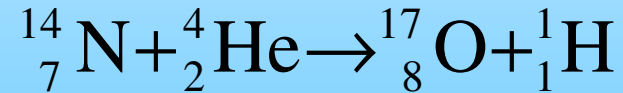


Reakcje jądrowe

Ogólnie



zapis skrócony ${}^{14}\text{N}(\alpha, \text{p}){}^{17}\text{O}$

Często reakcje jądrowe przechodzą przez stadium pośrednie



C^* jest stanem pośrednim (jądrem złożonym)

Jądro złożone ma czas życia poniżej 10^{-13} s.

W reakcjach jądrowych energia całkowita jest sumą energii kinetycznych E_k i energii masowych $E_m = mc^2$

$$E_c = \sum E_k + \sum mc^2$$

Aby zaszła reakcja z naładowana czastka (p, α , ciezkie jadro) musi byc pokonana bariera kulumbowska.

Dla reakcji $A + x \rightarrow B + y$ bilans energii jest następujący:

$$E_x + m_x c^2 + m_a c^2 = E_b + m_b c^2 + E_y + m_y c^2$$

Wyodrębnimy energie kinetyczne cząstek bombardujących i produktów otrzymamy efekt energetyczny reakcji jądowej Q

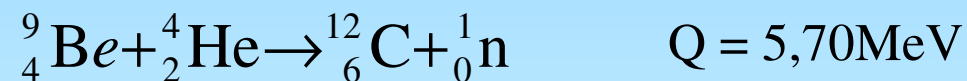
$$Q = E_b + E_y - E_x = (m_x + m_a - m_b - m_y)c^2$$

Reakcje mogą być endotermiczne i energia musi być dostarczona



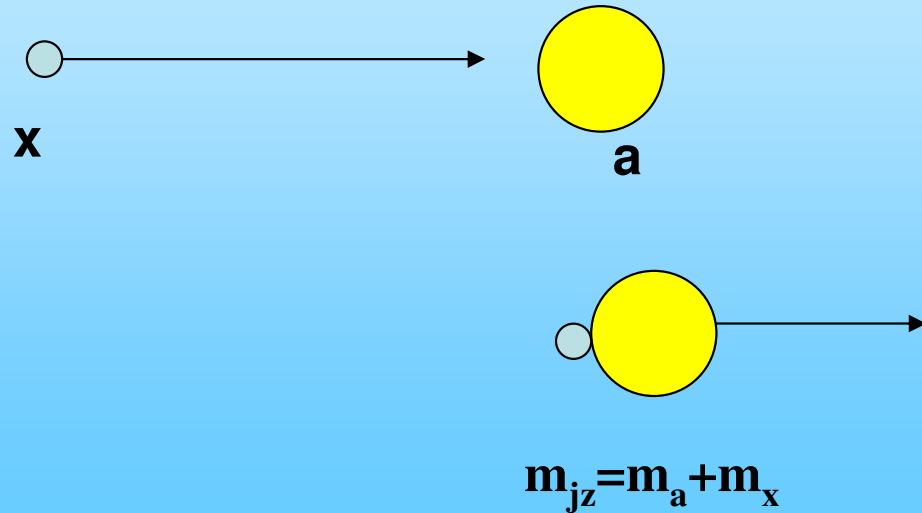
Dostarcza się energię poprzez bombardującą cząstkę α

lub egzotermiczne



energia jest odbierana poprzez emisję n i odrzut ${}^{12}\text{C}$

Dla przeprowadzenia reakcji endotermicznej jest potrzebna nieco większa energia niż Q , tzw energia progowa. Jest to związane z udzieleniem energii kinetycznej jądra złożonemu.



Z prawa zachowania pędu $m_x v_x = m_{jz} v_{jz}$ po podniesieniu do kwadratu mamy: $m_x^2 v_x^2 = m_{jz}^2 v_{jz}^2$

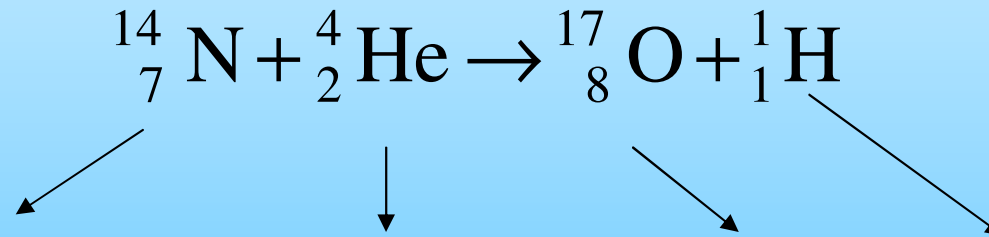
$E_x m_x = E_{jz} m_{jz}$ aby zaszła reakcja jądrowa energia pocisku E_x musi być większa od Q o wartość energii progowej E_{jz}

$$E_x = E_{jz} - Q = E_x \frac{m_x}{m_x + m_a}$$

Czyli E_x będącą energią progową wynosi:

$$E_x(\text{prog}) = -Q \frac{m_x + m_a}{m_a} = -Q \left(1 + \frac{m_x}{m_a} \right)$$

Przykład, reakcja endotermiczna



masy wynoszą: 14,003074 4,002604 16,9991333 1,007825

bilans masy: 18,005678 - 18,006958 = - 0,00128 u

$$Q = -0,00128\text{u} \cdot 931,5\text{MeV/u} = -1,19\text{MeV}$$

Reakcja jest procesem endotermicznym i trzeba dostarczyć jej energii poprzez energię kinetyczną cząstki α .

$$E_x(\text{prog}) = -Q \frac{m_x + m_a}{m_a}$$

$$E_{\text{prog}} = 1,19 \frac{14 + 4}{14} = 1,59\text{MeV}$$

Przekrój czynny
Prawdopodobieństwo zajścia reakcji jądrowej określa przekrój
czynny,
określa on skuteczność zderzeń

Przekrój czynny jest wyrażany w jednostkach powierzchni. Jest to powierzchnia jaka uczestniczy w reakcji jądrowej:

gdzie:

$$\sigma = \frac{L_z}{Nx\varphi}$$

L_z - liczba zderzeń skutecznych

N - ilość jąder na m^3 tarczy mogących brać udział w reakcji

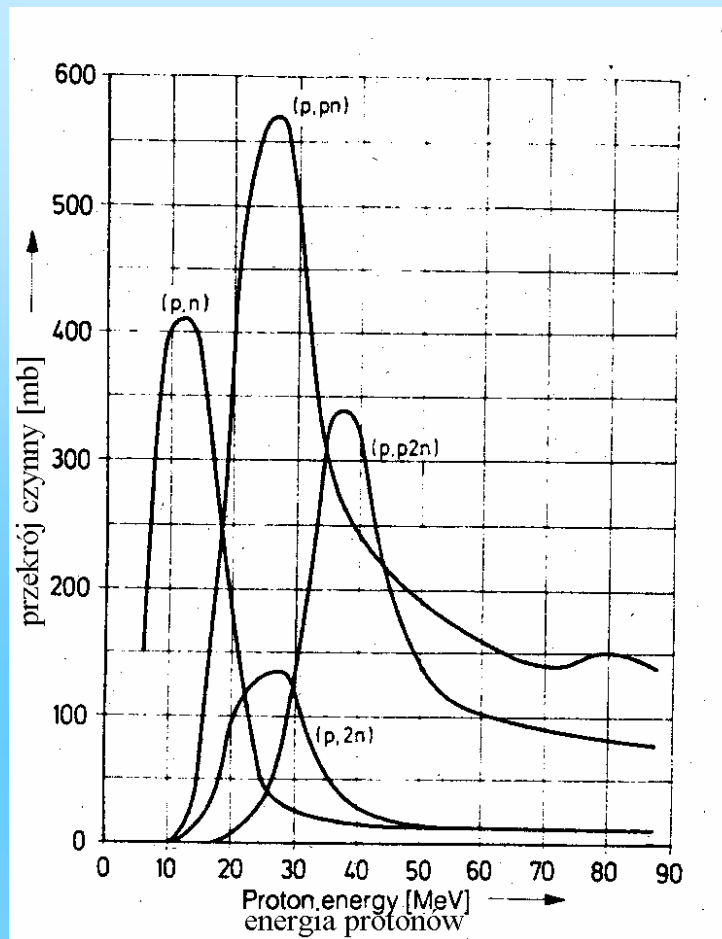
X - grubość tarczy

φ - strumień cząstek bombardujących
na m^2 tarczy i 1 s

Jeżeli średni promień jądra wynosi 6×10^{-15} m

To przekrój takiego jądra $3,14 \times (6 \times 10^{-15} \text{ m})^2 \approx 10^{-28}$ m jest jednostka przekroju czynnego (1 b - barn)

Zazwyczaj przekroje czynne reakcji są rzędu mili i mikro barnów.



Reakcje p z ^{63}Cu

Funkcje wzbudzenia przedstawiają wydajności reakcji w zależności od energii cząstki

Wydajność reakcji jądrowych

Powstający w reakcji jądrowej promieniotwórczy nuklid jest zazwyczaj nietrwały i ulega rozpadowi z czasem połowicznego rozpadu $t_{1/2}$

$$-\frac{dN_b}{dt} = \sigma\Phi N_a - \lambda N_b$$

N_b – powstały nuklid promieniotwórczy

N_a – nuklid macierzysty (bombardowany)

