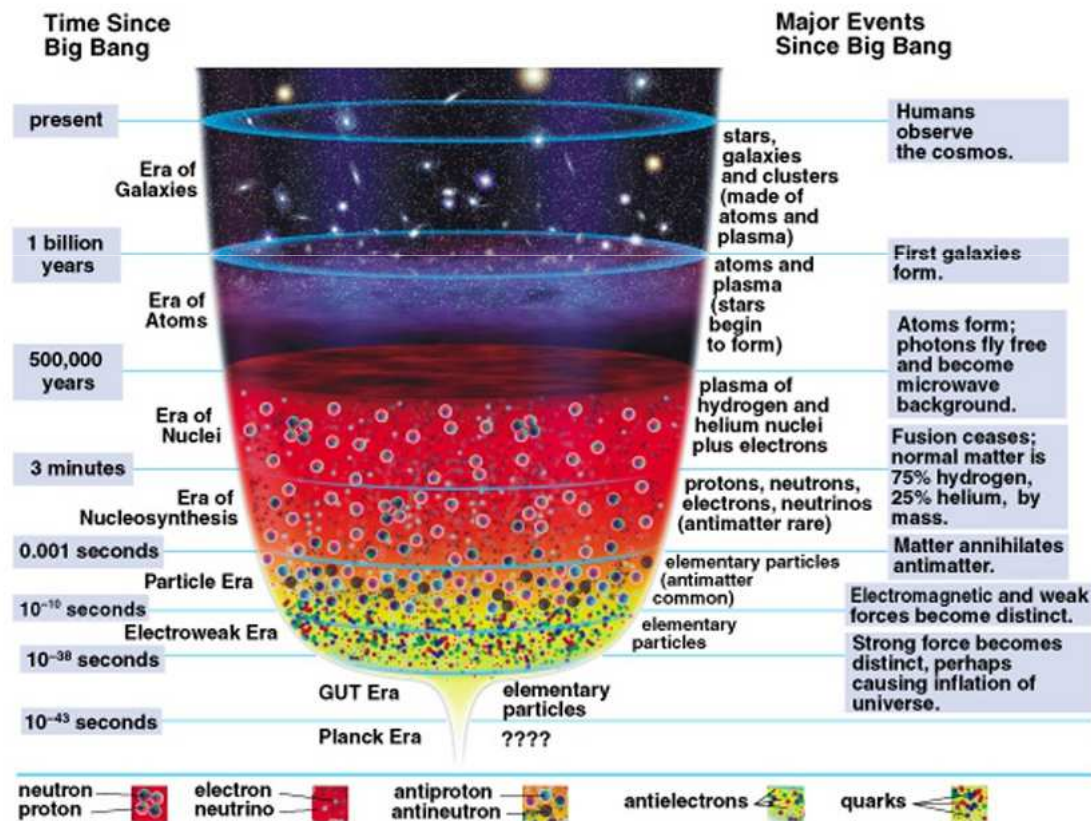


Nukleosynteza (w zarysie)

Nukleosynteza pierwotna (BBN)

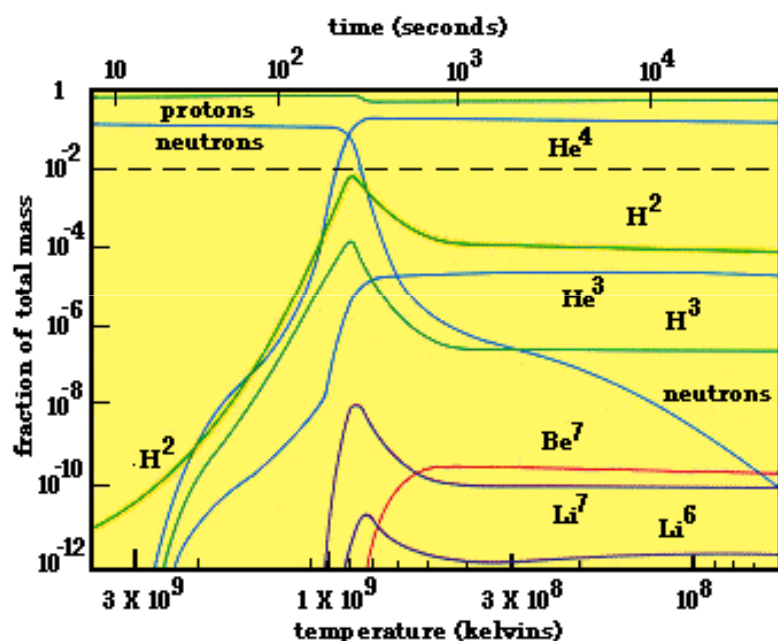
W Wielkim Wybuchu powstała materia o wielkiej gęstości i temperaturze.

