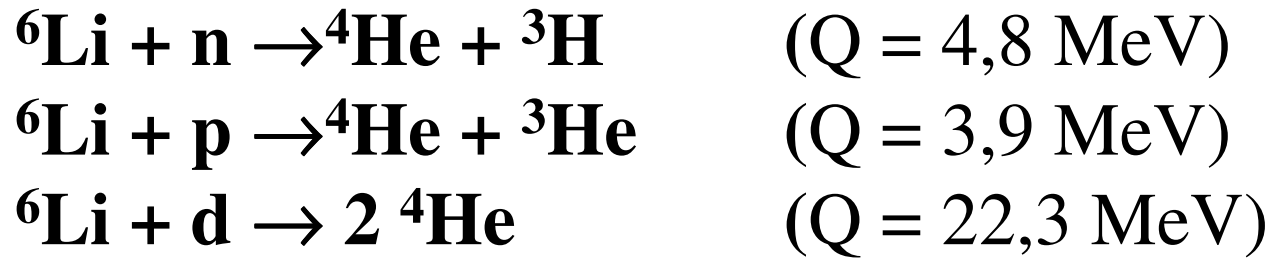
## Reakcja D-T:



deuter występuje w  $\text{H}_2\text{O}$  w stężeniu 1 atom na 6700 atomów wodoru

1 litr  $\text{H}_2\text{O}$  - 0,3 g deuteru

# Reakcje syntezy termojądrowej możliwe do realizacji w warunkach ziemskich

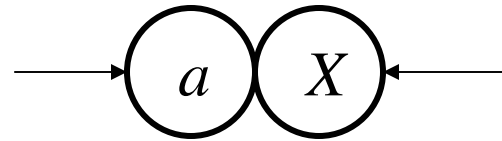


# Warunki wystąpienia procesu syntezy

## 1. Pokonanie bariery kulombowskiej

$$V_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_a Z_X}{R_a + R_X}$$

dla D-D i D-T



$$V_c \approx 0,4 \text{ MeV}$$

## 2. Energia początkowa cząstek (temperatura)

$E = kT$  - energia termiczna (k- stała Boltzmannna)

we wnętrzu Słońca  $T \approx 1,5 \cdot 10^7 \text{ K}$  - atomy w stanie plazmy

$kT = 1,3 \text{ keV}$  (energia średnia)

energia termiczna  $E = 0,4 \text{ MeV}$  odpowiada  $T = 3 \cdot 10^9 \text{ K}$

## 3. Tunelowanie przez barierę kulombowską

## 4. Odpowiednio duża koncentracja cząstek i długi czas



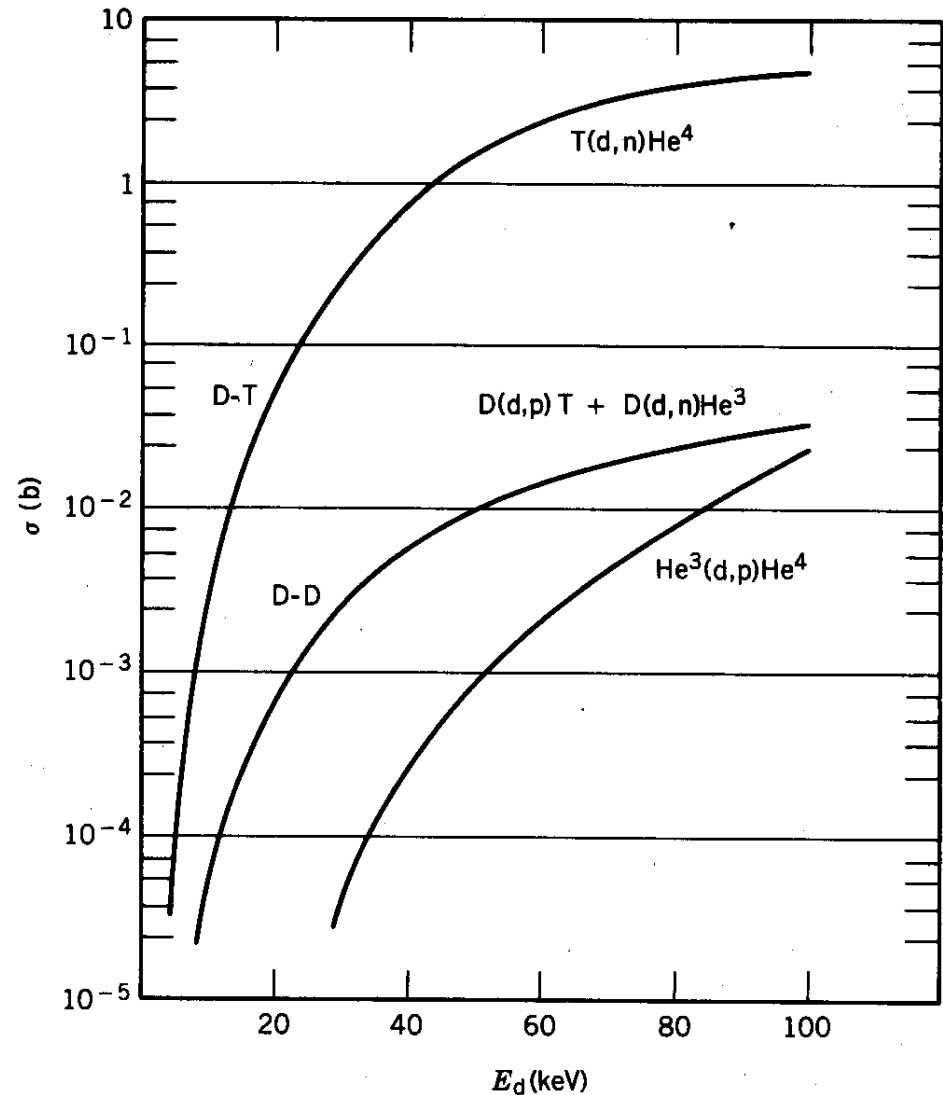
# Przekrój czynny na reakcje syntezy

Tunelowanie:

$$\sigma = \frac{1}{v^2} e^{-2G}$$

v- względna prędkość  
cząstek

$$G = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\pi Z_a Z_X}{\hbar v}$$