F - strumień

σ - przekrój czynny

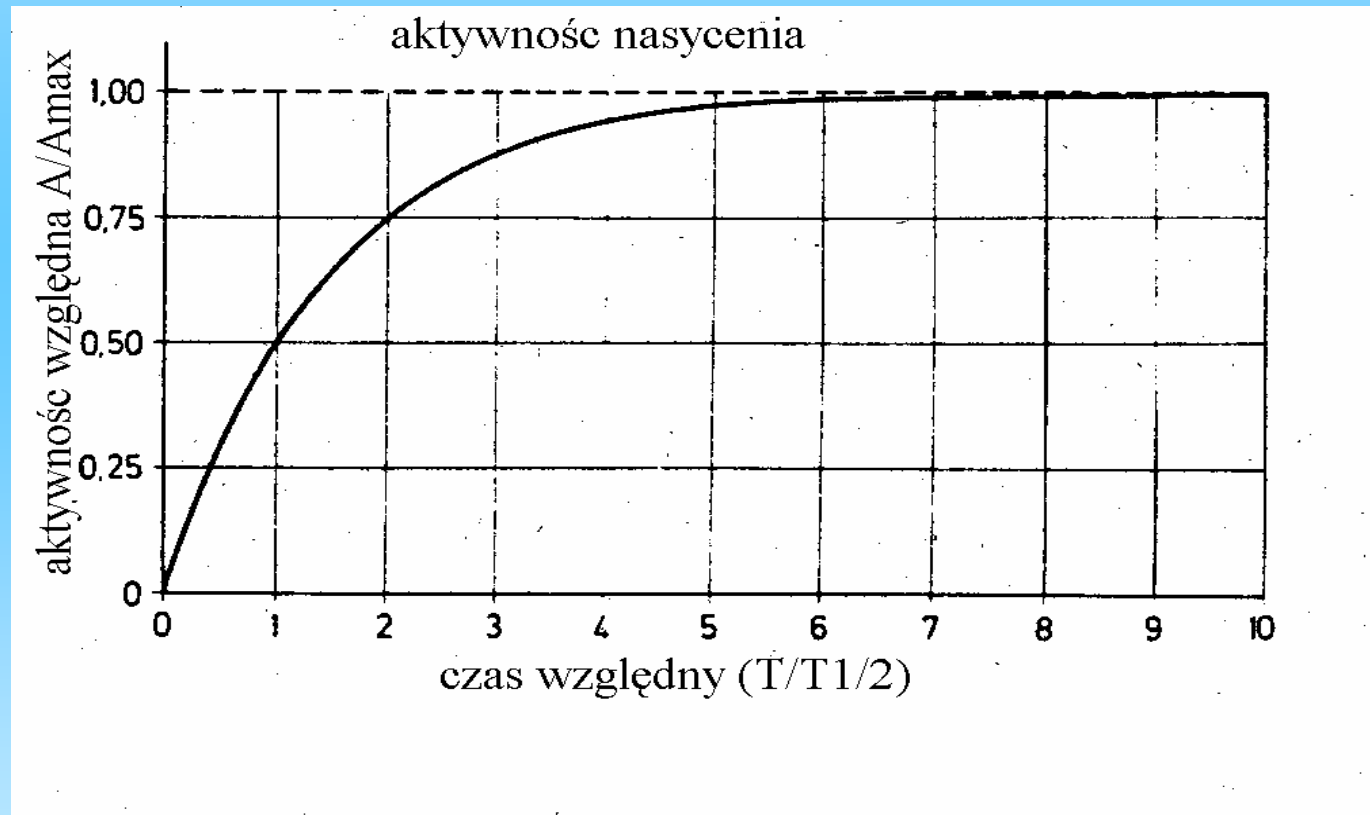
λ - stała rozpadu nuklidu B

Całkując to równanie przy założeniu, że Φ i N_a const. Otrzymujemy:

$$N_b = \frac{\sigma\Phi N_a}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

Gdy czasy połowicznego rozpadu nuklidu B są duże to ilość otrzymanego B zależy od czasu bombardowania.

Gdy są małe to po ok. $6 T_{1/2}$ osiąga się nasycenie i nie ma sensu dłuższe naświetlanie

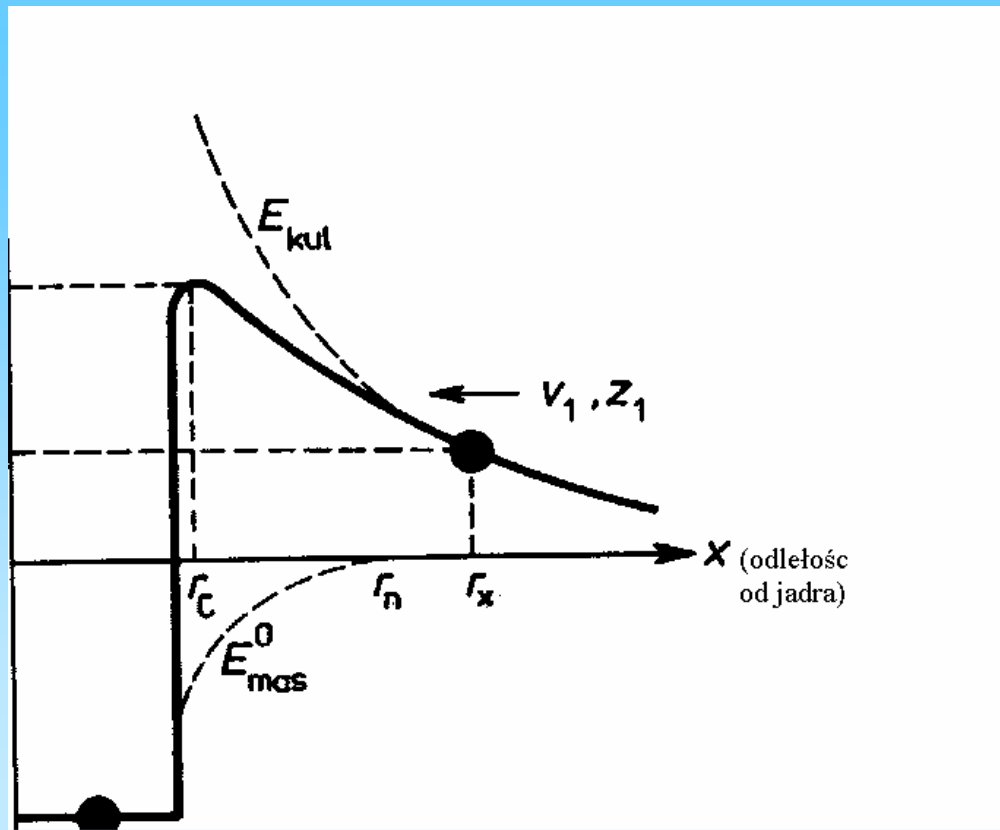


Bariera kulombowska

Aby naładowana cząstka mogła wniknąć w jądro musi pokonać barierę kulombowską. Przy mniejszej energii odbija się od jądra. Po wniknięciu do jądra zaczynają działać siły jądrowe i tworzy się wzbudzone jądro złożone.

Istnieje także prawdopodobieństwo, że cząstka o mniejszej energii niż bariera kulombowska wniknie do jądra w wyniku **efektu tunelowego**

Cząstki bombardujące to protony, α (^4He), deuterony ^2H , ciężkie jony (^{12}C , ^{18}O , ^{20}Ne) itd.



Wysokość bariery kulombowskiej dla reakcji jądrowych

Reakcja jądrowa	Wysokość bariery kulombowskiej(MeV)
$^{12}\text{C} + ^1\text{H}$	2,19
$^{238}\text{U} + ^1\text{H}$	14,24
$^{14}\text{N} + ^4\text{He}$	4,99
$^{238}\text{U} + ^4\text{He}$	26,65
$^{238}\text{U} + ^{12}\text{C}$	75,78
$^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$	1514,7

Ważniejsze reakcje dwuciałowe

Reakcje niskoenergetyczne - przy niskich energiach emitowana jest jedna cząstka.
Przy wyższych energiach następuje emisja dwóch lub więcej cząstek

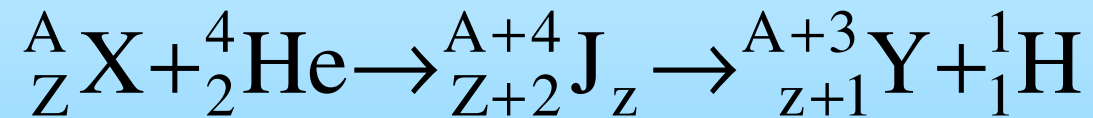
		$\alpha, 2n$	α, n		
$p, 2n$	p, n	d, n p, γ		α, p	
		jądro	d, p n, γ		
p, α		n, d γ, p	n, p		
	n, α				

N \longrightarrow

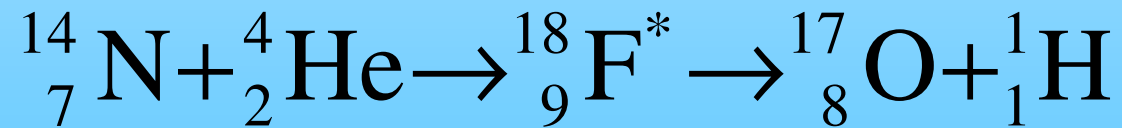
\uparrow
Z

Ważniejsze reakcje jądrowe

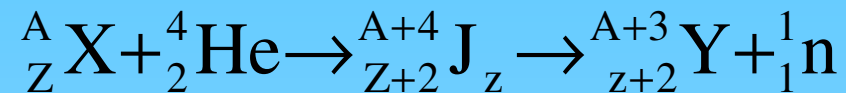
1. α -proton



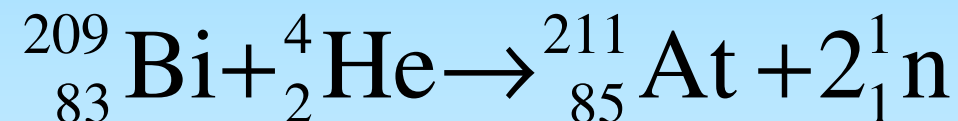
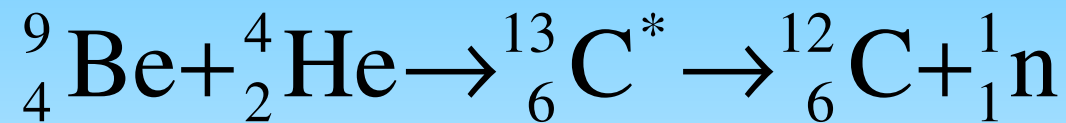
pierwsze doświadczenie Rutherforda



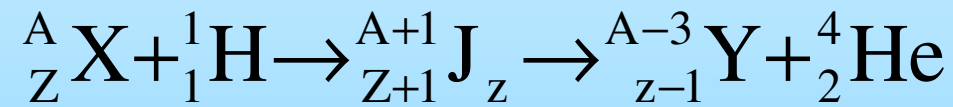
2. α -neutron



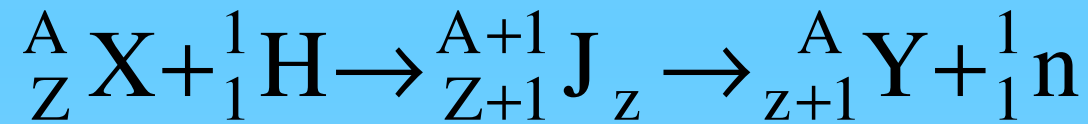
reakcja będąca popularnym źródłem neutronów