W wyniku rozszerzania się Wszechświata, temperatura i gęstość malała.

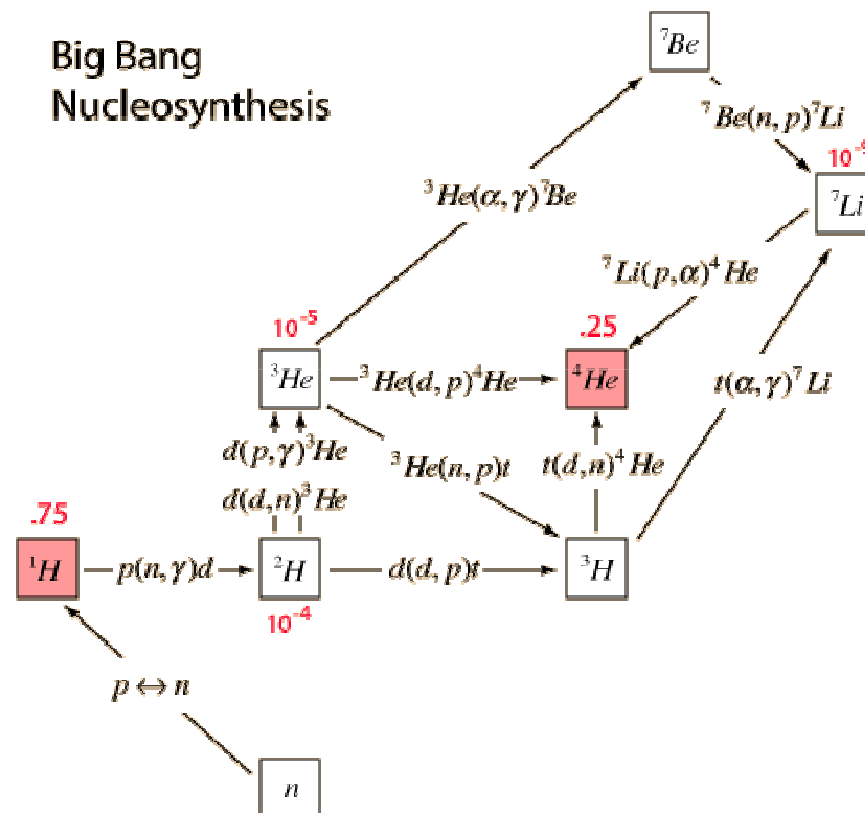


Copyright © Addison Wesley.

- Deuter jest bardzo słabo związany ($B = 2.225 \text{ MeV}$) i gdy temperatura jest zbyt wysoka, ulega fotodysocjacji. Dopiero po ok. 100 s, gdy temperatura spadła do 0.1 MeV ($\approx 1.2 \cdot 10^9 \text{ K}$) zaczyna się tworzenie deuteru, co umożliwia dalsze reakcje syntezy lekkich jąder.



Big Bang Nucleosynthesis



Wyniki obliczeń pierwotnej nukleosyntezy zależą zasadniczo od liczby rodzajów neutrin oraz od stosunku liczby barionów do fotonów, który jest stały w trakcie ewolucji Wszechświata (od czasu anihilacji antycząstek).

Przewidywania modelu (przy założeniu 3 rodzajów neutrin) można porównać z obserwowanym rozpowszechnieniem pierwiastków. Otrzymuje się spójny obraz składu lekkich pierwiastków, co jest wielkim sukcesem teorii WW.