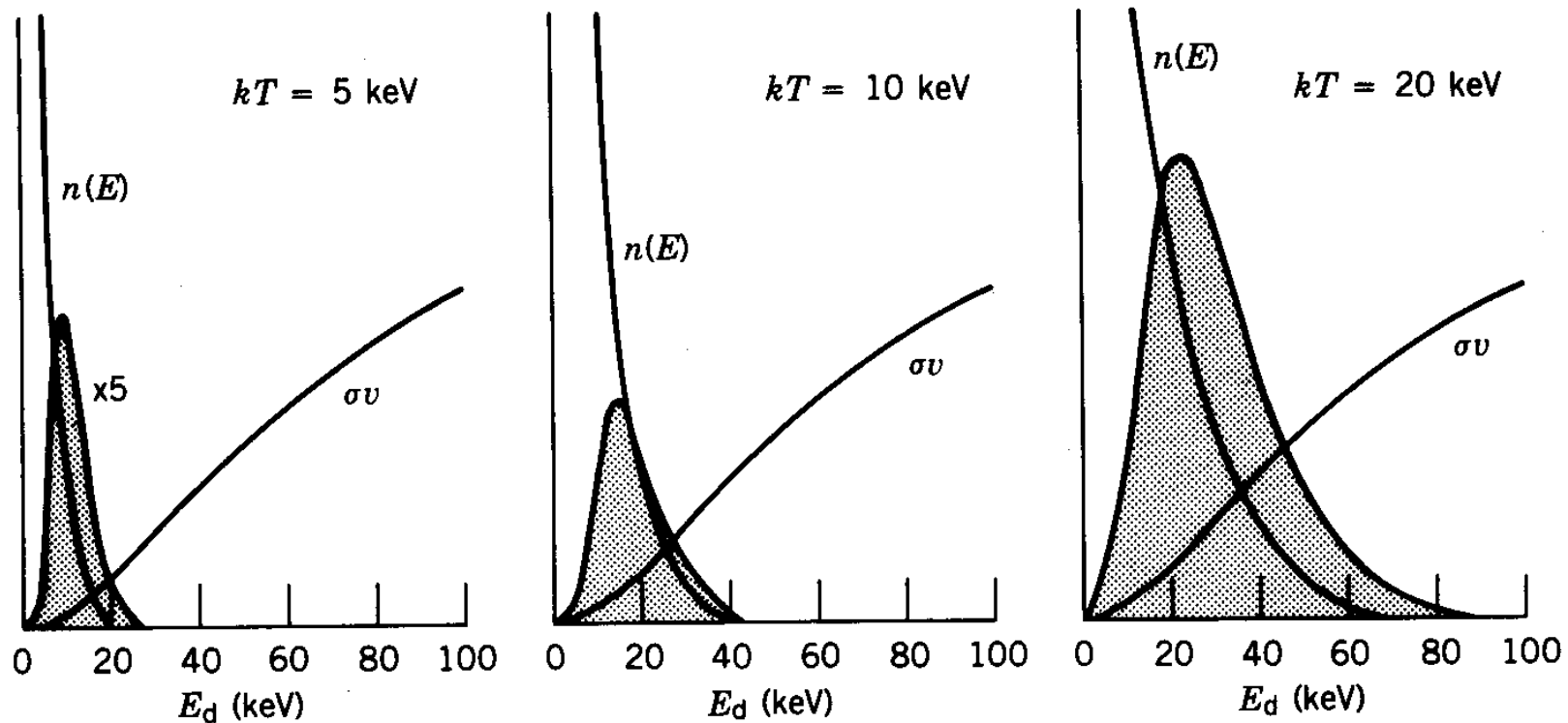
**Figure 14.1** Cross sections for fusion reactions.

# Wydajność reakcji syntezy termojądrowej

Rozkład prędkości cząstek - rozkład Maxwella-Boltzmanna  $n(v)$

Wydajność reakcji  $r_{12}$  - liczba reakcji zachodzących w jednostce czasu i w jednostce objętości zawierającej liczbę cząstek

oddziaływujących  $n_1$  i  $n_2$ :  $r_{12} = n_1(v) n_2(v) \langle \sigma v \rangle / (1 + \delta_{12})$



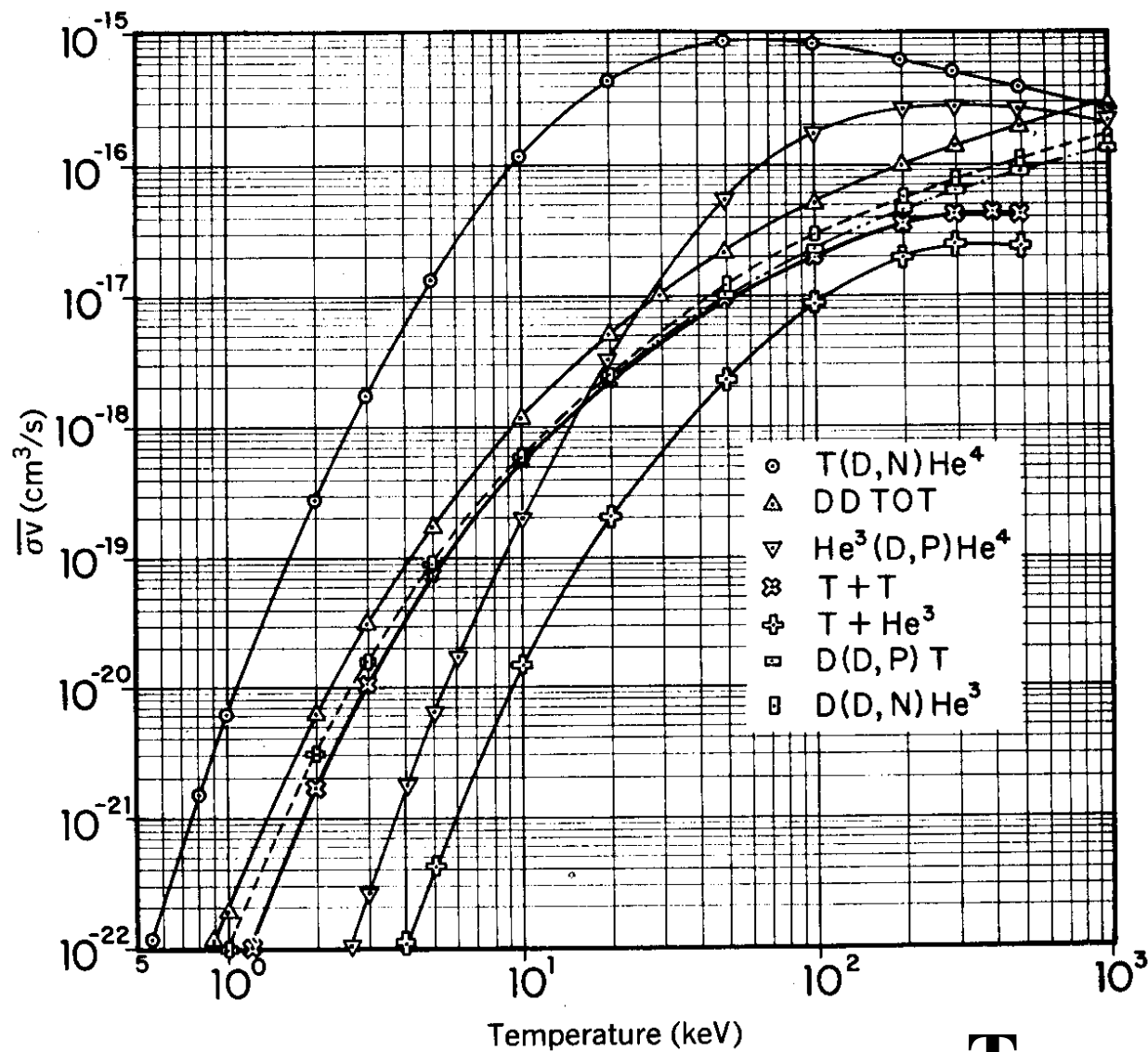
$r_{12}$  określa moc wydzielaną w reakcji termojądrowej

