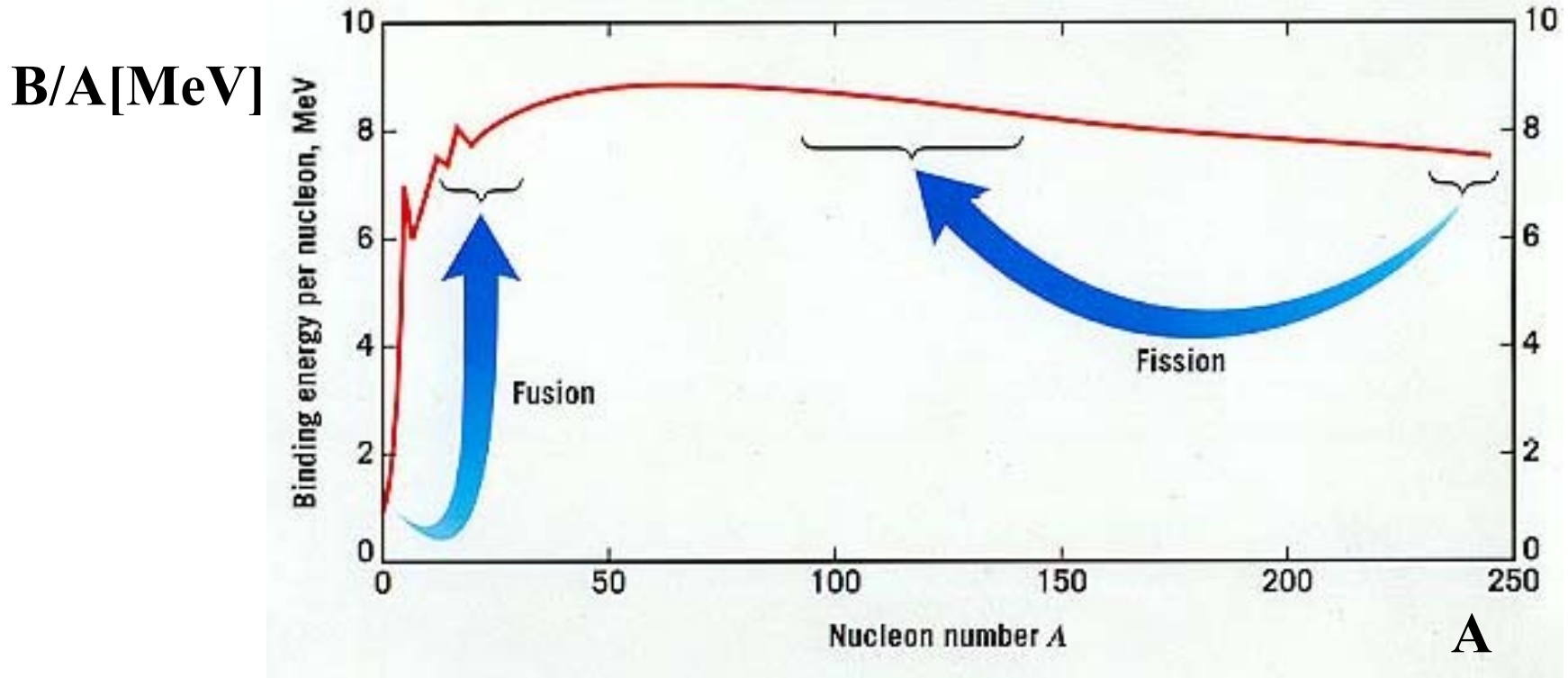


Reakcje syntezy lekkich jąder

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



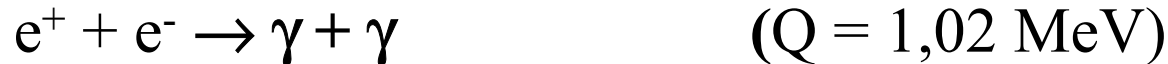
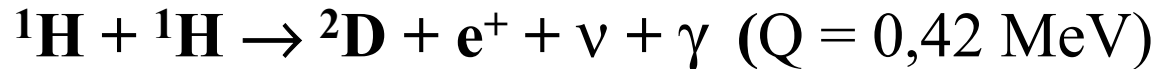
2. Oddziaływanie kulombowskie

Synteza jąder lekkich w gwiazdach

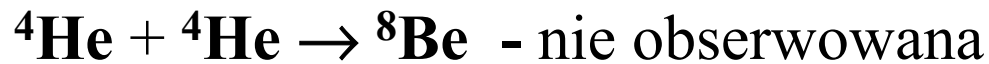
Najprostsze reakcje syntezy:



Proces pp w gwiazdach:

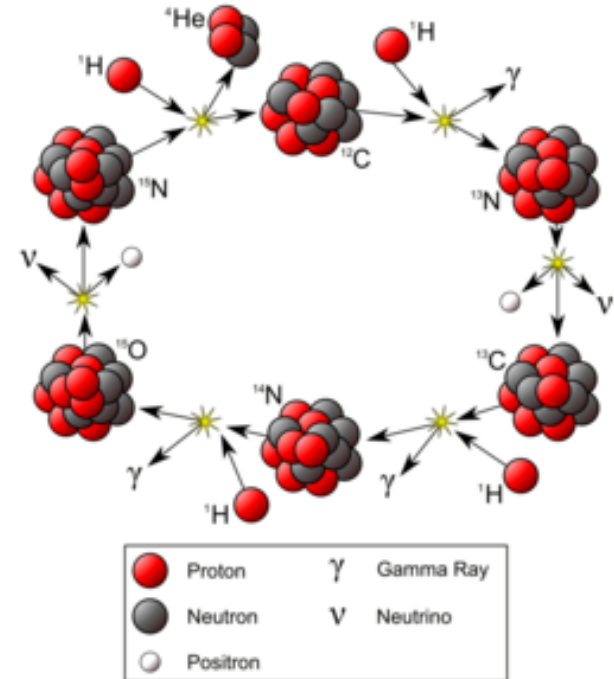
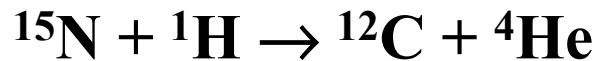
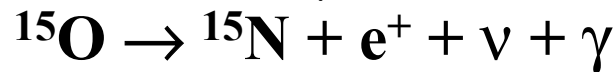
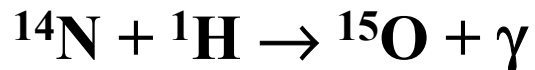
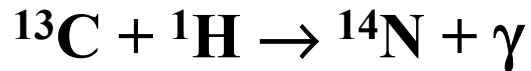
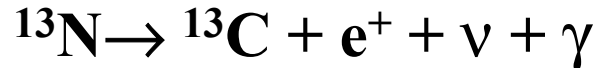
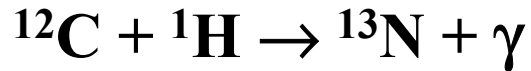