Obserwowane rozpowszechnienie:

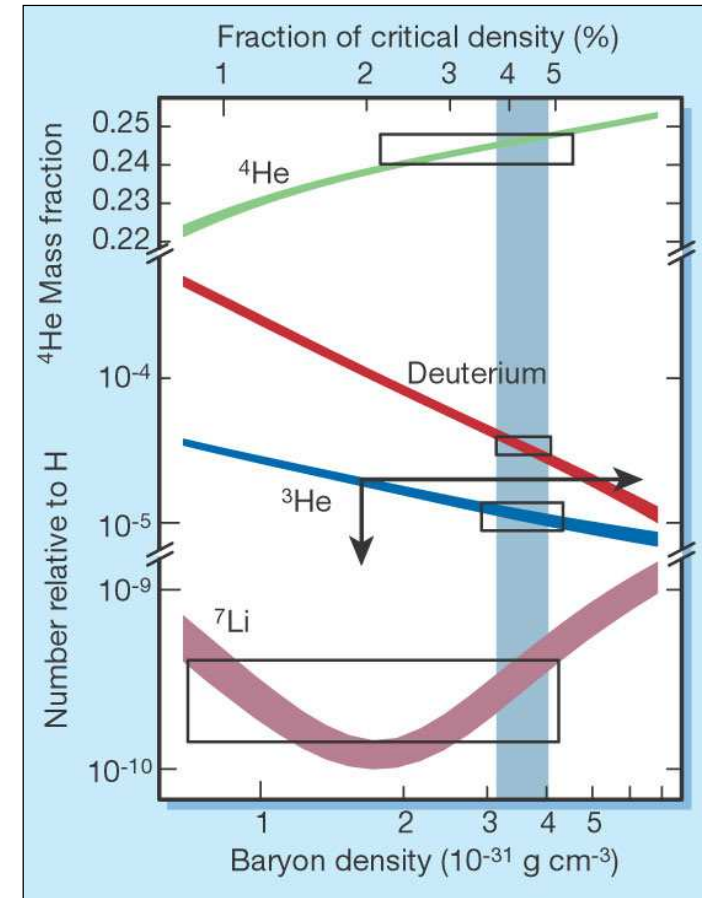
${}^1_1\text{H}_0$	wodór (protony)	N_i/N_{H}
${}^2_1\text{H}_1$	deuter	3×10^{-5}
${}^3_2\text{He}_1$	hel 3	1×10^{-5}
${}^4_2\text{He}_2$	hel 4	0.08
${}^7_3\text{Li}_4$	lit 7	2×10^{-10}

→ Pierwotna materia składa się praktycznie tylko z wodoru i helu.

Zgodność z obserwacjami uzyskuje się dla:

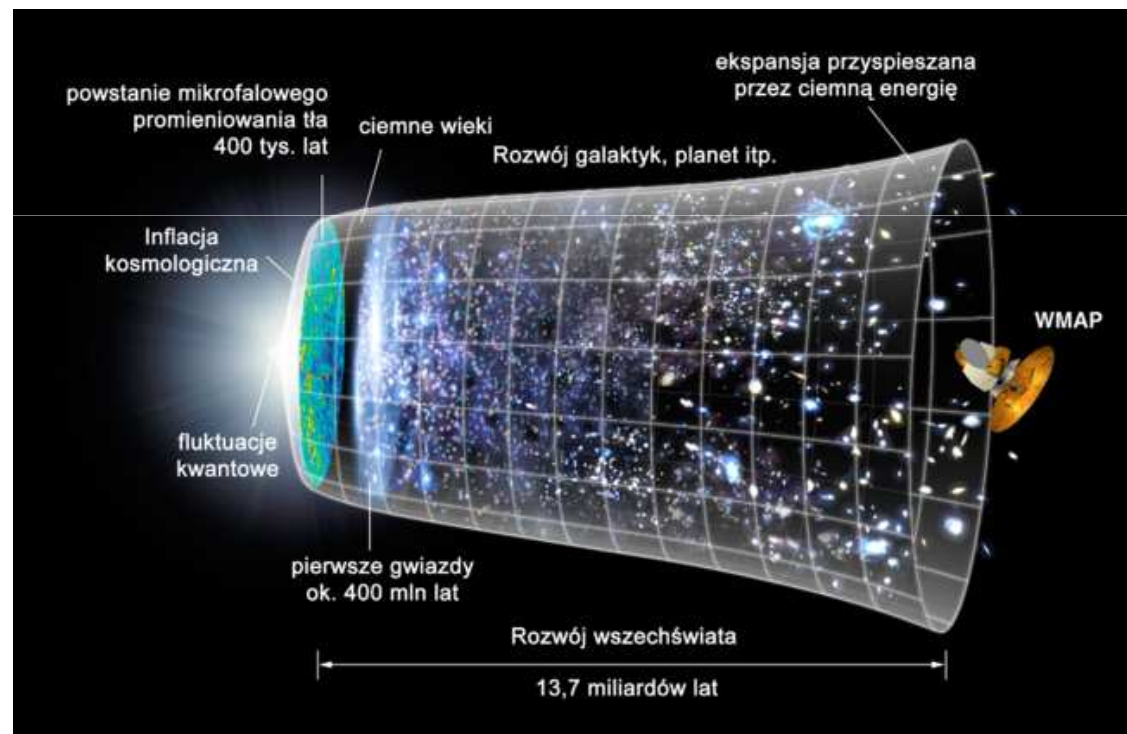
$$5.7 \times 10^{-10} < \eta < 6.7 \times 10^{-10}$$

gdzie η jest stosunkiem liczby barionów do fotonów. Przez porównanie z widmem mikrofalowego promieniowania tła można z tego wyznaczyć obecną gęstość barionów.

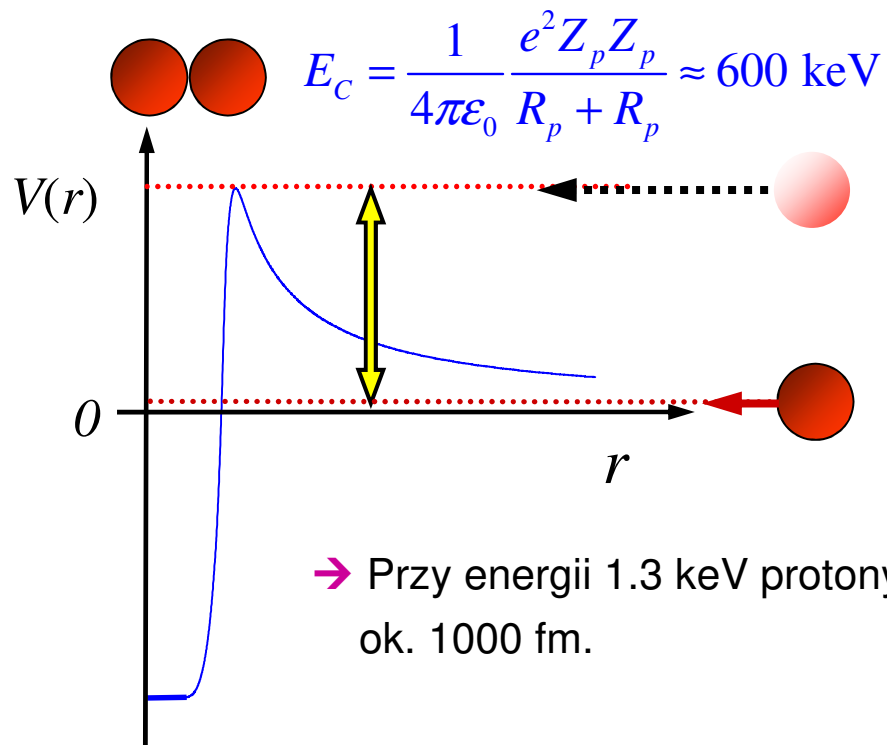


Spalanie wodoru

Kolejny etap nukleosyntezy może zajść dopiero po utworzeniu się pierwszych gwiazd, we wnętrzu których jest wystarczająca temperatura do zachodzenia reakcji termojądrowych. Pierwsze gwiazdy, zbudowane praktycznie tylko z wodoru i helu pojawiły się ok. 400 mln lat po Wielkim Wybuchu.