$$\langle \sigma v \rangle$$

dla  $E_d = 1-10$  keV

$T = 10^7 - 10^8$  K

reakcja D-T ma  
największy  $\langle \sigma v \rangle$   
pośród innych  
reakcji



**T**

# Bilans energetyczny

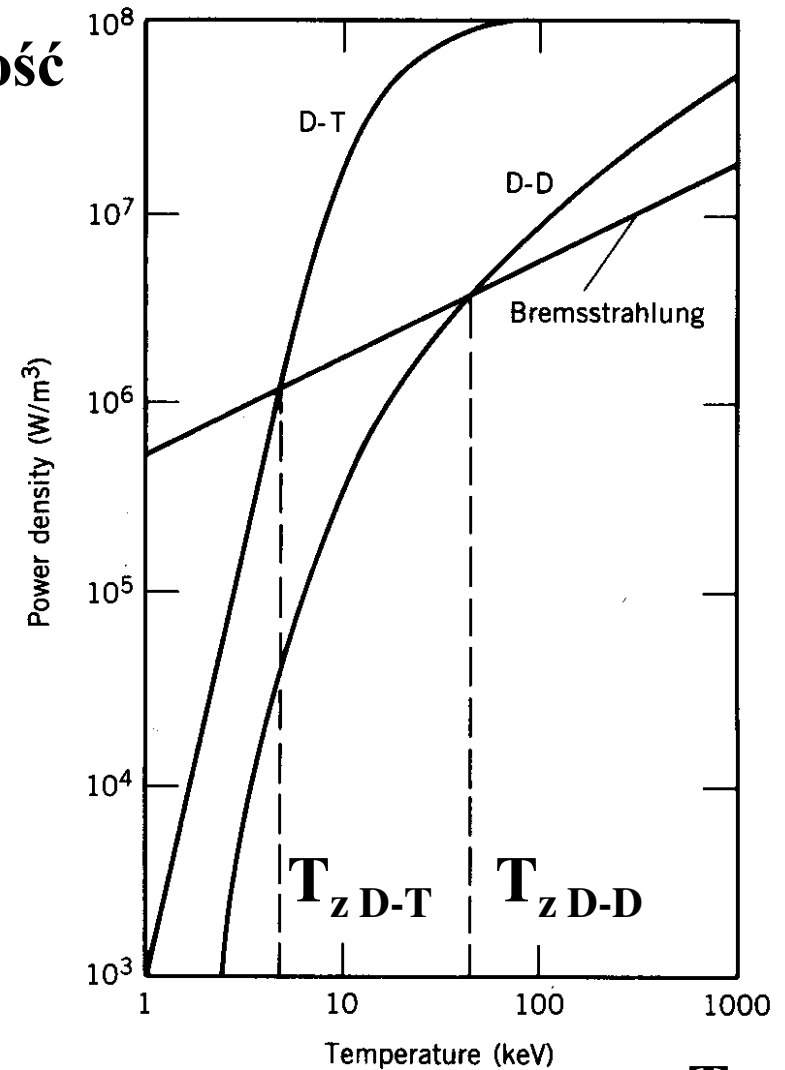
Gęstość  
mocy

1. Energia wydzielana w reakcji
2. Energia tracona na emisję promieniowania
3. Inne straty energii (dyfuzja cząstek, konwekcja, przewodnictwo cieplne,....)

**Temperatura zapłonu**

dla D-D  $T_z = 350 \cdot 10^6 \text{ K}$

dla D-T  $T_z = 45 \cdot 10^6 \text{ K}$



**T**

# Kontrolowana reakcja termojądrowa

1. ogrzanie paliwa do temperatury zapłonu
2. wytworzenie odpowiedniej gęstości plazmy
3. utrzymywanie gorącej plazmy przez dostatecznie długi czas

**Kryterium Lawsona**

$$n \tau = 10^{16} \text{ cz s/cm}^3 \text{ D-D}$$

$$3 \cdot 10^{14} \text{ cz s/cm}^3 \text{ D-T}$$

$\tau$  - czas utrzymywania plazmy

# **Reakcja syntezy w gwiazdach**

- 1. Utrzymywanie plazmy poprzez zgromadzenie odpowiednio dużej masy - kompresja grawitacyjna**
- 2. Samoregulacja wydajności reakcji**
  - a) wydzielanie ciepła w reakcjach syntezy - ekspansja gwiazdy**
  - b) spadek koncentracji cząstek - spadek wydajności reakcji**

# **Zasada konstrukcji reaktora termojądrowego z magnetycznym utrzymywaniem plazmy**

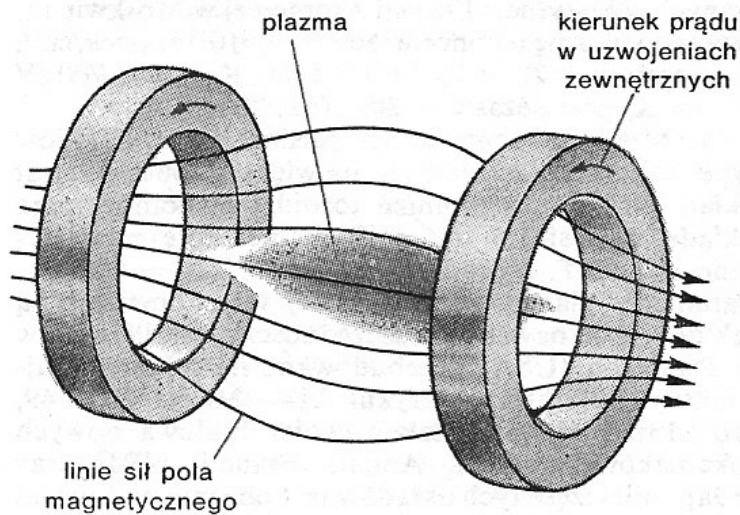
**1. Wytworzenie gorącej plazmy w silnym wyładowaniu elektrycznym**