3. proton - α

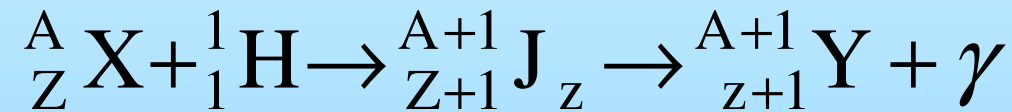


4. proton-neutron



W tej reakcji otrzymuje się jądra izobaryczne np. ${}^{11}\text{B}(\text{p},\text{n}){}^{11}\text{C}$, ${}^{18}\text{O}(\text{p},\text{n}){}^{18}\text{F}$, ${}^{63}\text{Cu}(\text{p},\text{n}){}^{63}\text{Zn}$

5. proton - γ

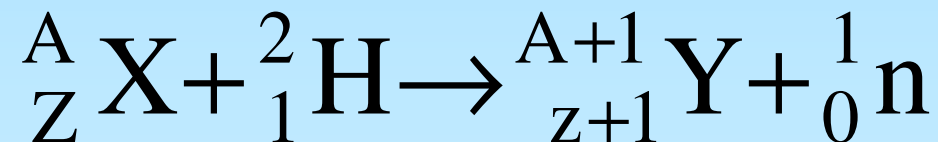
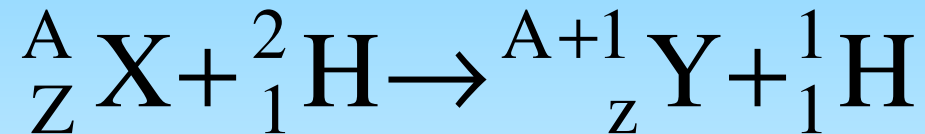
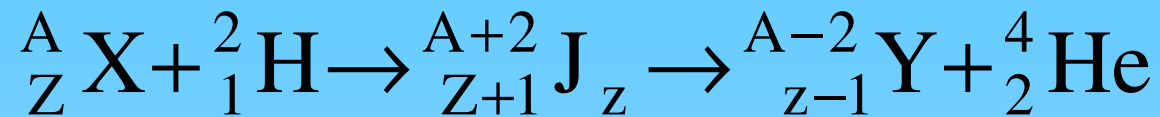


Gdy w wyniku bombardowania protonami tworzy się jądro stosunkowo trwałe (mające liczby magiczne) to wzbudzenie jądra złożonego realizuje się poprzez emisję kwantu γ .

Np.



6. reakcje deuteron- α , deuteron - proton, deuteron-neutron



7. Reakcje fotojądrowe

Reakcje jądrowe zachodzące pod wpływem bombardowania wysokoenergetycznymi fotonami.

Aby wybita mogła być cząstka z jądra energia fotonu musi być co najmniej większa od energii wiązania cząstki w jądrze.

Dla lekkich jąder, gdzie energia wiązania jest mała fotorozpad może zajść przy stosunkowo małych energiach.



inną typową reakcją jest ${}^{31}\text{P}(\gamma, \text{n}){}^{30}\text{P}$

Źródłem wysokoenergetycznego promieniowania g mogą być akceleratory, tzw promieniowanie hamowania, niektóre reakcje (p, γ) np. ${}^7\text{Li}(\text{p}, \gamma){}^8\text{Be}$ emituje kwant γ o energii 17,2 MeV.

8. reakcje powodowane elektronami

Reakcje te są rzadkie i nie mają znaczenia praktycznego.

np: ${}^{63}\text{Cu}(\text{e}, \text{e}, \text{n}){}^{62}\text{Cu}$, ${}^{64}\text{Zn}(\text{e}, \text{e}, \text{n}){}^{63}\text{Zn}$, ${}^{109}\text{Ag}(\text{e}, \text{e}, \text{n}){}^{108}\text{Ag}$

7. Reakcje powodowane przez neutrony

Neutron – okres półrozpadu 11-12 min

W zależności od energii neutrony dzielimy na:

termiczne – 0 - 0,1 eV

powolne – 0 – 100 eV

Średnie – 100 eV - 100 keV

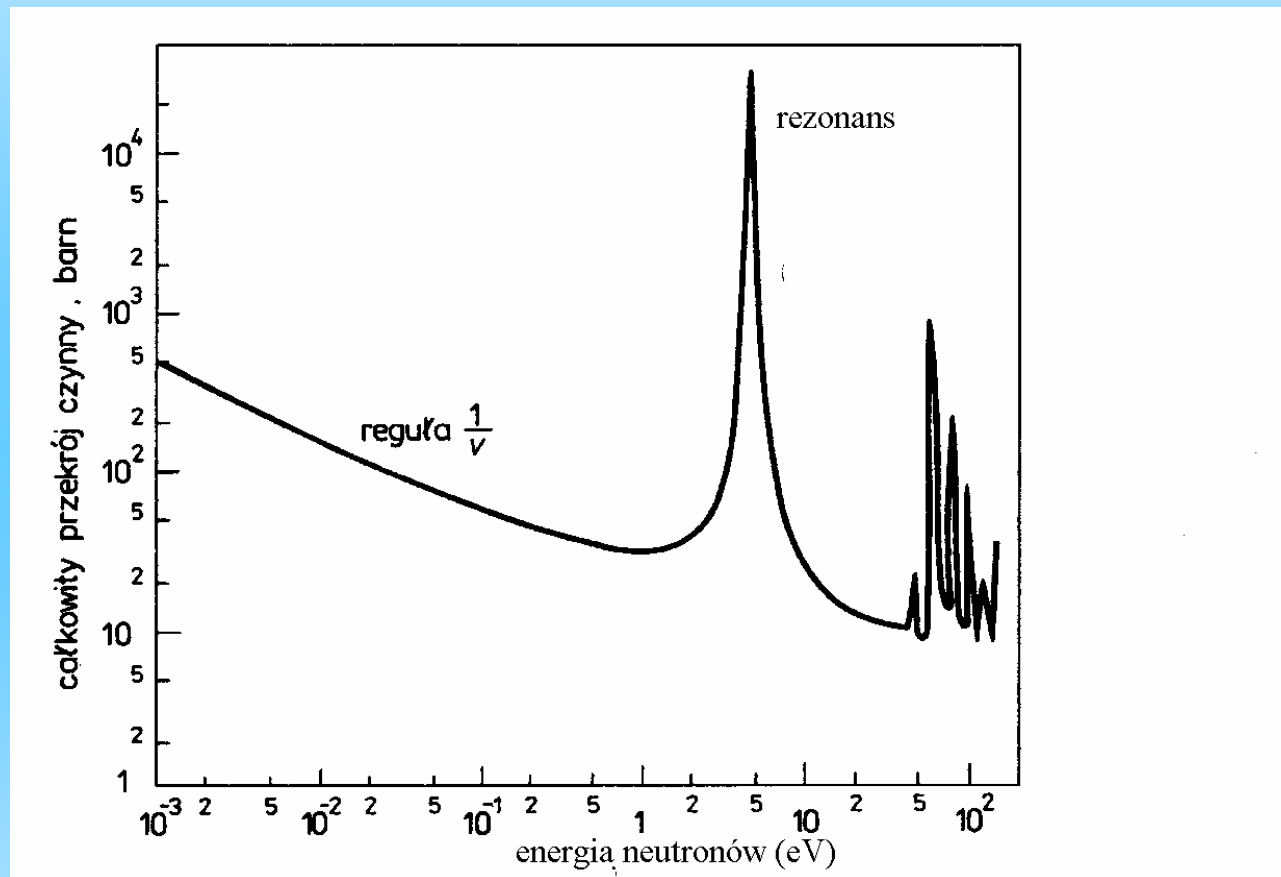
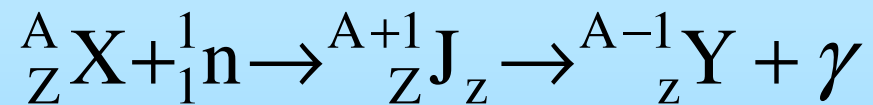
prędkie > 100 keV

Neutrony termiczne i powolne uzyskuje się na drodze hamowania neutronów prędkich w zderzeniach sprężystych.

Przekroje czynne dla neutronów prędkich są zbliżone do przekrojów geometrycznych.

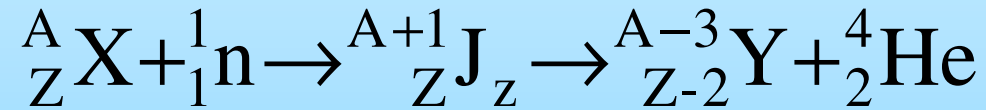
Dla neutronów termicznych i powolnych na skutek wychwytyń rezonansowych przekroje mogą być większe.

Reakcje n, γ

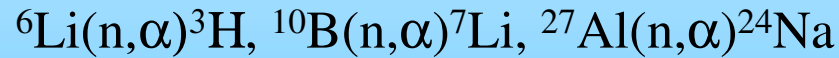


Większość trwałych nuklidów może pochłaniać neutrony termiczne (rezonansowe) o energii 1-10 eV. Neutrony o tej energii mają maksima absorpcji. Powstałe izotopy promieniotwórcze są na lewo od wyspy stabilności i ulegają reakcją β^- .

reakcje neutron - α

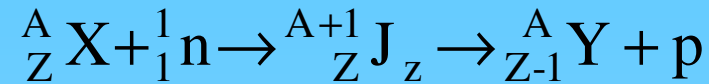


np.



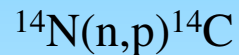
Dwie pierwsze reakcje są przykładami rozszczepienia jądra na fragmenty.

reakcje neutron-proton



Produktami są izobary tarczy.