- W gwiazdzie takiej jak Słońce spalanie wodoru odbywa się głównie w cyklu p-p, o którym wspomnieliśmy przy okazji neutrin słonecznych. Kluczowym krokiem w tym cyklu jest pierwsza reakcja: fuzja dwóch protonów. Przyjrzyjmy się bliżej tej reakcji.
- Aby zetknąć dwa protony, należy pokonać odpychanie między ich ładunkami, co odpowiada energii ruchu względnego równej ok. 600 keV.

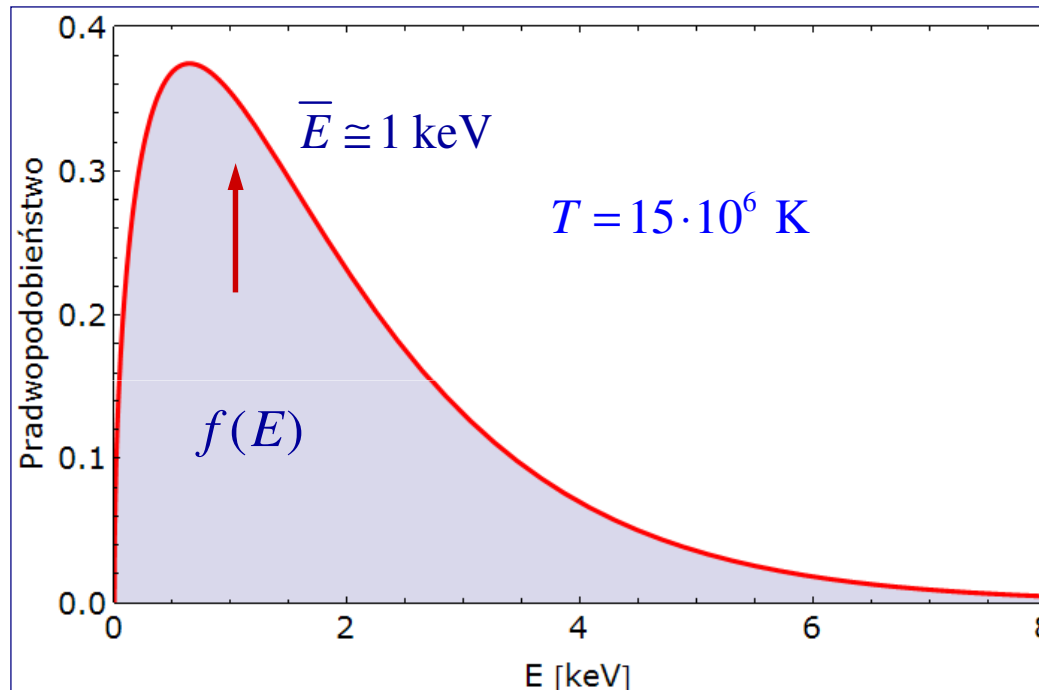


- Temperatura w centrum Słońca wynosi ok. 15 mln K
Średnia energia protonów jest wtedy:

$$\overline{E} \cong kT = 8.62 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}} \times 15 \cdot 10^6 \text{ K} = 1.3 \text{ keV}$$

- Przy energii 1.3 keV protony zbliżą się co najwyżej na odległość ok. 1000 fm.

- Przy ustalonej temperaturze cząstki mają różne prędkości, opisane rozkładem Maxwella-Boltzmann. Część z nich ma energie dużo większe od średniej wartości równej kT !