**a) ściskanie przez azymutalne pole magnetyczne wokół osi z - „Z pinch” (samo-ściskanie wokół osi z)**

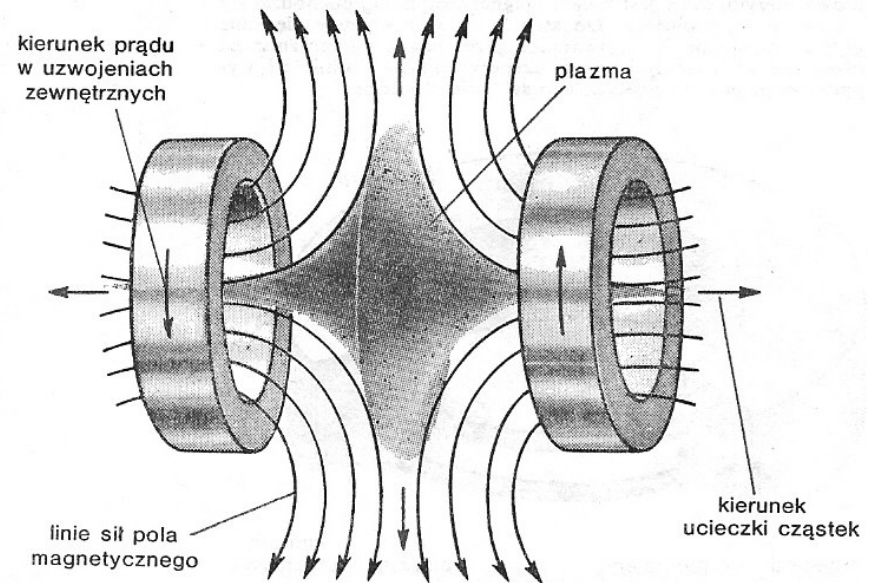
# Zasada konstrukcji reaktora termojądrowego z magnetycznym utrzymywaniem plazmy

## 2. Magnetyczne utrzymywanie gorącej plazmy

### a) pułapki otwarte - zwierciadło magnetyczne



koncentracja  $10^8 - 10^{10}$  cz /cm<sup>3</sup>  
w czasie 0,3 -30 ms



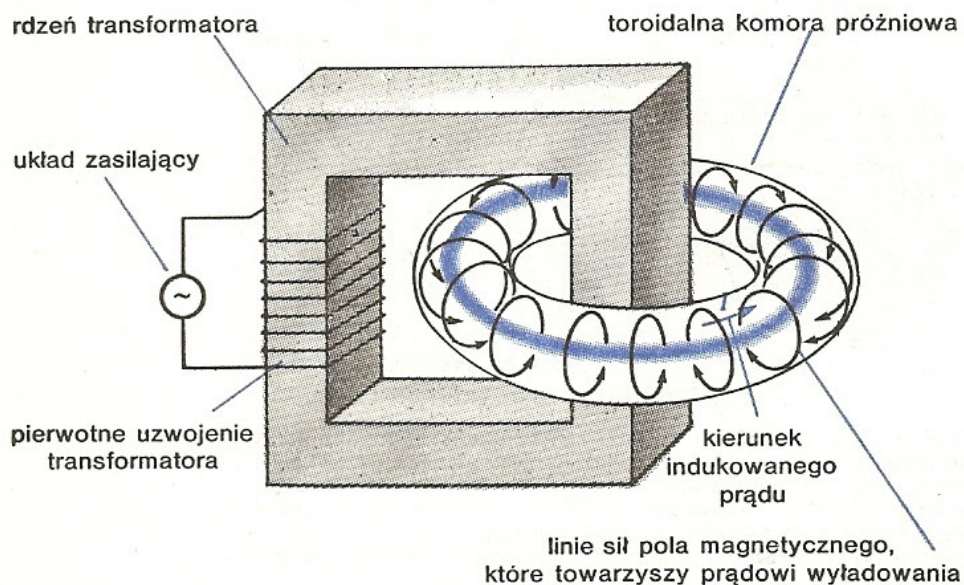
koncentracja  $10^{13} - 10^{14}$  cz /cm<sup>3</sup>  
w czasie kilkudziesięciu  $\mu$ s