Tego typu reakcją produkuje się ${}^{14}\text{C}$ stosowany powszechnie w naukach biologicznych



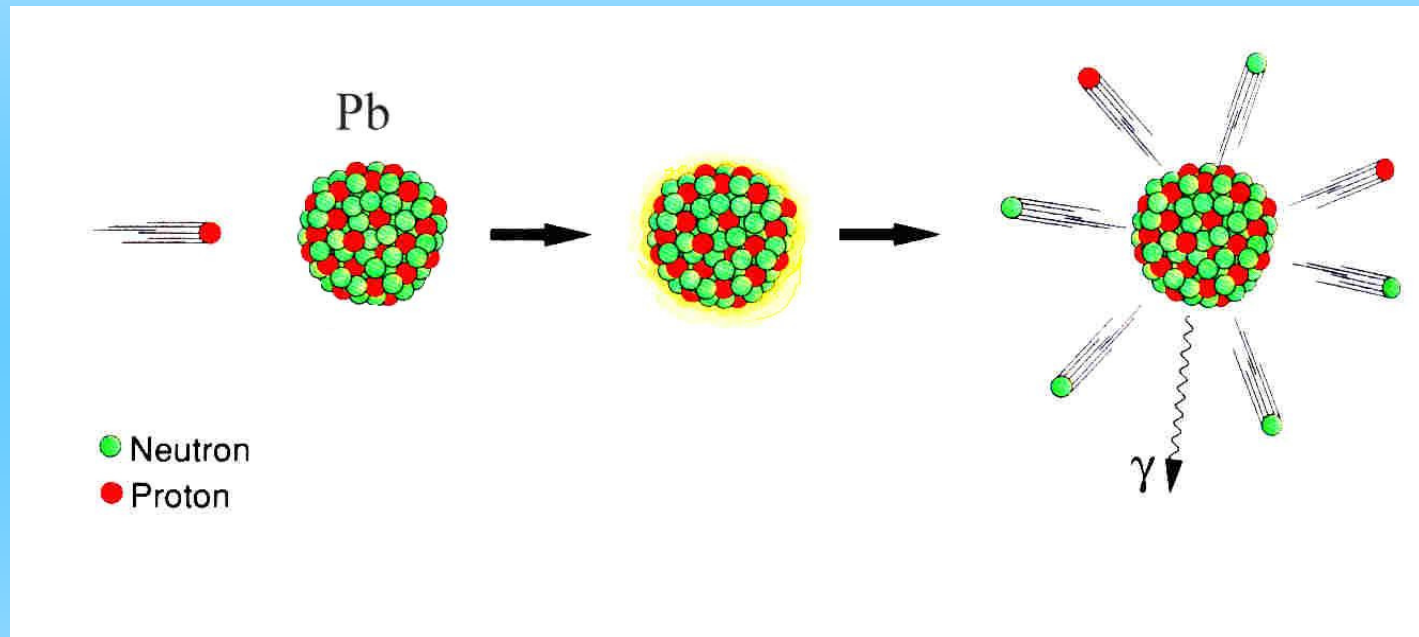
Napromieniowując NH_4NO_3 można otrzymać duże wagowe ilości ${}^{14}\text{C}$

Źródła neutronów

źródło	Strumień n (cm ⁻² s ⁻¹)
Reaktor	10 ¹⁰ -10 ¹⁶
⁹ Be(α,n) ¹² C	10 ⁵ -10 ⁸
⁹ Be(γ,n)2α	10 ⁵ -10 ⁸
⁹ Be(d,n) ¹⁰ B	10 ⁸ -10 ¹¹
²⁵² Cf(f,n)	2,3x10 ⁶ /1μg ²⁵² Cf
Reakcje spalacji	10 ¹⁷ -10 ²⁰

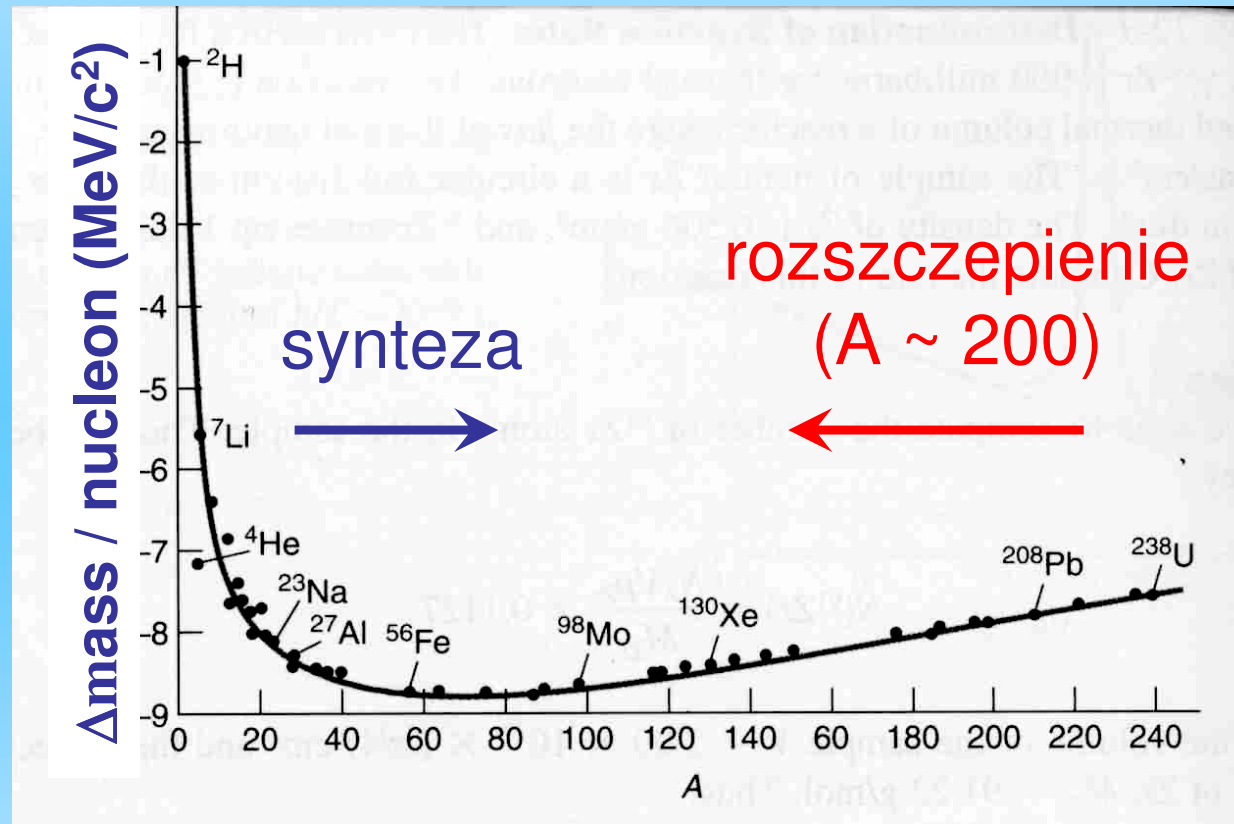
Cząstki są otrzymywane ze źródeł takich jak ^{226}Ra , ^{210}Po , ^{241}Am .

Deuterony do reakcji $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{B}$ są przyspieszane w małych akceleratorach. Neutrony spalacyjne powstają przez bombardowanie ciężkich tarcz (Pb) wysokoenergetycznymi protonami.

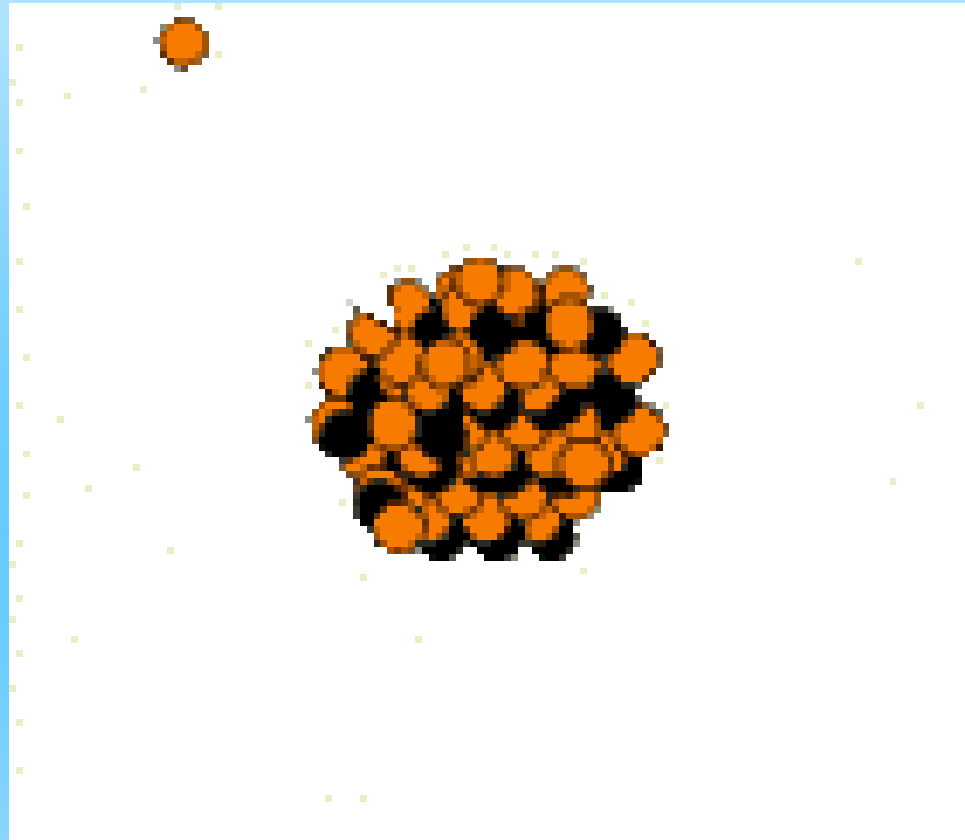


Silnie wzbudzone w wyniku bombardowania jądro ołowiu emituje strumień neutronów i protonów. Protony są oddzielane w polu elektrycznym.