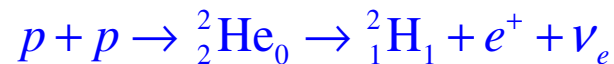
- Prawdopodobieństwo, że w temperaturze 15 mln stopni cząstka ma energię większą niż 600 keV wynosi:

$$\int_{600 \text{ keV}}^{\infty} f(E) dE \cong 10^{-200}$$

W całym Słońcu jest ok. 10^{57} protonów

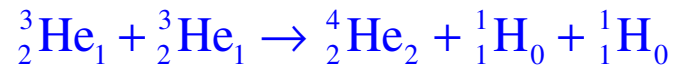
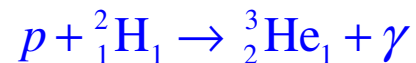
- Aby w tych warunkach protony mogły się zetknąć konieczne jest kwantowe tunelowanie przez barierę potencjału. Prawdopodobieństwo tego jest bardzo małe, rzędu $P_{\text{tunel.}} \cong 10^{-7}$

- Jedyne układy dwóch nukleonów związane siłami jądrowymi, to **deuteron** (^2H lub d). czyli układ składający się z protonu i neutronu. Synteza dwóch protonów wymaga więc nie tylko sukcesu w kwantowym tunelowaniu, ale jeszcze oddziaływań słabych:

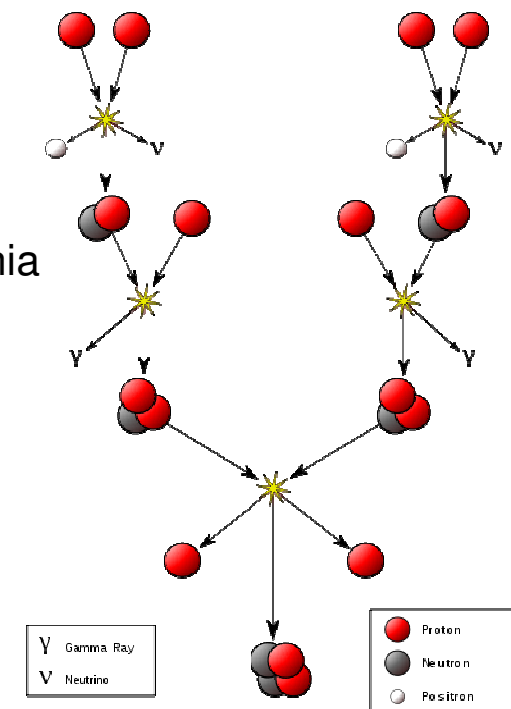


- ➔ Gdybyśmy w laboratorium bombardowali tarczę z wodoru o grubości 10^{23} at./cm^2 wiązką protonów o natężeniu 1 mA ($6 \cdot 10^{15} \text{ 1/s}$), to na jeden akt wytworzenia deuteronu musielibyśmy czekać (średnio!) **milion lat**!

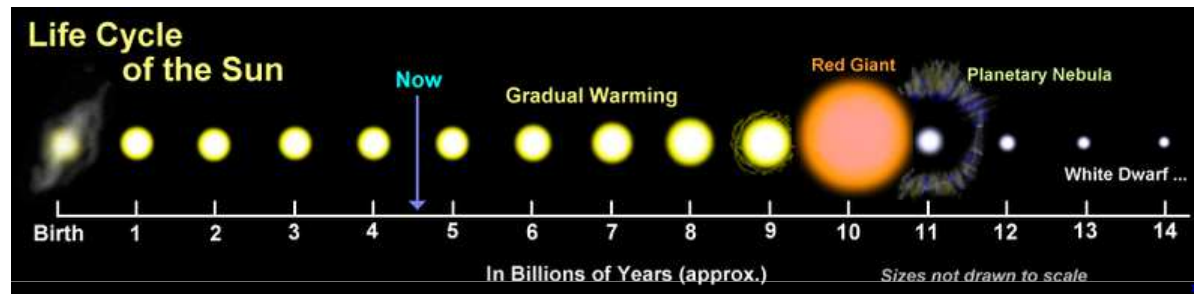
- Po utworzeniu deuteronu, mogą zajść następujące reakcje:



w wyniku których początkowe cztery jądra wodoru (protony) tworzą jedno jądro helu-4 (cząstkę α).
Wydziela się przy tym energia 26.7 MeV .