# Zasada konstrukcji reaktora termojądrowego z magnetycznym utrzymywaniem plazmy

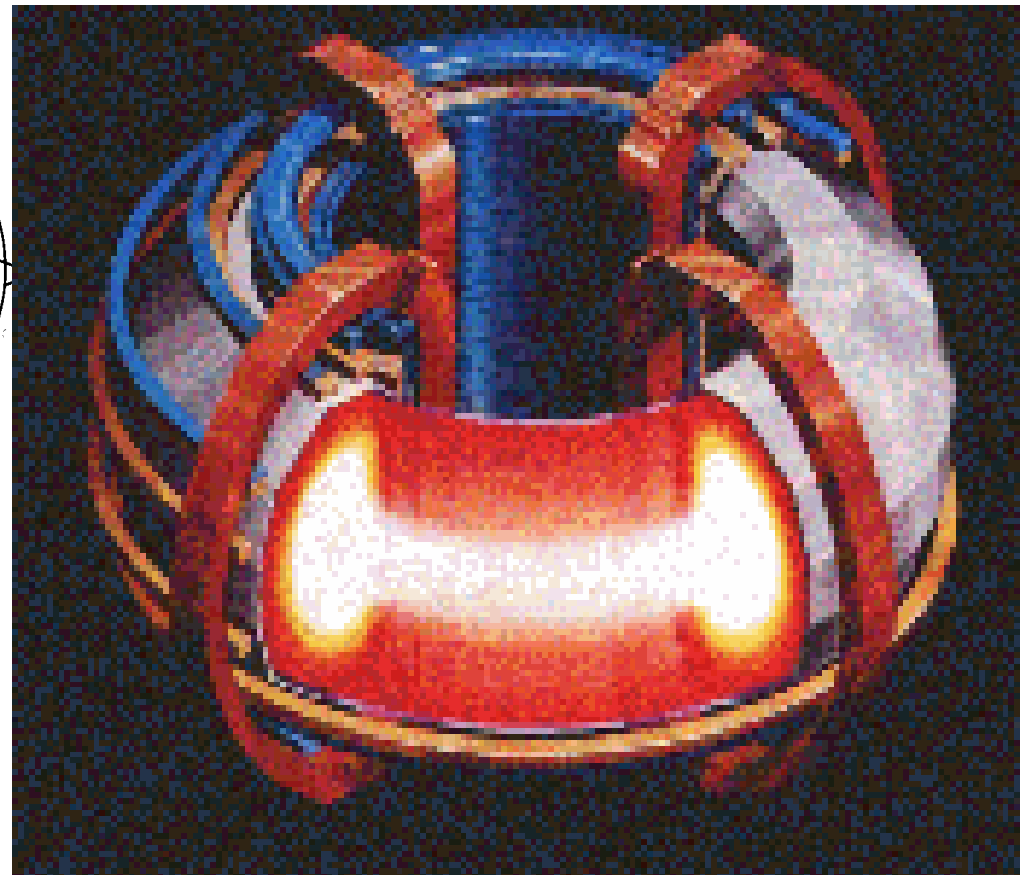
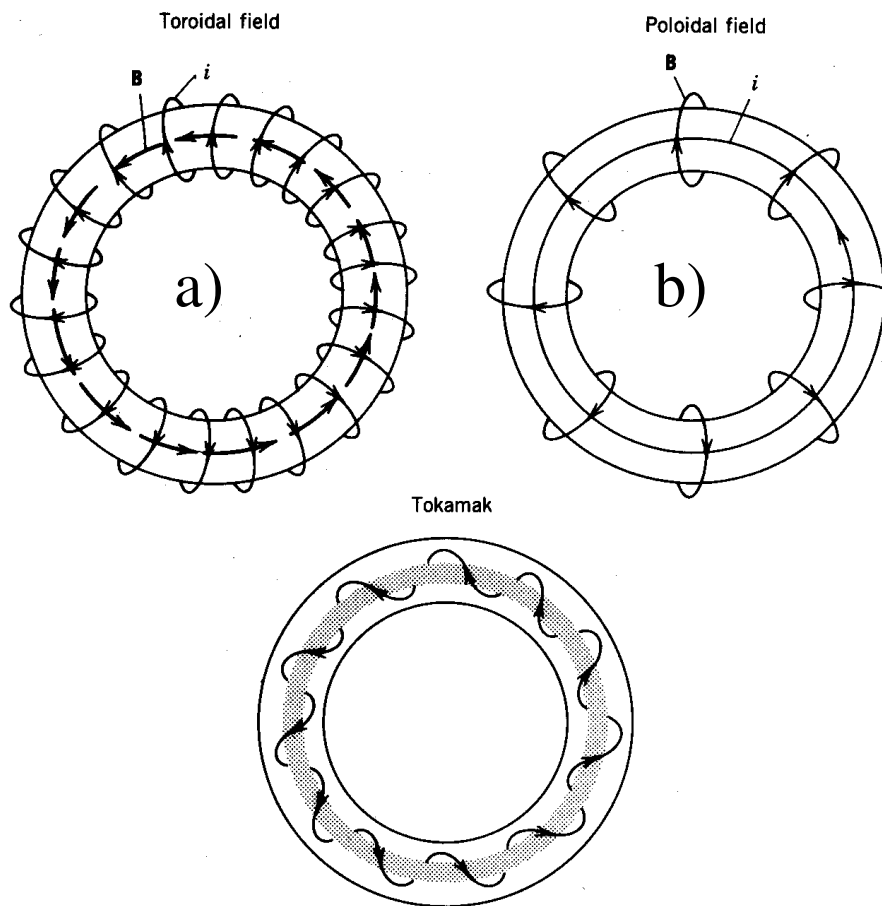
## b) pęłapki zamknięte - Tokamak

toroidalna komora jako wtórne uzwojenie wielkiego transformatora; pola stabilizujące



# Tokamak (ros. toroidalnaja kamiera s magnitnoj katuszkoj)

- a) pole toroidalne - utrzymuje ciśnienie wewnątrz plazmy
- b) centralny transformator indukuje prąd płynący w plazmie - ogrzewa plazmę do  $T \text{ ok. } 1 \text{ keV}$
- c) pole pionowe - utrzymuje sznur plazmowy w stabilnym centralnym położeniu



# **Zasada konstrukcji reaktora termojądrowego z magnetycznym utrzymywaniem plazmy**

## **3. Grzanie plazmy (zapłon)**

- a) grzanie omowe (temperatury do  $T = 10^7$  K, kilka keV)**
- b) wzbudzenie rezonansu cyklotronowego elektronów lub jonów przez fale elektromagnetyczne**
- c) wstrzyknięcie wysokoenergetycznych jonów**

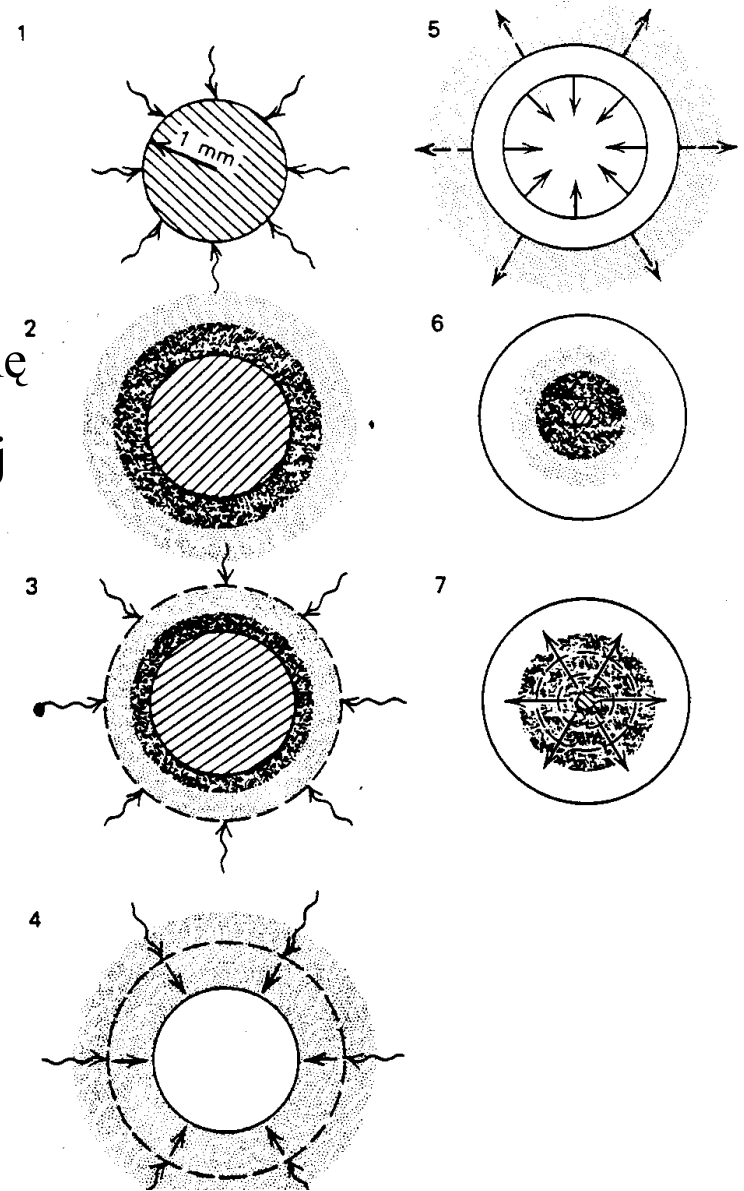
# Zasada konstrukcji reaktora termojądrowego z inercyjnym utrzymywaniem plazmy