Synteza i rozszczepienie jąder

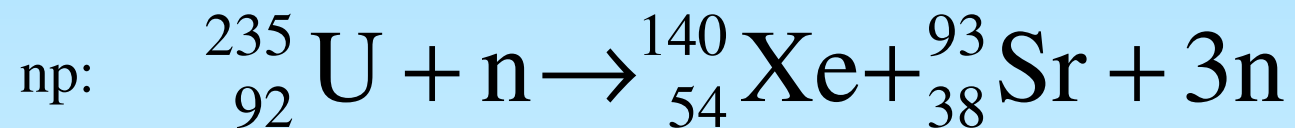
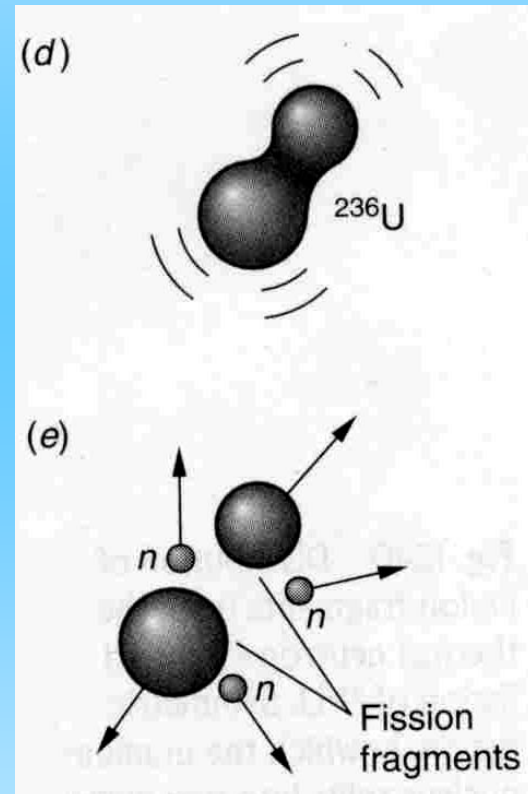
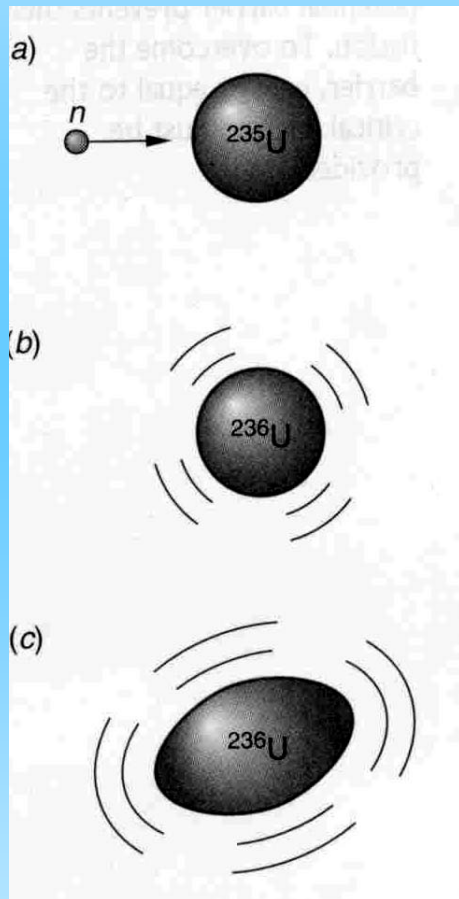


Indukowane reakcje rozszczepienia

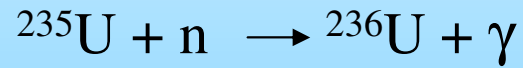


Reakcje rozszczepienia polegają na wychwycie cząstki przez jądra pierwiastków ciężkich i rozpadzie silnie wzbudzonego jądra na dwa nietrwałe fragmenty oraz neutrony.

Indukowana neutronami reakcja rozszczepienia:



Oprócz reakcji rozszczepienia ^{235}U zachodzi także wychwyty radiacyjny (ok.15%)



Ciężkie jądra mają nadmiar neutronów:

$$\text{np } ^{235}\text{U} \quad \frac{235 - 92}{92} = 1,55$$

Produkty rozszczepienia $^{137}\text{Cs} \quad \frac{137 - 55}{55} = 1,44$

$$^{90}\text{Zr} \quad \frac{90 - 40}{40} = 1,25$$

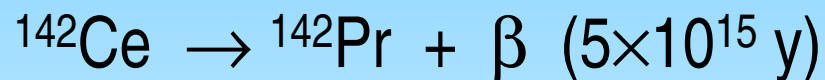
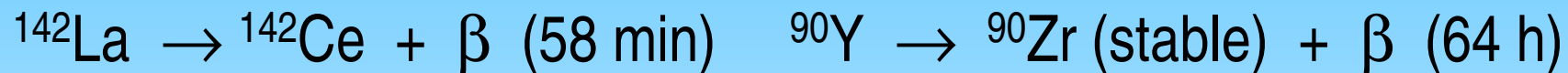
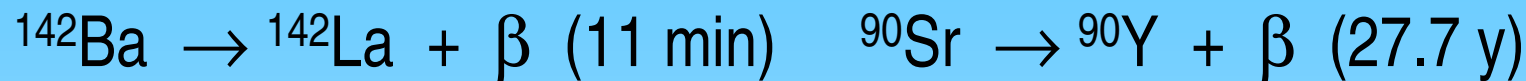
Nadmiar neutronów jest emitowany natychmiast i w wyniku rozpadów β fragmentów rozszczepienia.

Bilans energetyczny reakcji rozszczepienia ^{235}U

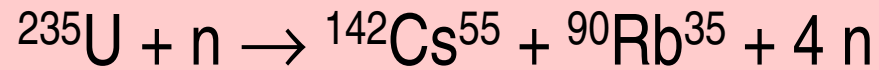
zakładamy reakcje rozszczepienia:



Produkty rozszczepienia ulegają dalszym rozpadom β^-



zakładamy reakcje rozszczepienia:



Bilans masy :



$$235.04924 = 141.907719 + 89.904703 + 3 \times 1.008665 + Q$$

$$Q = (235.043924 - 141.907719 - 89.904703 - 3 \times 1.008665)$$

$$= 0.205503 \text{ amu} \times 931.4812 \frac{\text{MeV}}{\text{amu}}$$

$$= 191.4 \text{ MeV/na rozpad} \times 1.6022 \times 10^{-13} \frac{\text{J}}{\text{MeV}}$$

$$= 3.15 \times 10^{-11} \text{ J}$$

Ile energii wydziela się z rozszczepienia 1.0 kg ^{235}U .

$$(3.15 \cdot 10^{-11} \text{ J}) \cdot 1000 \text{ g} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{235 \text{ g}} \cdot \frac{6.023 \cdot 10^{23}}{1 \text{ mol}} = 8.06 \cdot 10^{13} \text{ J/kg}$$

Jest to równoważnik 2 mln kg węgla

Podział Energii (MeV) w reakcji rozszczepienia

Energia kinetyczna fragmentów rozszczepienia	167 MeV
Energia prompt ($< 10^{-6}$ s) gamma	8
Energia kinetyczna neutronów	8
Energia rozpadu gamma produktów rozszczepienia	7
Energia rozpadu β produktów	7
Energia antyneutrino ($\bar{\nu}_e$)	7

Jakie jądra mogą ulec rozszczepieniu:

Trwałości jądra sprzyja mała ilość nukleonów powierzchniowych $A^{2/3}$,

Nietrwałość odpychająca siła kolumbowska $\frac{Z^2}{A^{1/3}}$

Czyli parametr rozszczepienia $\frac{\frac{Z^2}{A^{1/3}}}{A^{2/3}} = \frac{Z^2}{A}$

Przyjmuje się, że od wartości 33-33,7 jądra są rozszczepialne przez neutrony prężkie, a od 35,7 przez neutrony o dowolnej energii.

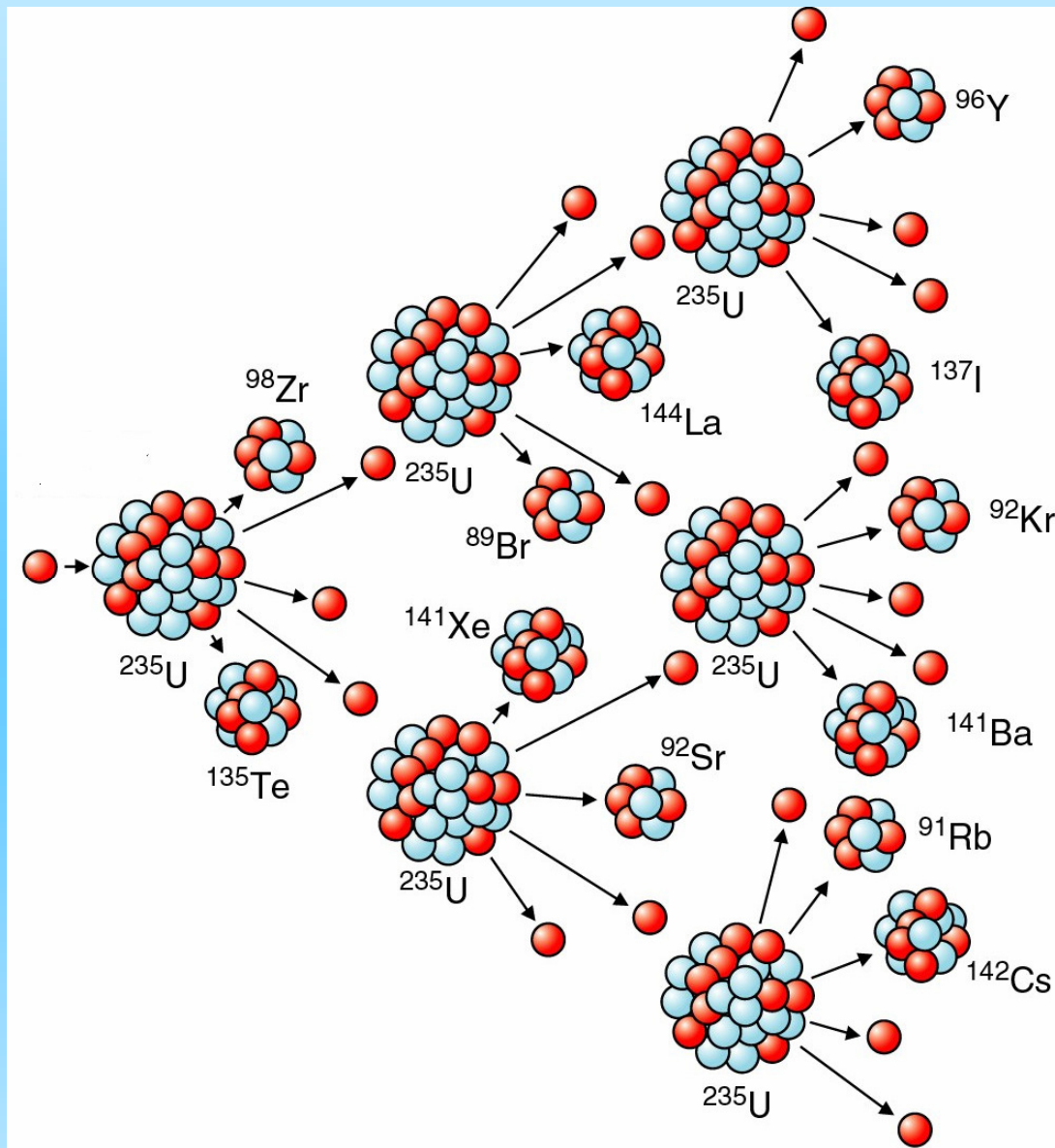
Aby zaszło rozszczepienie musi być pokonana energia aktywacji konieczna do pokonania bariery, czyli energia wzbudzenia po przyłączeniu neutronu musi być większa od energii aktywacji.