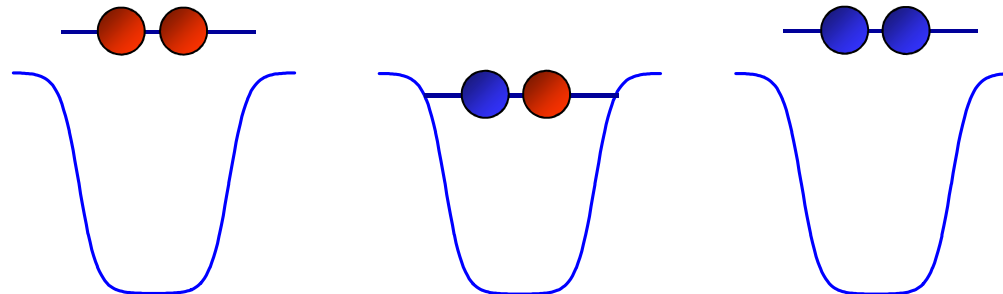
- Średni czas, po jakim proton utworzy deuteron, w gwiazdzie takiej jak Słońce, wynosi ok. 10^{10} lat
- Słońce spala w każdej sekundzie tylko 600 mln ton wodoru, co wystarcza na ok. 10^{10} lat świecenia. Jesteśmy właśnie w połowie tego okresu.



→ Warto zauważyć, że:

- gdyby siły jądrowe były o **kilka procent słabsze**, deuteron nie byłby związany!
- gdyby siły jądrowe były o **kilka procent silniejsze**, dwa protony byłyby związane!

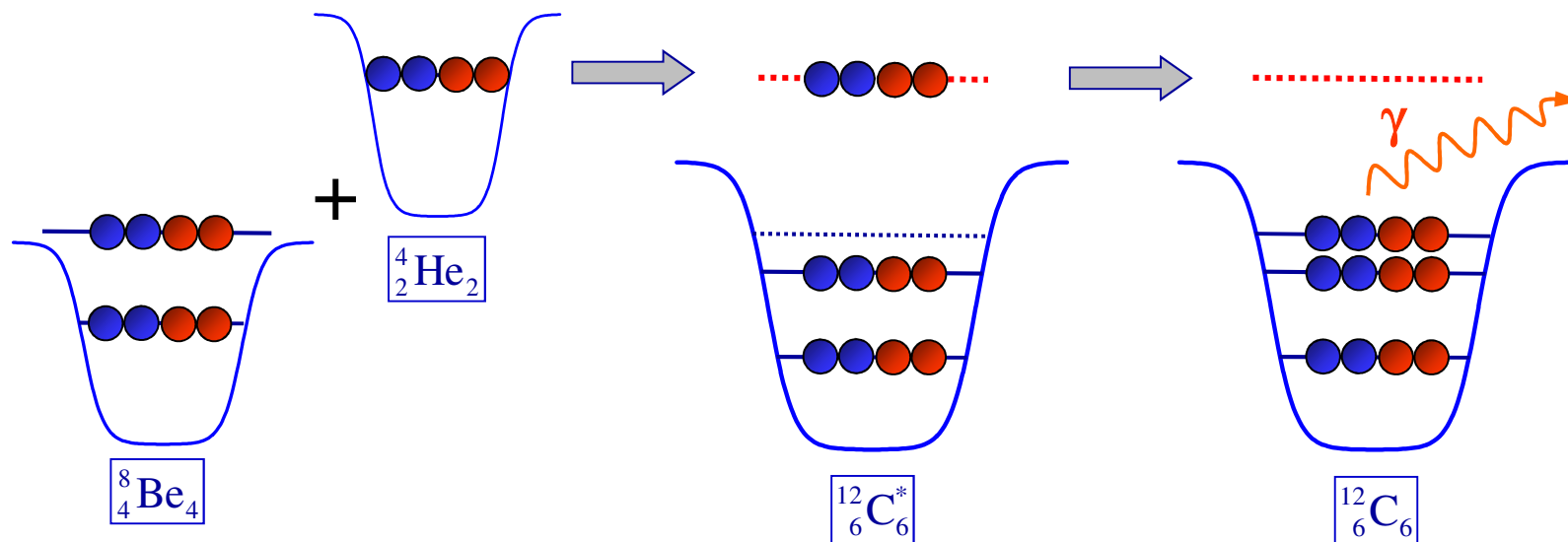
W obydwu przypadkach gwiazdy takie jak Słońce nie mogłyby istnieć!