Mikrotarcza zawierająca d i t jest bombardowana ze wszystkich stron silną impulsową wiązką laserową ( $2 \cdot 10^{14}$  W w impulsie) co powoduje jej ogrzewanie i ściskanie. Cząstki dzięki swej inercji (bezwładności związanej z masą) nie uciekają z mikrotarczy przez czas jej naświetlania.

Celem jest osiągnięcie wysokich T i n w krótkim czasie, zanim mikrotarcza eksploduje

# Zasada konstrukcji reaktora termojądrowego z inercyjnym utrzymaniem plazmy

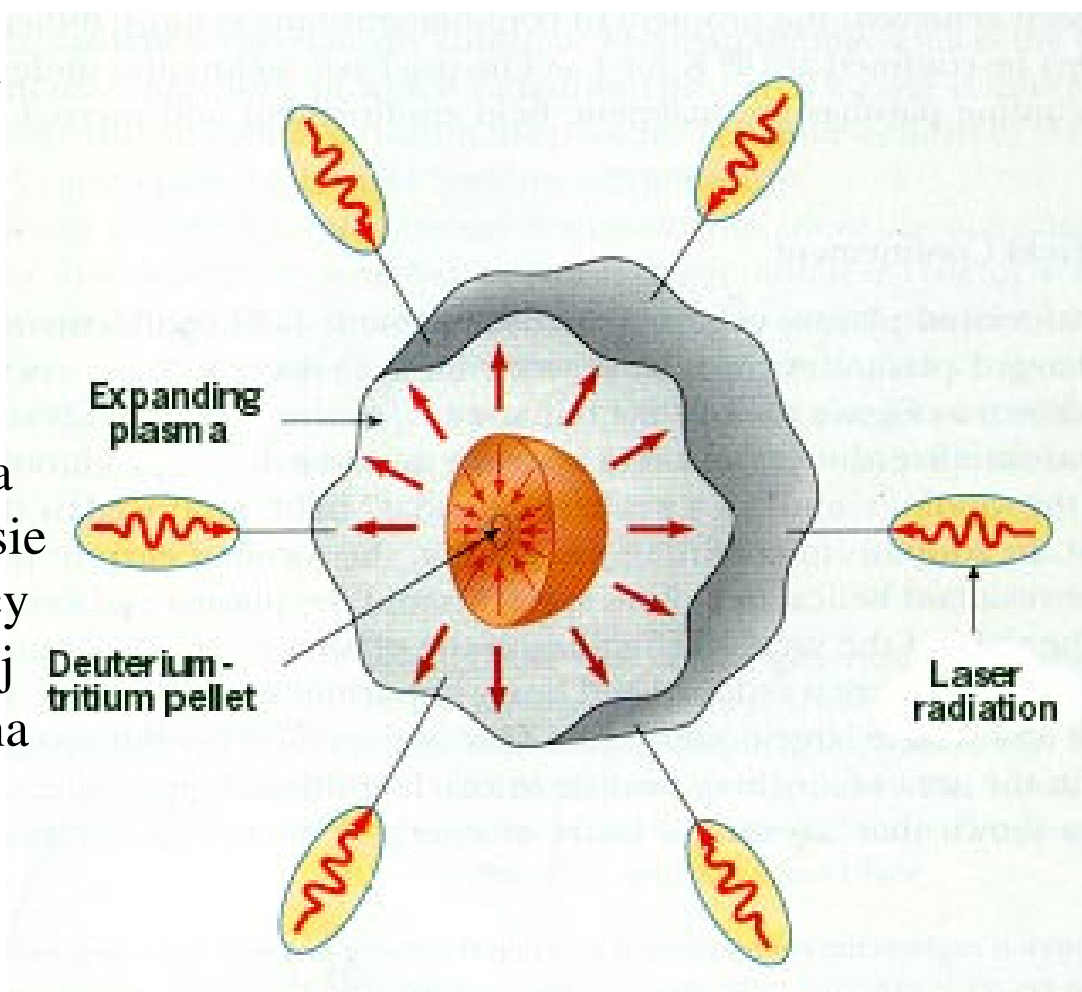
1. naświetlenie mikrotarczy wiązkami laserowymi
2. utworzenie plazmy z otoczki tarczy
3. dodatkowa absorpcja promieniowania przez plazmę
4. odparowanie otoczki i powstanie fali uderzeniowej
5. kompresja i ogrzanie rdzenia mikrotarczy
6. osiągnięcie zapłonu
7. wybuch termojądrowy



# Wybuch termojądrowy w mikrotarczy

W reaktorze termojądrowym z inercyjnym utrzymywaniem plazmy mikrotarcze z paliwem mają eksplodować jak miniaturowe bomby wodorowe z szybkością  $10^{10}$  /s.

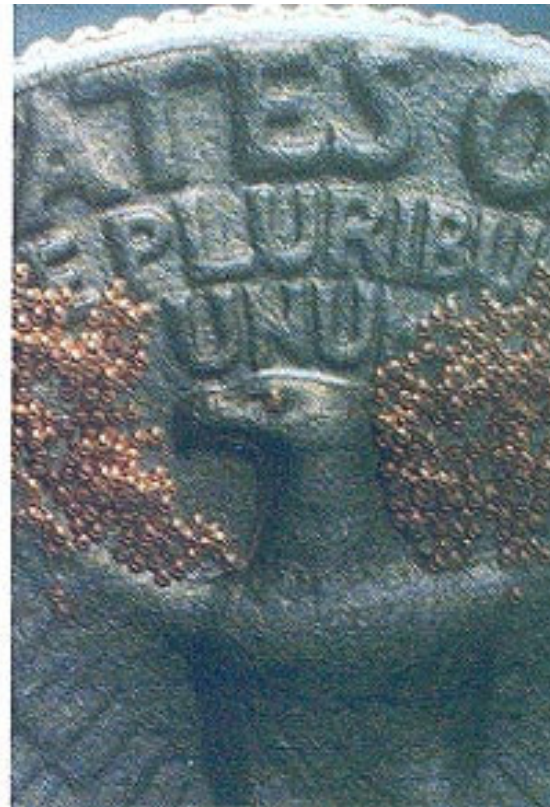
W wyniku naświetlania laserem każda tarcza uzyskuje 200 kJ energii w czasie krótszym niż 1 ns. Odpowiada to mocy w impulsie  $2 \cdot 10^{14}$  W - 100 razy więcej niż stała moc wszystkich elektrowni na kuli ziemskiej.