Jądro pierwotne	Jądro złożone	E_w (MeV)	E_A (MeV)
^{233}U	$^{234}\text{U}^*$	6,6	4,6
^{235}U	$^{236}\text{U}^*$	6,45	5,3-5,8
^{238}U	$^{238}\text{U}^*$	4,9	5,5
^{232}Th	$^{233}\text{Th}^*$	5,1	6,5
^{237}Np	$^{238}\text{Np}^*$	5,0	4,2
^{239}Pu	$^{240}\text{Pu}^*$	6,4	4,0

Zastosowanie reakcji rozszczepienia

- Produkcja izotopów dla medycyny, ^{131}I ^{90}Sr (^{90}Y), ^{99}Mo ($^{99\text{m}}\text{Tc}$), ^{103}Ru ($^{103\text{m}}\text{Rh}$)
- Bron jądrowa
- Energetyka jądrowa (oddzielny wykład)

Bron jądrowa oparta na reakcji rozszczepienia ^{235}U i ^{239}Pu



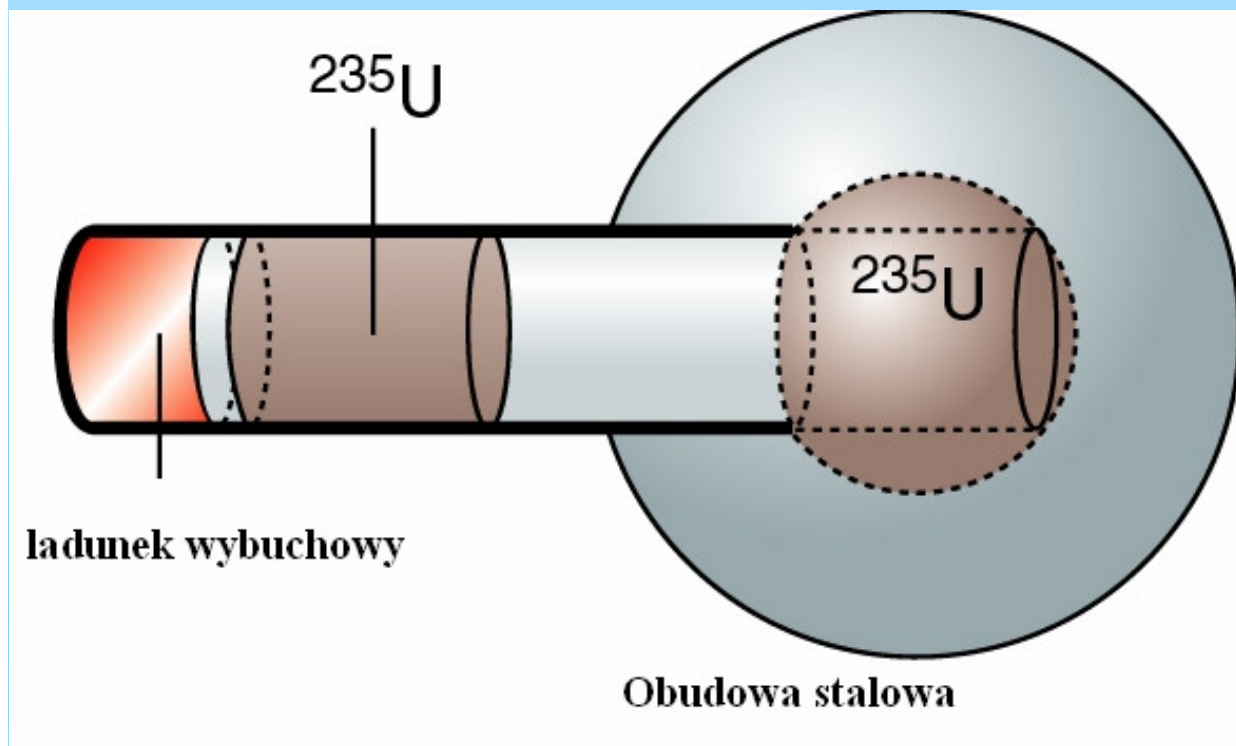
Reakcja lancuchowa

Co jest potrzebne do budowy bomby atomowej

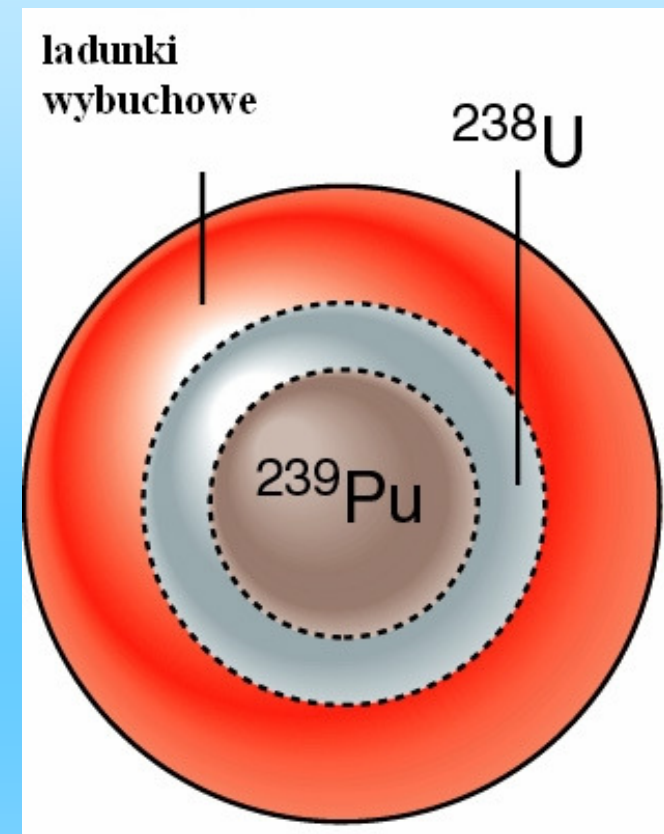
1. Źródło neutronów
2. Materiał rozszczepialny
3. Rozszczepienie musi produkować ponad 1 neutron
4. Ilość materiału musi być większa od masy krytycznej

Materiały rozszczepialne

- ^{235}U i ^{239}Pu
- ^{235}U musi być wydzielony z ^{238}U
- ^{239}Pu jest produkowany w reaktorze przez naświetlenie ^{238}U neutronami

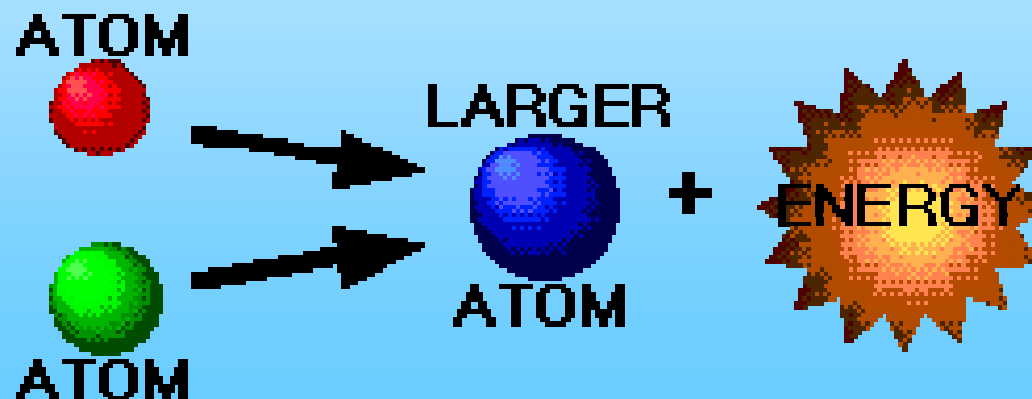


Little Boy (60 kg ^{235}U)



Fat Man (6kg ^{239}Pu)

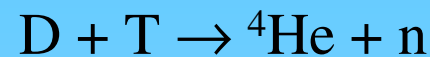
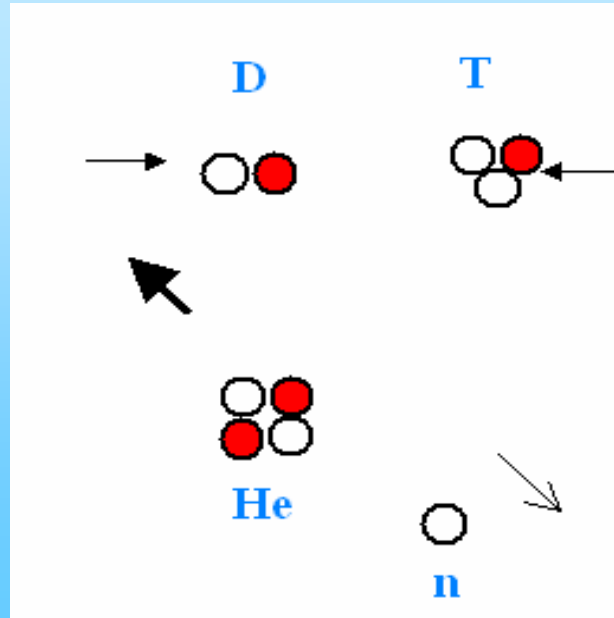
Reakcje termojądrowe-fuzji



Są to reakcje wymagające bardzo wysokich temperatur. Energia kinetyczna cząstek zderzających się musi być bardzo duża.

Są to w praktyce reakcje D+D, D+T, T+T. Aby zaszła reakcja musi być pokonana bariera energetyczna 10^{-13}J co wymaga energii kinetycznej cząstek o temperaturze 10^9 K . Ze względu na występowanie efektu tunelowego temperatura może być mniejsza o jeden rząd wielkości.