$$Q (4 {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}) = [4 M ({}^1\text{H}) - M({}^4\text{He})]c^2 = 26,7 \text{ MeV}$$



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

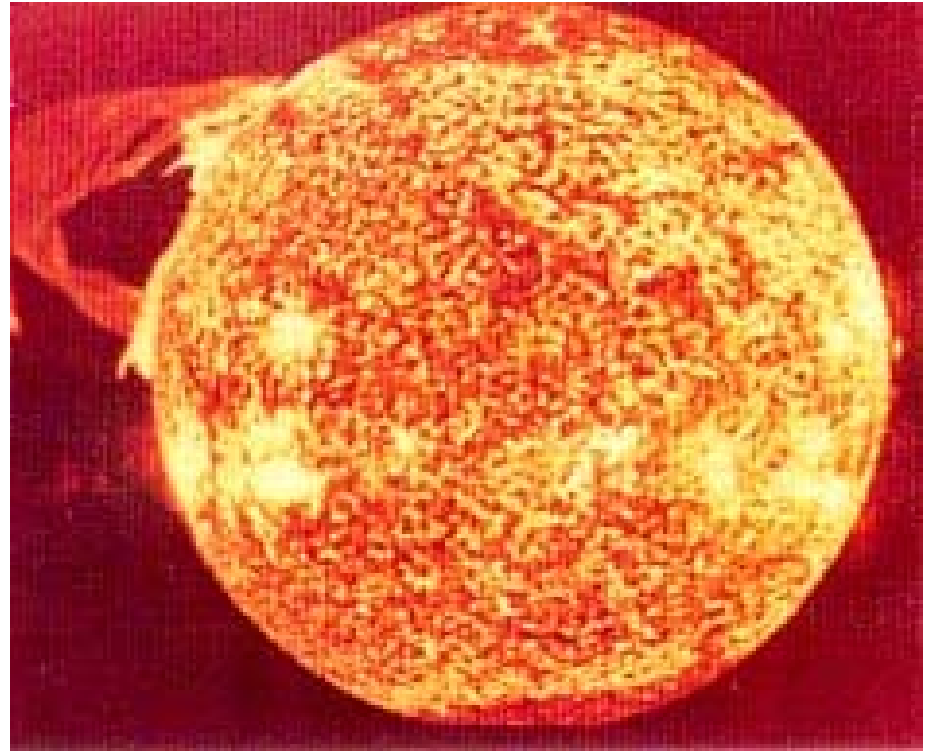
**Energia głównie
z procesu pp**

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

Słońce zawiera 10^{59} jąder

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

**Dwa jądra ^3He
spotykają się raz
na 10^5 lat**

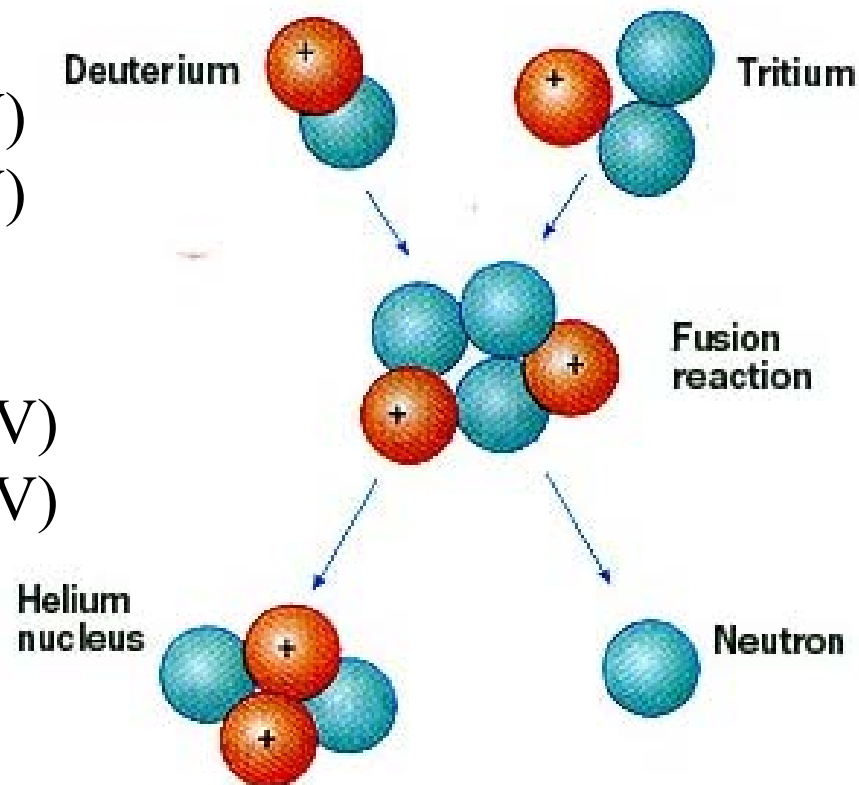


Reakcje syntezy termojądrowej możliwe do realizacji w warunkach ziemskich

Reakcja D-D:



Reakcja D-T:



deuter występuje w H_2O w stężeniu 1 atom na 6700 atomów wodoru

1 litr H_2O - 0,3 g deuteru

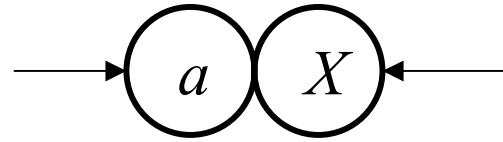
Reakcje syntezy termojądrowej możliwe do realizacji w warunkach ziemskich



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

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

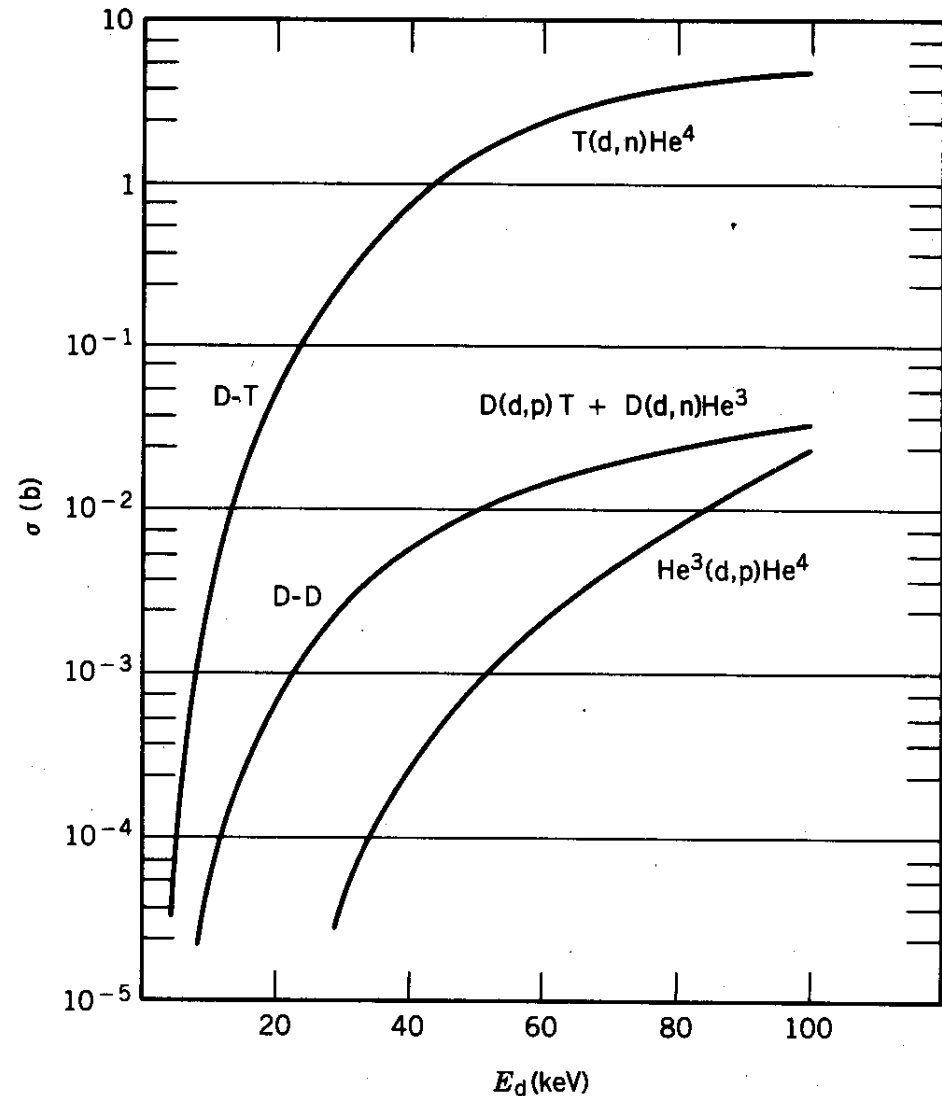


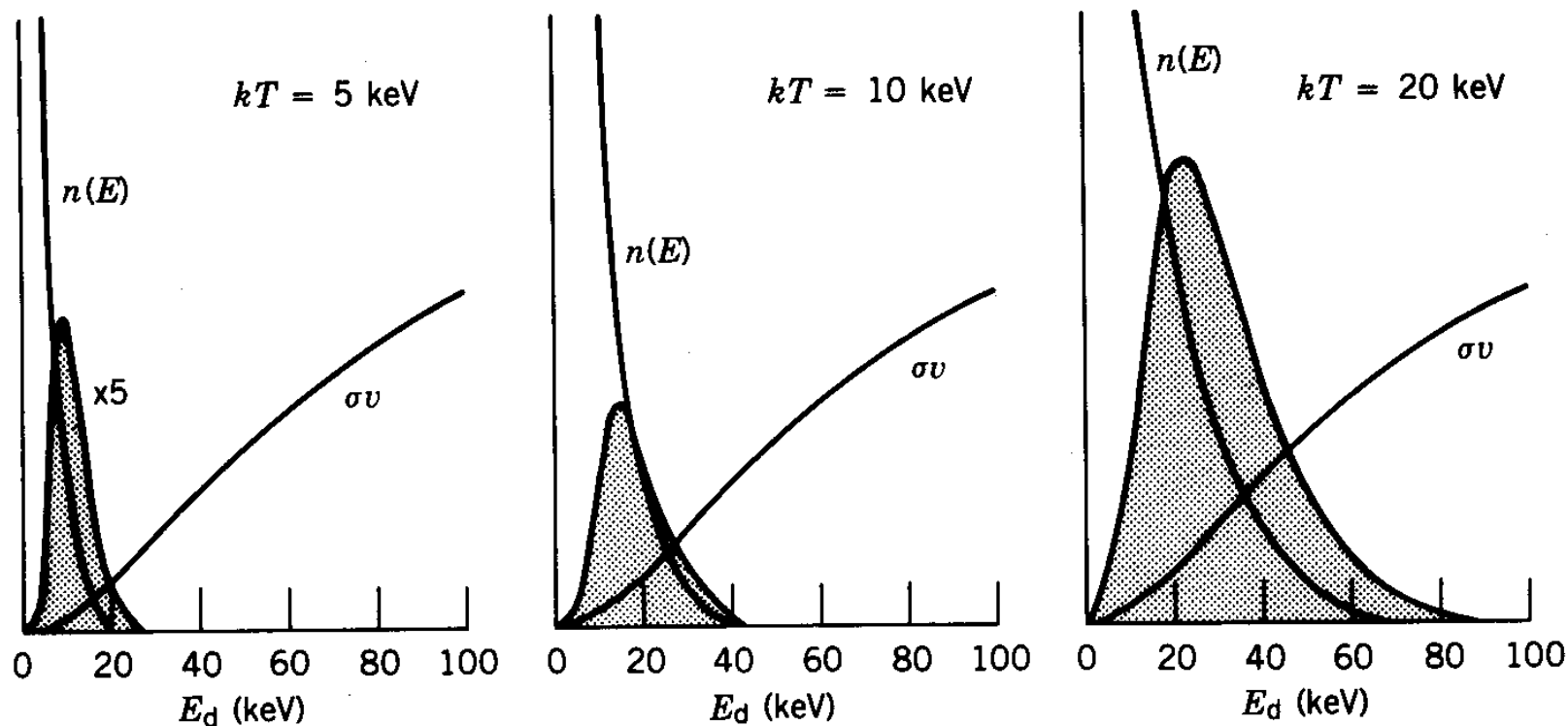
Figure 14.1 Cross sections for fusion reactions.