# Laboratorium Laserowe NOVA w Livermore

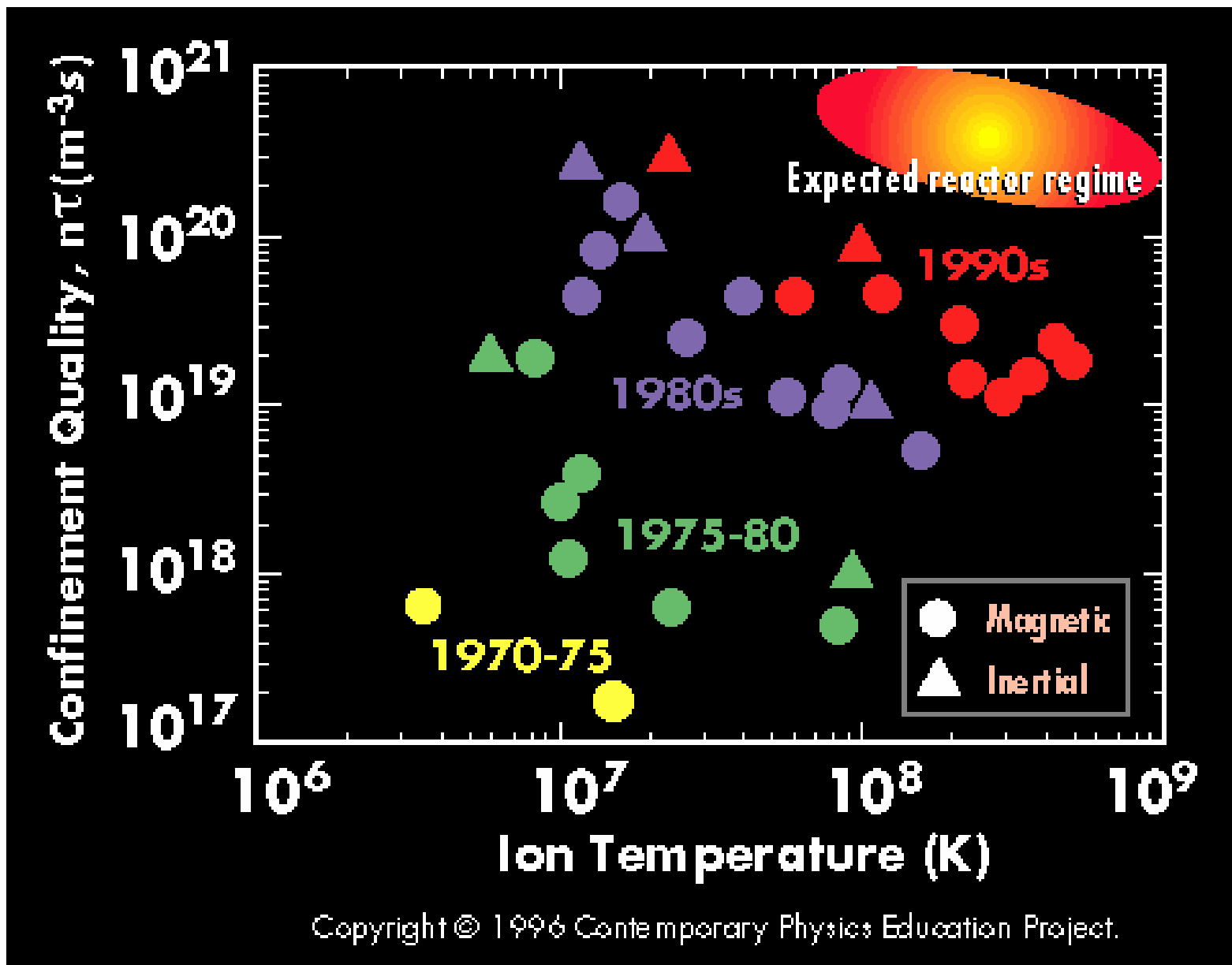


Naświetlanie mikrotarczy wiązka laserową



Mikrotarcze na tle monety 25 centowej

# Osiągnięcia w utrzymywaniu gorącej plazmy





# Elektrownia termojądrowa

Reakcja D-T w rdzeniu reaktora:

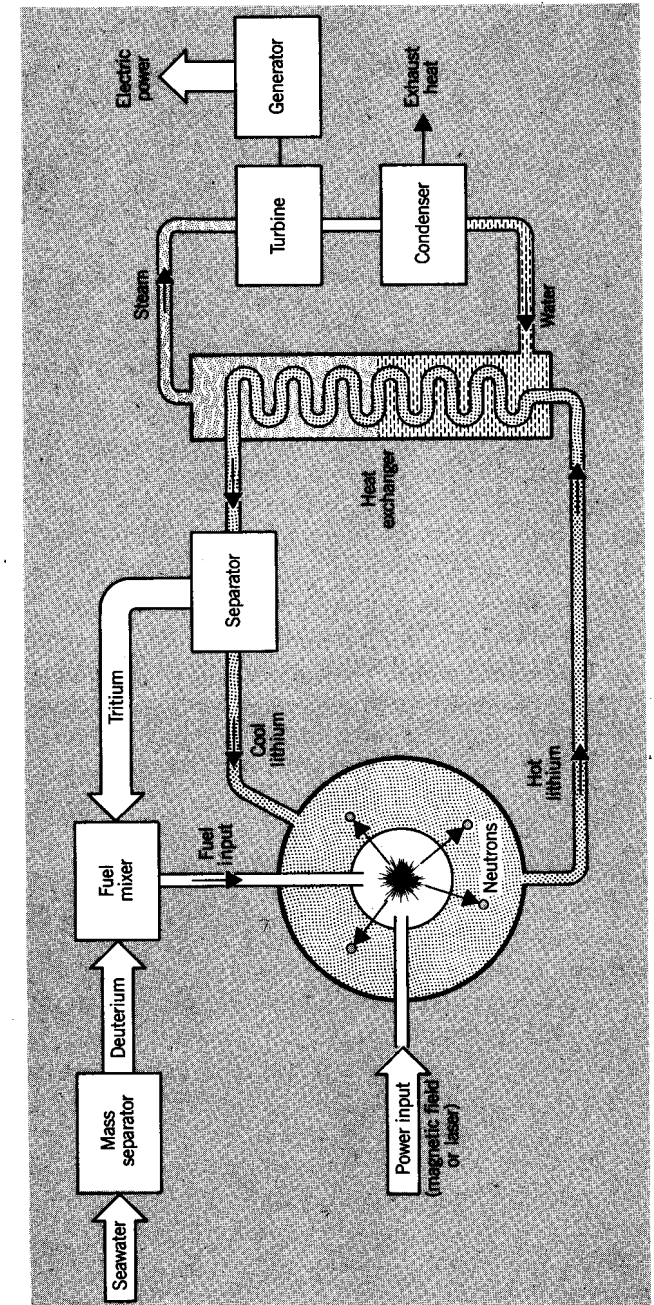


neutron oddziałuje z płaszczem  
z ciekłego litu:



${}^4\text{He}$  i  $t$  oddają energię ogrzewając  
płaszcz litowy

Ciekły lit ogrzewa wodę



# Broń termojądrowa

Wyzwalanie energii termojądrowej w sposób wybuchowy:



(zastąpienie gazowego paliwa z d i t przez stały  ${}^6\text{LiD}$ )

## 1. Broń wodorowa (dwufazowa)

a) rozszczepienie  ${}^{235}\text{U}$

b) synteza d i t

## 2. Broń wodorowo-uranowa (trójfazowa)

a) rozszczepienie  ${}^{235}\text{U}$

b) synteza d i t

c) rozszczepienie  ${}^{238}\text{U}$

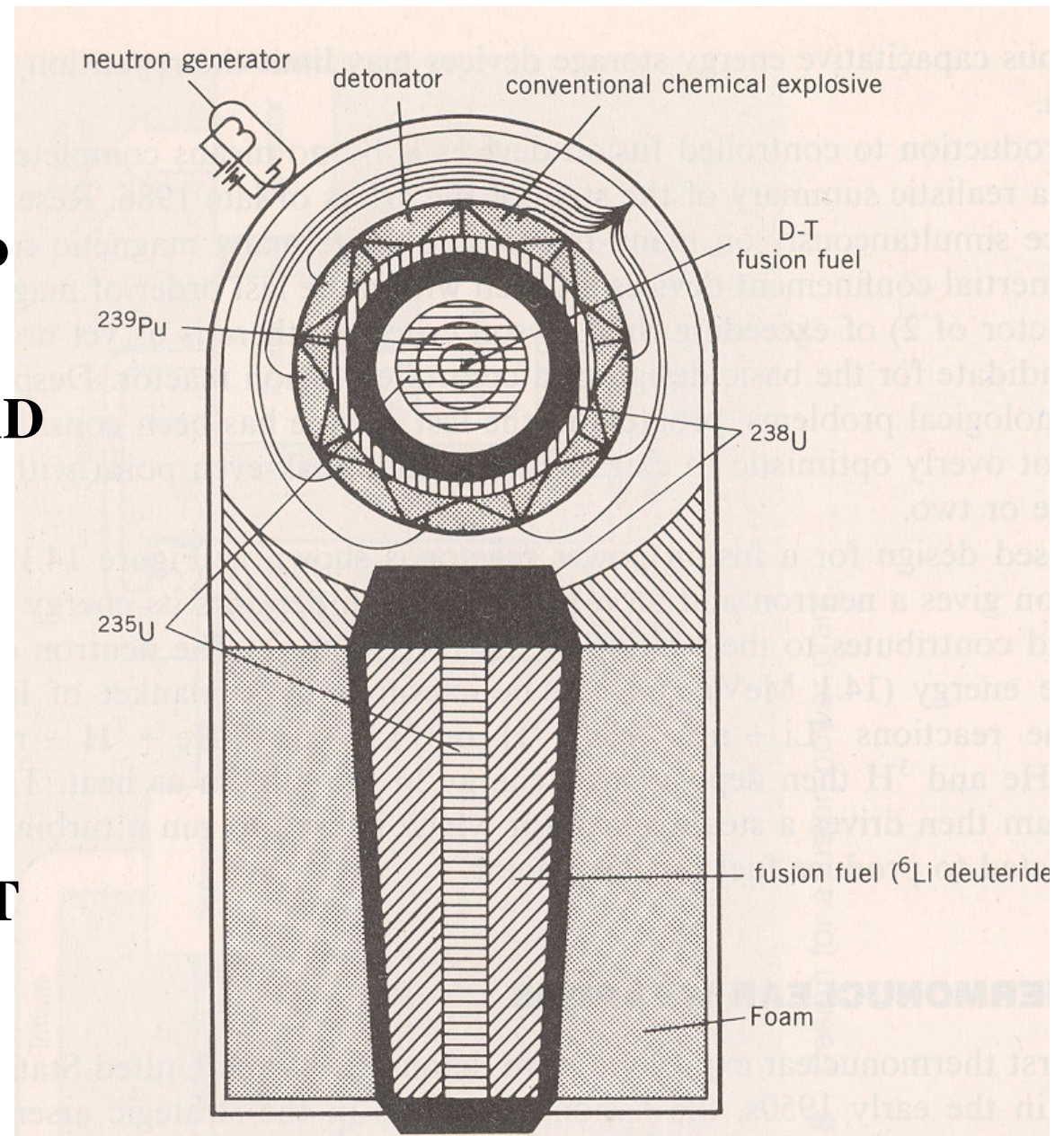
# Broń termojądrowa wodorowo-uranowa (3F)

1. rozszczepienie  $^{235}\text{U}$   
jako zapalnik wybuchu  
termojądrowego - źródło  
neutronów

2. Materiał aktywny:  $^6\text{LiD}$   
 $n + ^6\text{Li} \rightarrow ^4\text{He} + t$   
( $Q= 4,78 \text{ MeV}$ )

3. Tryt inicjuje reakcję  
syntezy D-T

4. neutrony z reakcji D-T  
wspomagają reakcję  
rozszczepienia  $^{238}\text{U}$



# Zalety energetyki termojądrowej

- 1. Lekkie jądra są łatwo dostępne**
- 2. Produkty reakcji syntezy są stabilne –  
nie ma odpadów radioaktywnych**