Energia syntezy ^4He w reakcji D-T



Energia syntezy - Q

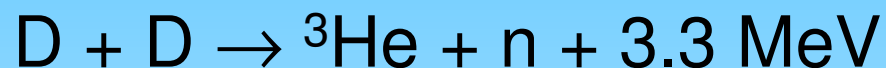
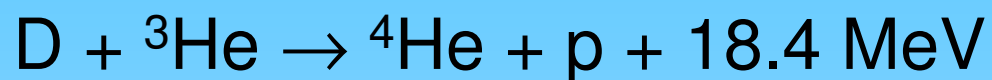
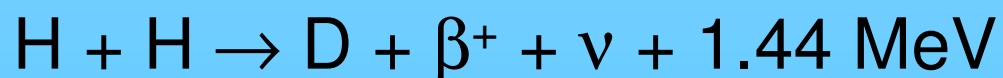
Deficyty masy w MeV dla substratów i produktu

$$\begin{aligned} \text{D} + \text{T} &\rightarrow {}^4\text{He} + \text{n} + Q \\ 13,136 + 14,950 &= 2,425 + 8,070 + Q \end{aligned}$$

$$Q = 17.6 \text{ MeV}/5 \text{ nukleonów}$$

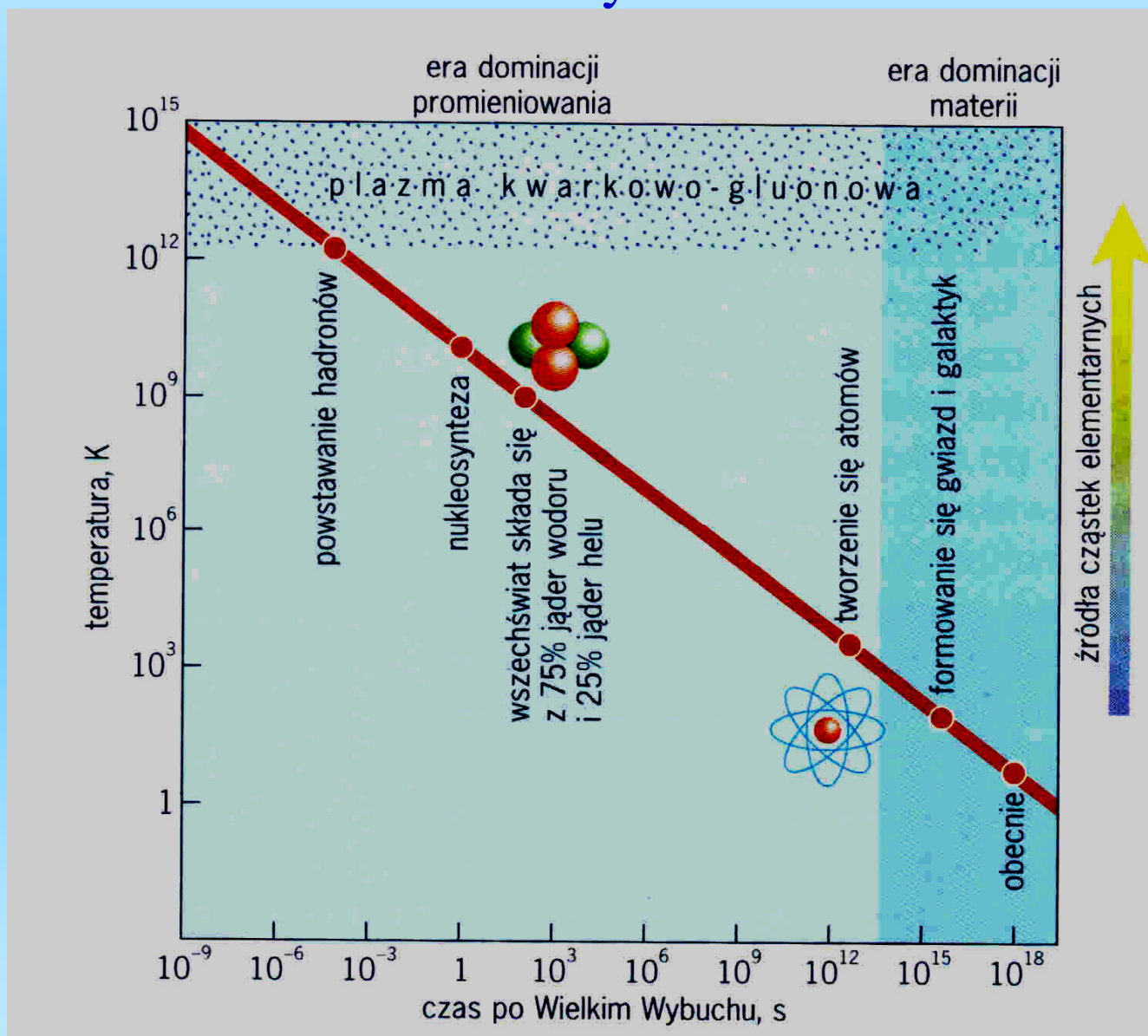
czyli 3,5 MeV/amu w porównaniu 0,8 MeV/amu dla rozszczepienia

Energie reakcji syntezy



Reakcje termojądrowe w gwiazdach

wielki wybuch

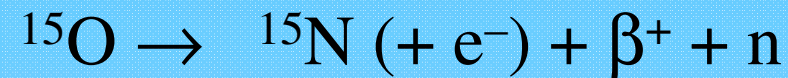
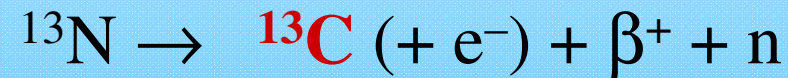


Cykl wodorowy

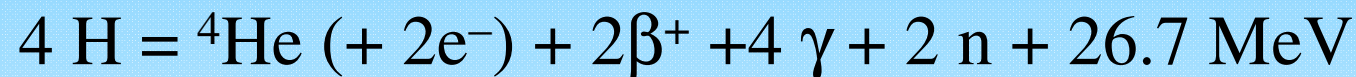
- Podstawową reakcją zachodzącą w gwiazdach jest
- „spalanie” wodoru:
- Zaczyna się ono przy temperaturze $5 \times 10^6 \text{K}$ trwa przy
- powolnym wzroście temperatury,
- $2^1\text{H} \rightarrow ({}^2\text{He}^*) \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + 0,44\text{MeV}$
- Deuteron wyłapuje proton w szybkiej reakcji
- ${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma + 5,49 \text{ MeV}$
- Ponieważ reakcja jest szybka stężenie deuteronu w gwiazdach jest bardzo małe. Następnie następuje znowu szybka reakcja:
- ${}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2^1\text{H} + 12,86 \text{ MeV}$
- Sumarycznie
- $4^1\text{H} + \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 24,72 \text{ MeV}$

- Pozytony są natychmiast anihilowane
- $2e^+ + 2e^- \rightarrow 2,04\text{MeV}$
- Sumaryczny efekt 26,76 MeV
- Ok. 90 % energii słonecznej jest wytwarzana w tym cyklu
- W wyższych temperaturach zaczyna pojawiać się cykl Bethe`go-Weizsaeckera – katalizowana fuzja wodoru przez ^{12}C .

Cykl węglowy:



sumarycznie



(podobnie do cyklu wodorowego)

Spalanie He

Po wyczerpaniu wodoru następuje zapadanie się gwiazdy.

Jej wnętrze ogrzewa się do wyższej temperatury. Przy $T=10^8$ K następuje "spalanie" helu z utworzeniem jąder ^{12}C , ^{16}O i ^{20}Ne .



dalsze reakcje prowadzą do utworzenia jąder aż do ^{40}Ca .

• Spalanie węgla i tlenu

- $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{24}\text{Mg} + \gamma$
- $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{23}\text{Na} + \text{p}$
- $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + \alpha$ a dalej
- $^{20}\text{Ne} + \gamma \rightarrow ^{16}\text{O} + ^4\text{He}$