Wydajność reakcji syntezy termojądrowej

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

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

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



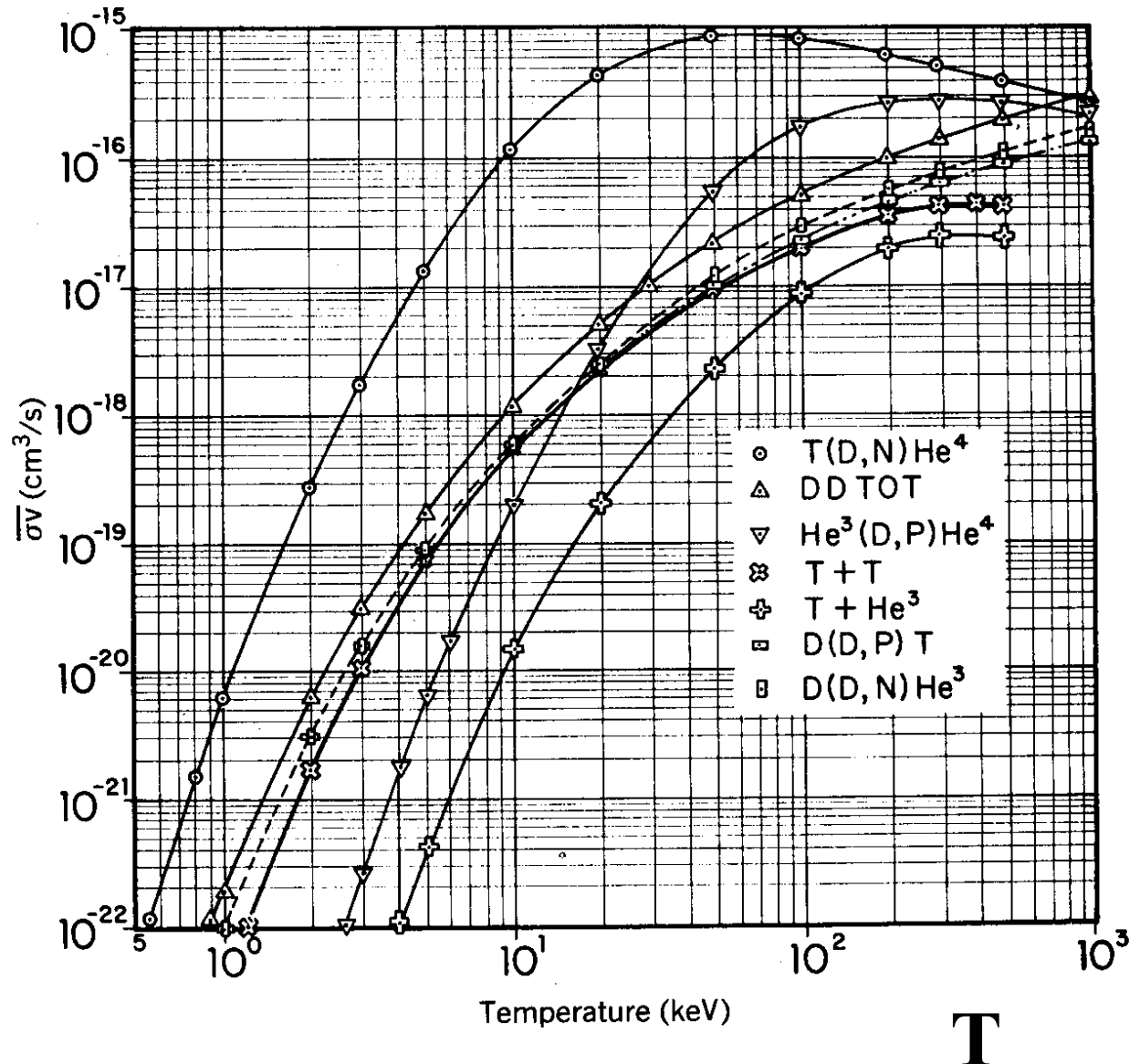
r_{12} określa moc wydzielaną w reakcji termojądrowej