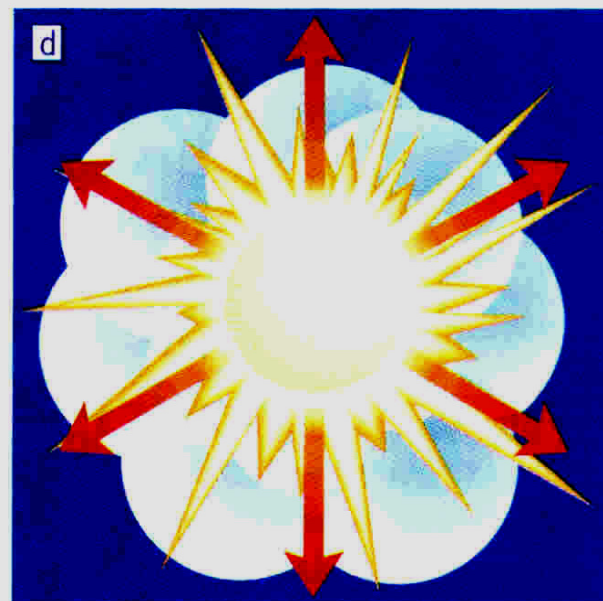
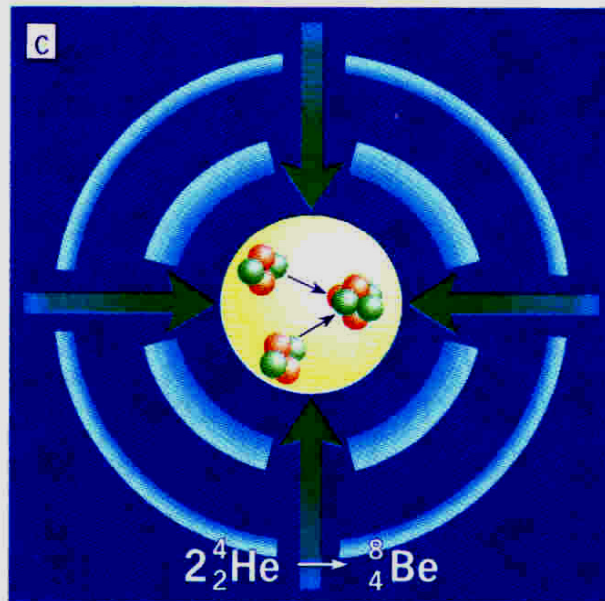
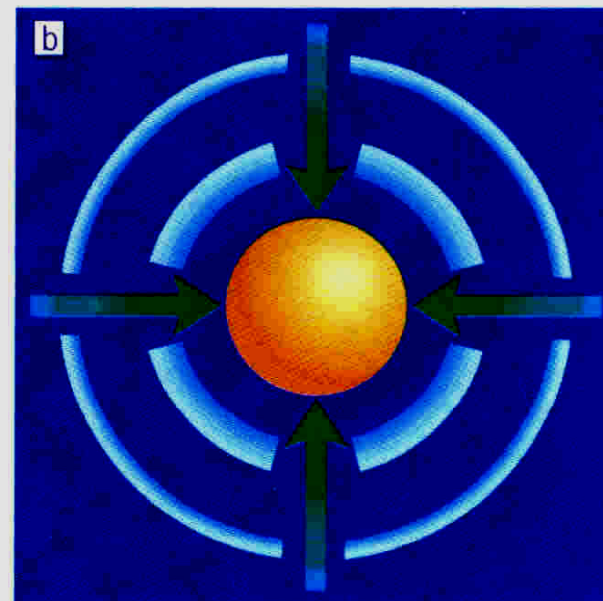
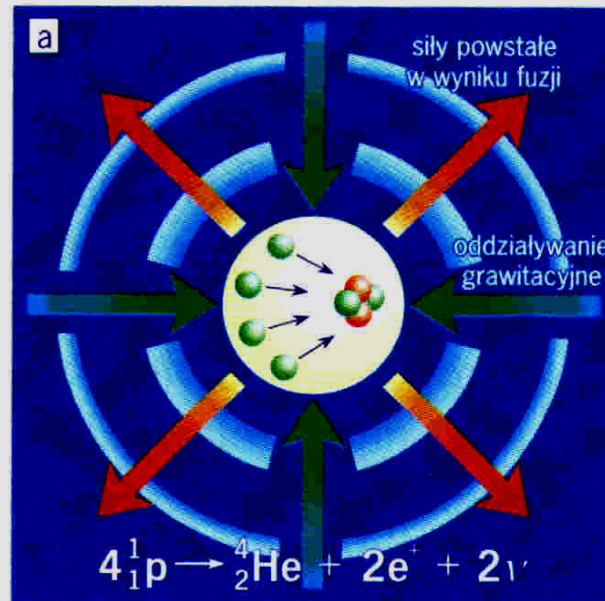
- $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{32}\text{S} + \gamma$

- $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{31}\text{S} + \text{n}$

- $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Si} + ^4\text{He}$

- $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{31}\text{P} + \text{p}$
- Następują dalsze wychwyty α i powstają jądra z okolicy żelaza

- W gwiazdach zachodzi dalsza synteza pierwiastków poprzez reakcje (n, g).
- $^{56}\text{Fe}(n,\gamma)^{57}\text{Fe}(n,\gamma)^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe} \rightarrow ^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}$
- W normalnych gwiazdach mogą się wytworzyć nuklidy aż do ^{209}Bi .
- Po bizmucie mamy szereg pierwiastków emiterów α o krótkim czasie połowicznego rozpadu (Po, At, Rn, Fr) i rozpad α jest szybszy niż wychwyty neutronu.
- Gdy gwiazda wypali się w jej skład wchodzi w zasadzie nuklidy z okolicy żelaza i trochę cięższych powstałych z wychwyty neutronów.



Zapadanie się gwiazdy



Wybuch supernowej

Group

	1											13	14	15	16	17	18	
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg	3 Sc	4 Ti	5 V	6 Cr	7 Mn	8 Fe	9 Co	10 Ni	11 Cu	12 Zn	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Unn	111	112	113	114	115	116	117	118

Periodic Table of Elements

by Tsigaridis Kostas

Lanthanides

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Actinides

90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

- **Siły grawitacyjne powodują wzrost gęstości do 10^{14} g cm⁻³ i temperatury do 10^9 K. W jądrze gwiazdy następuje reakcja:**



- **Reakcja trwa ok. 1 s i wyzwala ogromny strumień neutronów.**

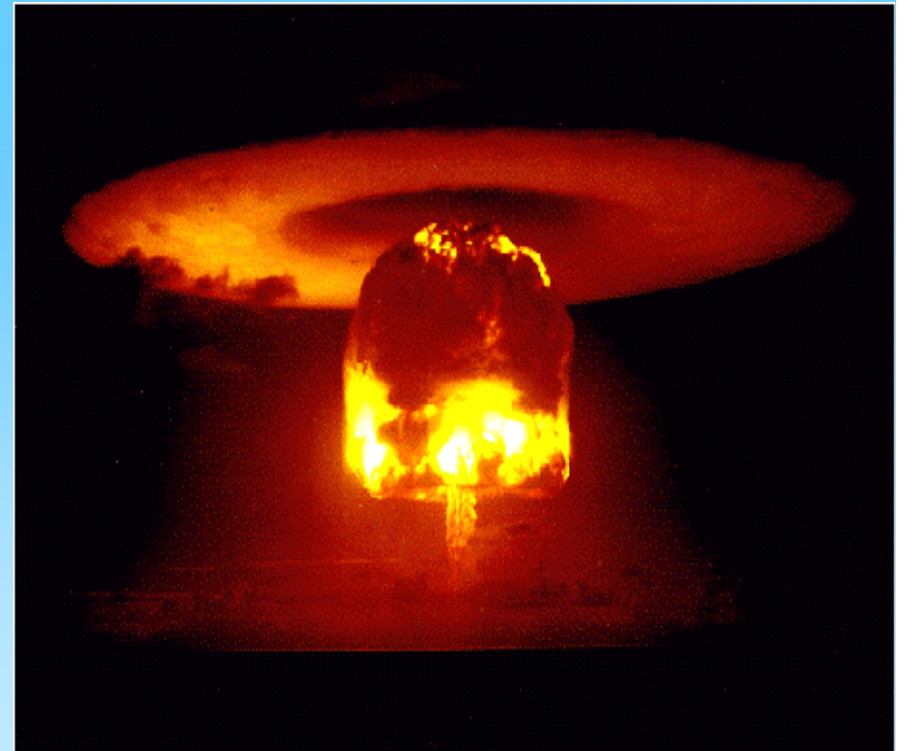
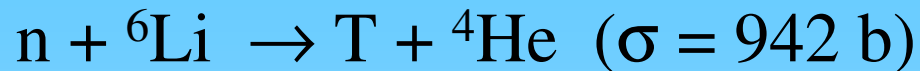
Atomy zewnętrznej warstwy gwiazdy pochłaniają duże ilości neutronów np. w reakcji:

- **$^{56}\text{Fe} + 118n \rightarrow ^{244}\text{Fe} \rightarrow ^{244}\text{Co} \rightarrow ^{244}\text{Ni}.. \rightarrow ^{244}\text{Pu}$ i uwalniają się do przestrzeni międzygwiazdnej**

Bron termojądrowa

Bomba wodorowa (termojądrowa) zawiera ładunek jądrowy (^{235}U) jako zapalnik oraz D, T i Li.

Wybuch bomby zaczyna się od detonacji konwencjonalnego ładunku, który inicjuje wybuch rozszczepienie ^{235}U . Gdy temperatura osiągnie 10^7 K następuje łańcuch reakcji syntezy

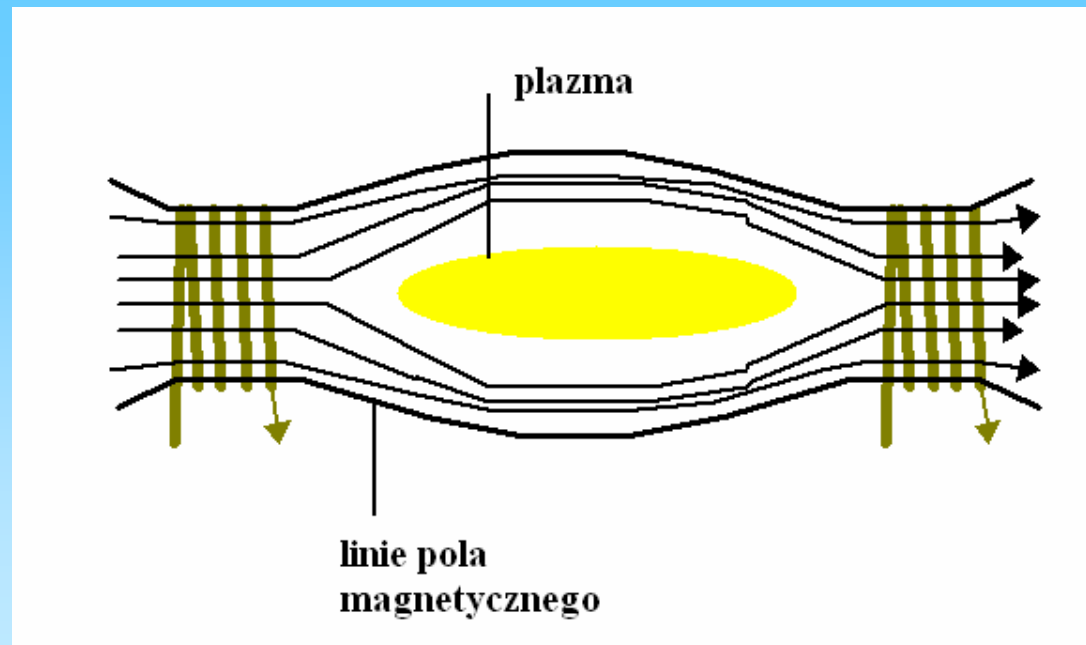


Kontrolowana fuzja jądrowa

Takie reakcje mogą być także źródłem kontrolowanej syntezy termojądrowej.

Dwa czynniki warunkują możliwość przeprowadzenia kontrolowanej fuzji termojądrowej. Temperatura cząstek musi być większa od 10^8 K, oraz muszą być zamknięte substraty reakcji.

Do zamykania plazmy planuje się zastosować pole elektromagnetyczne. Energia do przeprowadzenia reakcji może być dostarczana wiązką laserową, lub wiązką elektronów z akceleratora.



Zimna synteza - mionowa

Miony, m^- i m^+ są cząstkami elementarnymi o masie 207
większej od elektrony. W cząsteczce **D(μ^-)D** mogą
powodować zbliżenie jader deuteru i zajście reakcji:



albo