$$\langle \sigma v \rangle$$

dla $E_d = 1-10$ keV

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

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



Bilans energetyczny

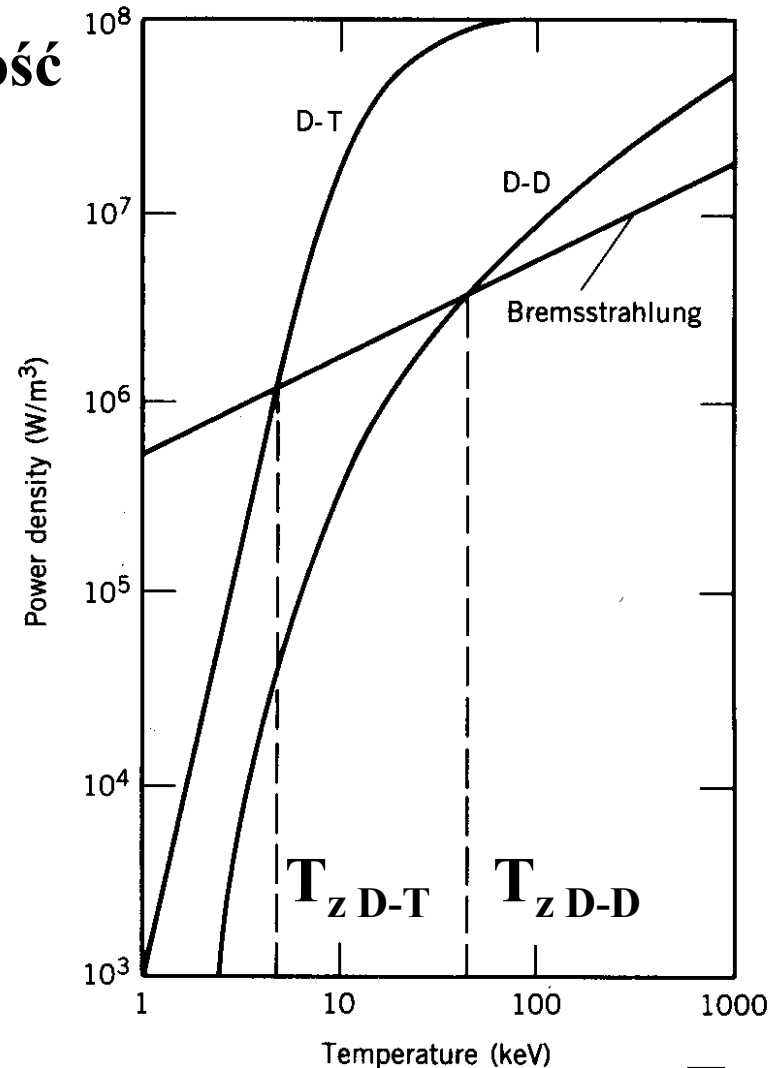
Gęstość
mocy

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

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

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

τ - 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)

2. Magnetyczne utrzymywanie gorącej plazmy

a) pułapki otwarte - zwierciadło magnetyczne

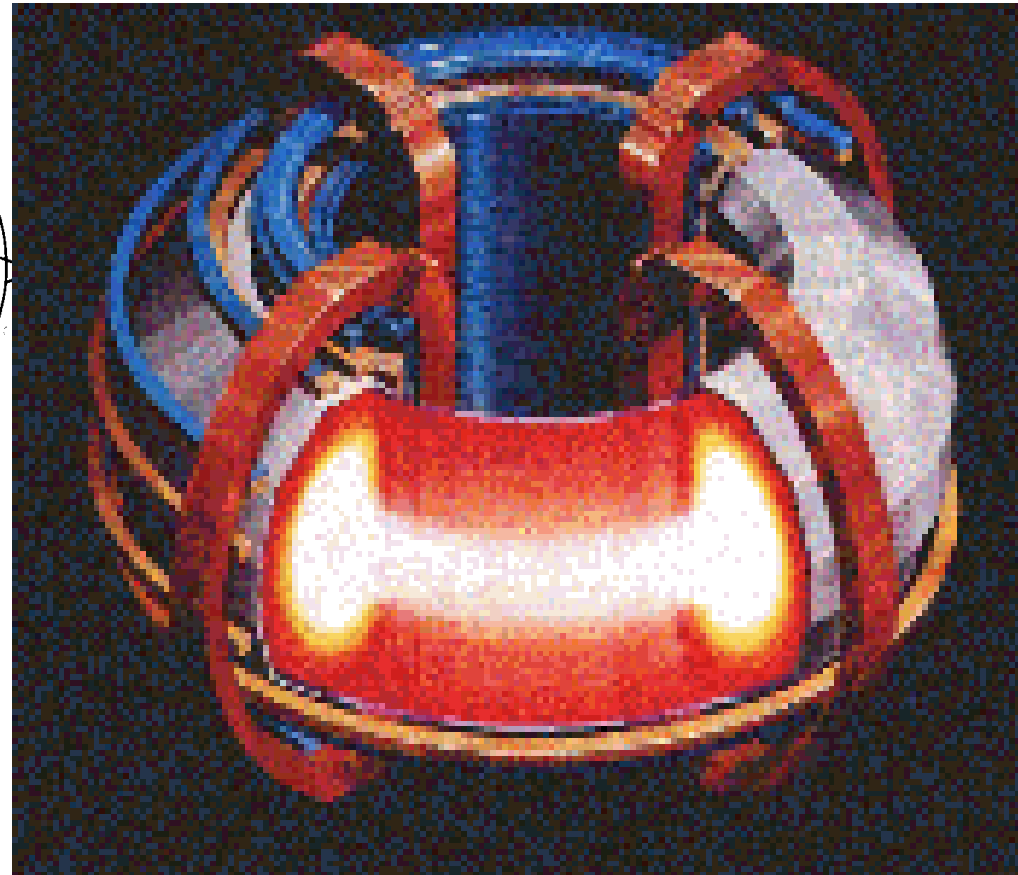
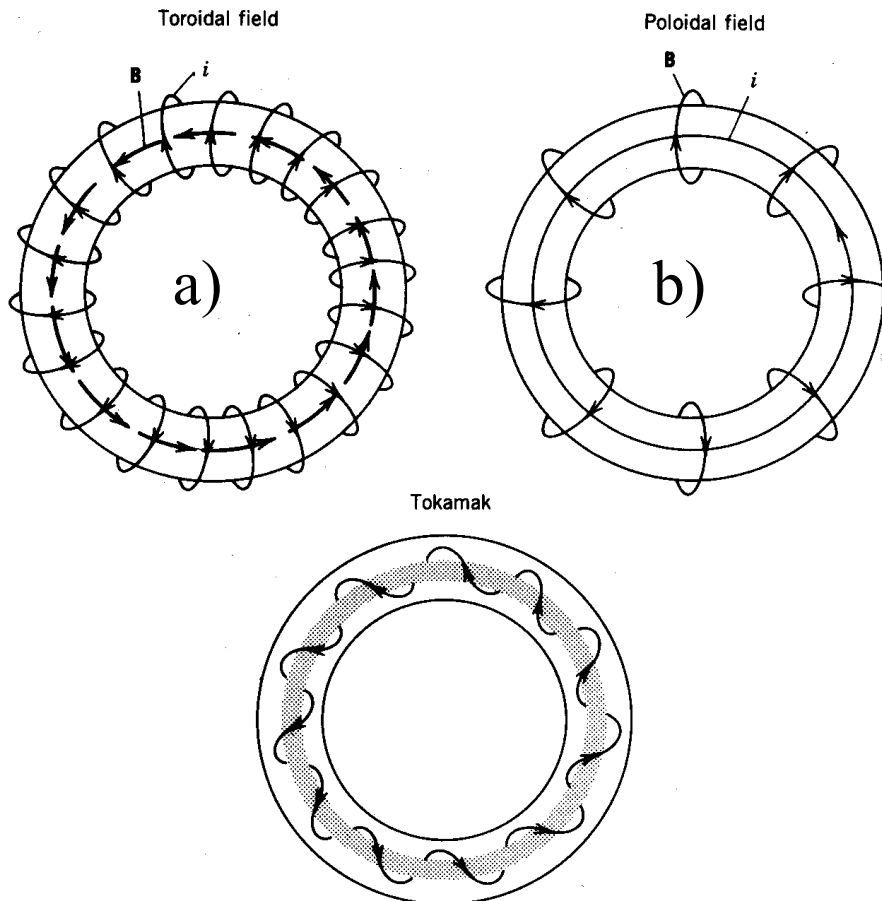
koncentracja $10^{13} - 10^{14}$ cz /cm³ w czasie $10^{-3} - 10^{-1}$ s

b) pułapki zamknięte - Tokamak

toroidalna komora jako wtórne uzwojenie wielkiego transformatora; pola stabilizujące

Tokamak (ros. toroidalnaja kamiera s magnitnoj katuszkaj)

- 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

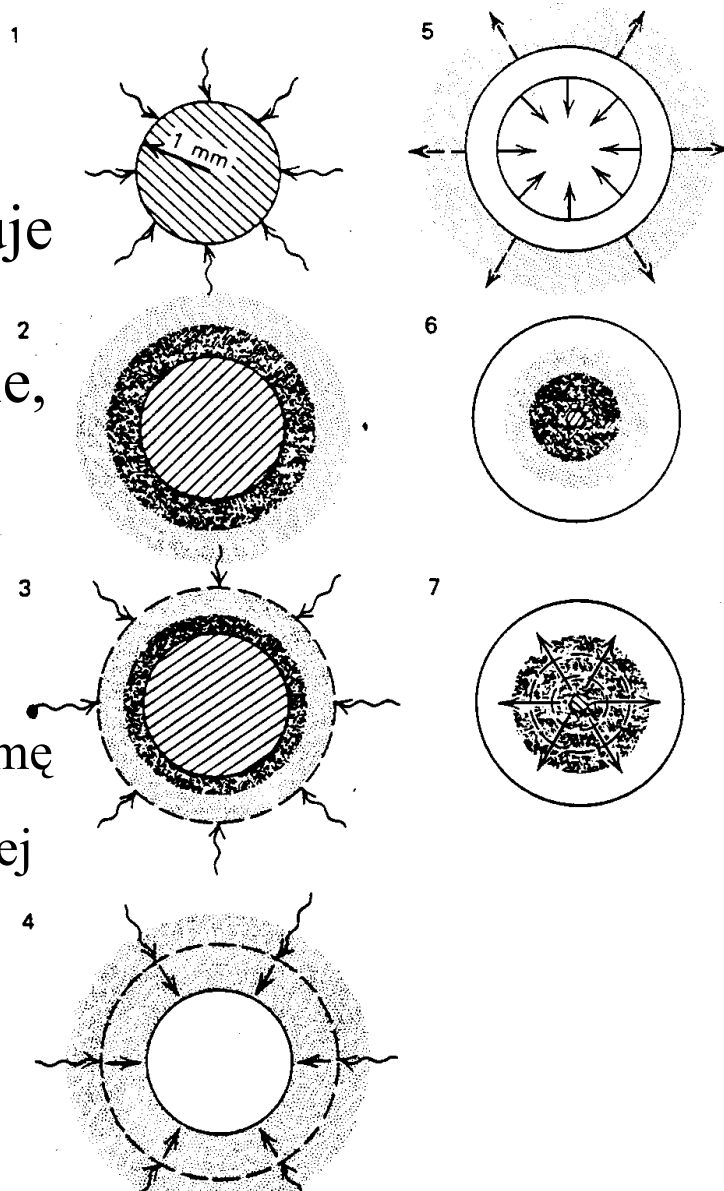
3. Grzanie plazmy (zapłon)

- 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 silną impulsową wiązką laserową ($2 \cdot 10^{14}$ W w impulsie) co powoduje jej ogrzewanie i ściskanie. Celem jest osiągnięcie wysokich T i n w krótkim czasie, zanim mikrotarcza eksploduje

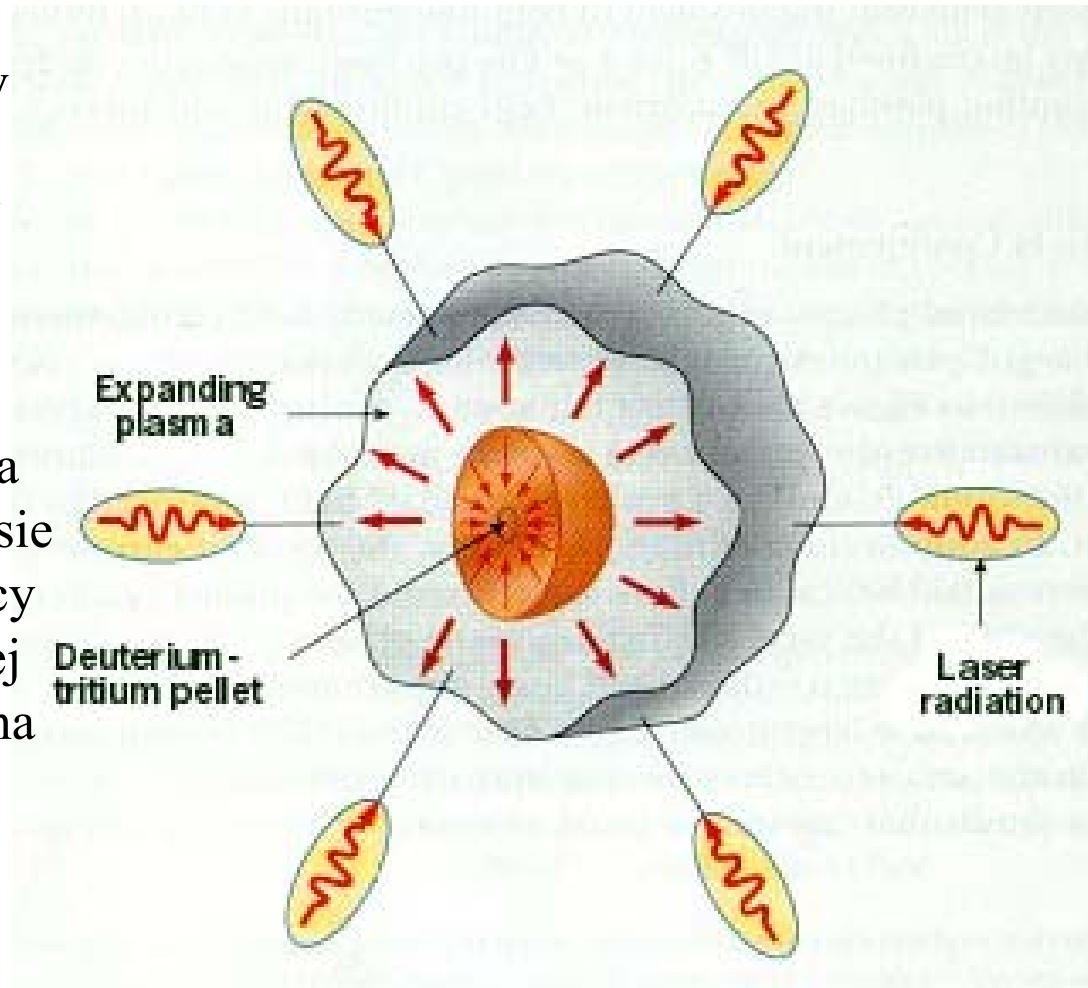
1. naświetlenie mikrotarczy wiązkami laserowymi
2. utworzenie plazmy z otoczki tarczy
3. dodatkowa absorpcja promieniowania przez plazmę
4. odparowanie otoczki i powstanie fali uderzeniowej
5. kompresja i ogrzanie rdzenia mikrotarczy
6. osiągnięcie zapłonu
7. wybuch termojądrowy



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.

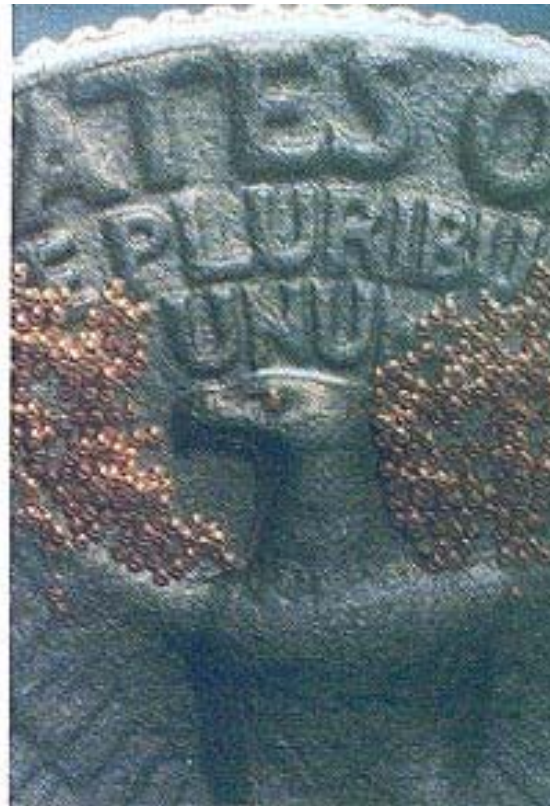
W wyniku naświetlania laserem każda tarcza uzyskuje 200 kJ energii w czasie krótszym niż 1 ns. Odpowiada to mocy w impulsie $2 \cdot 10^{14}$ W - 100 razy więcej niż stała moc wszystkich elektrowni na kuli ziemskiej.



Laboratorium Laserowe NOVA w Livermore



Naświetlanie mikrotarczy wiązka laserową



Mikrotarcze na tle monety 25 centowej

Elektrownia termojądrowa

Reakcja D-T w rdzeniu reaktora:

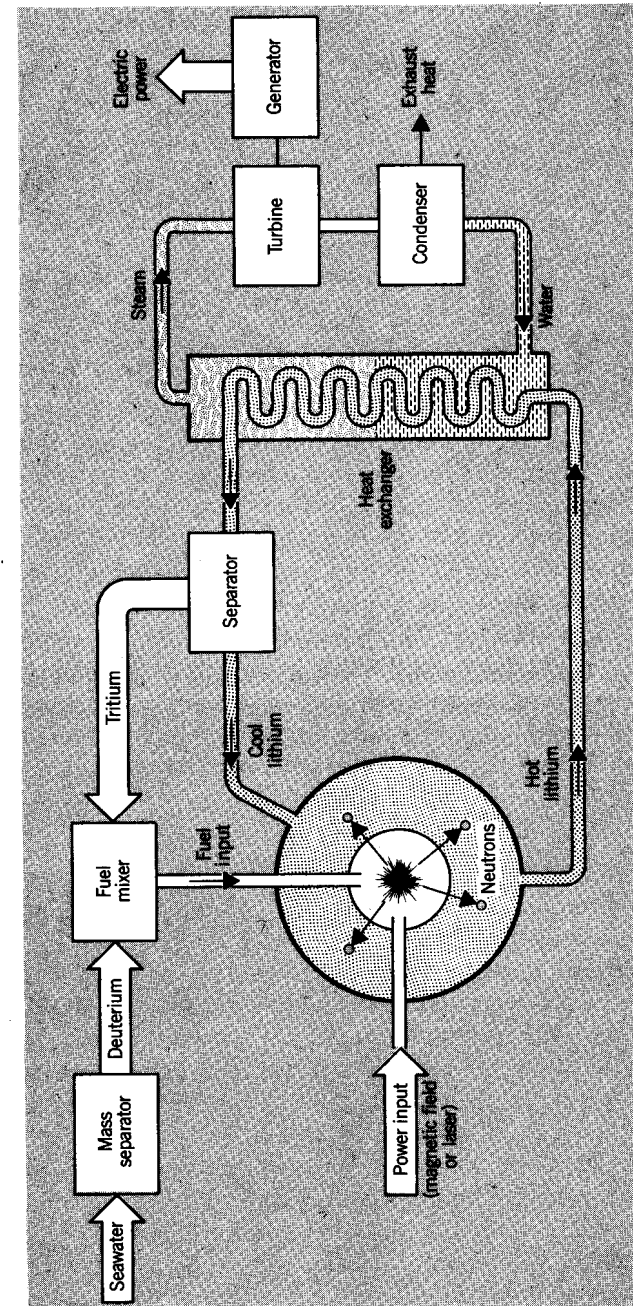


neutron oddziałuje z płaszczem
z ciekłego litu:



${}^4\text{He}$ 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 ${}^{238}\text{U}$

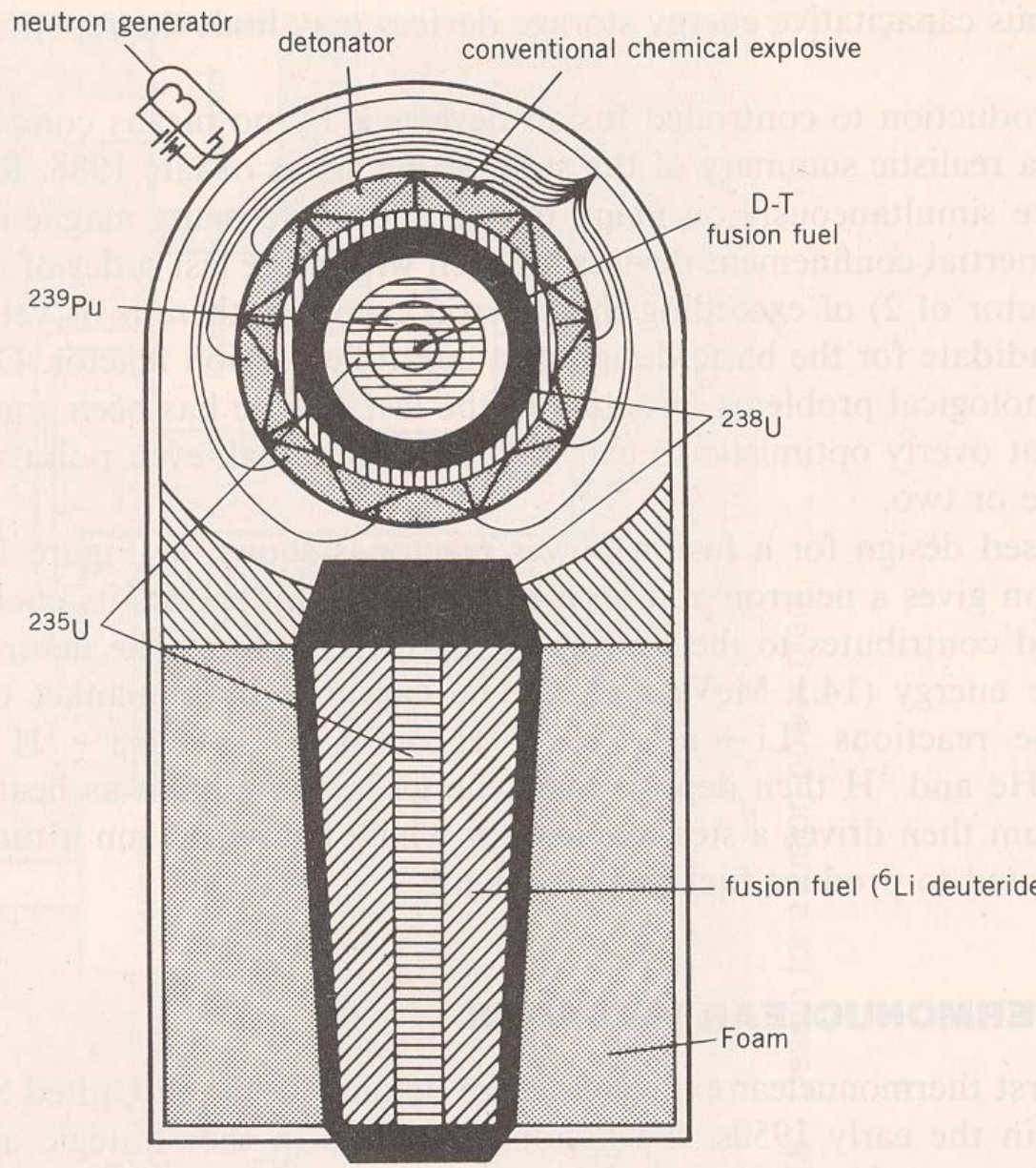
Broń termojądrowa wodorowo-uranowa (3F)

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

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

3. Tryt inicjuje reakcję
syntezy D-T

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



Zalety energetyki termojądrowej

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