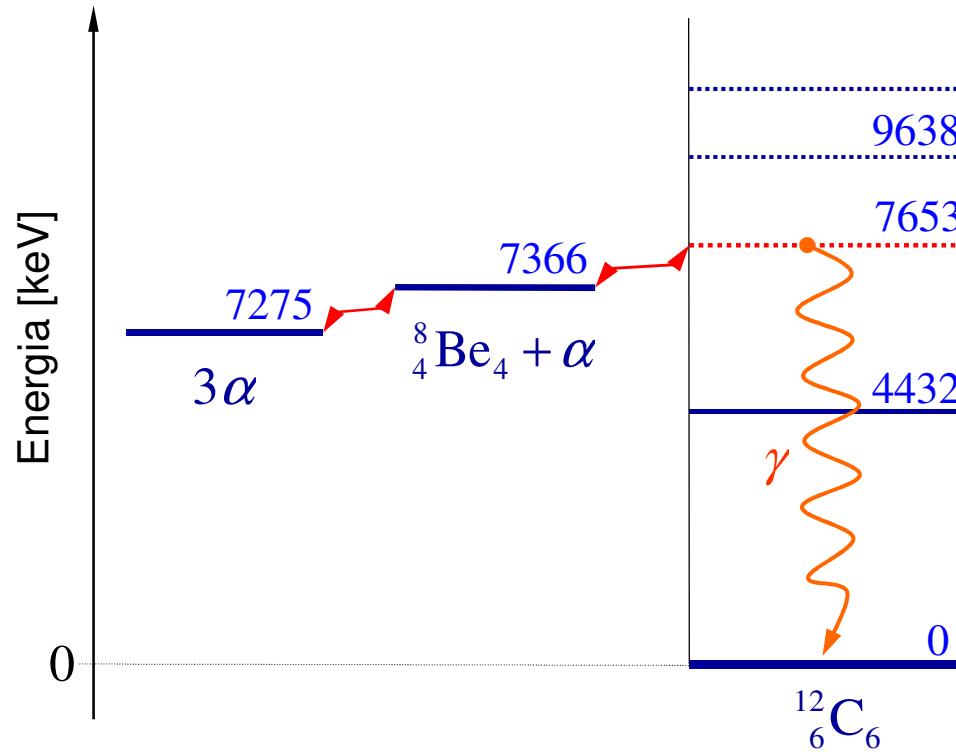
Spalanie helu

- W dalszym przebiegu nukleosyntezy napotykamy na problem, ponieważ nie ma trwałych jąder o $A=5$ i $A=8$. Synteza węgla zachodzi w sposób niezwykle.

Jądro ${}^8\text{Be}$ jest bardzo nietrwałe, ale może istnieć przez ok. 10^{-16} s zanim rozleci się na dwa jądra ${}^4\text{He}$ (cząstki α). W tym krótkim czasie *może dołączyć się trzecia cząstka α* ! Powstaje *wzbudzone jądro węgla* ${}^{12}\text{C}$, które może przejść do stanu trwałego emitując foton promieniowania γ . Jest to tzw. **potrójny proces α** .



- Reakcja ta może zachodzić we wnętrzu dużej gwiazdy, gdzie temperatura przekracza 100 mln. stopni. Jest ona dostatecznie wydajna, ponieważ w ^{12}C istnieje stan 0^+ o odpowiedniej energii, przez co proces ma charakter rezonansowy.

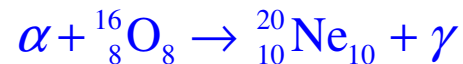


← **stan Hoyle**

Samo istnienie tego stanu, oraz jego własności przewidział **Fred Hoyle**. Był to jedyny rozsądny sposób wyjaśnienia, jak węgiel powstał we Wszechświecie!

- ➔ Gdyby natężenie sił jądrowych było **o ułamek procenta inne**, energia stanu Hoyle zmieniłaby się tak, że udaremniło by to wydajną produkcję węgla. **Życie nie mogłoby wtedy powstać!**

→ Gdy mamy już węgiel, mogą zachodzić następne reakcje:

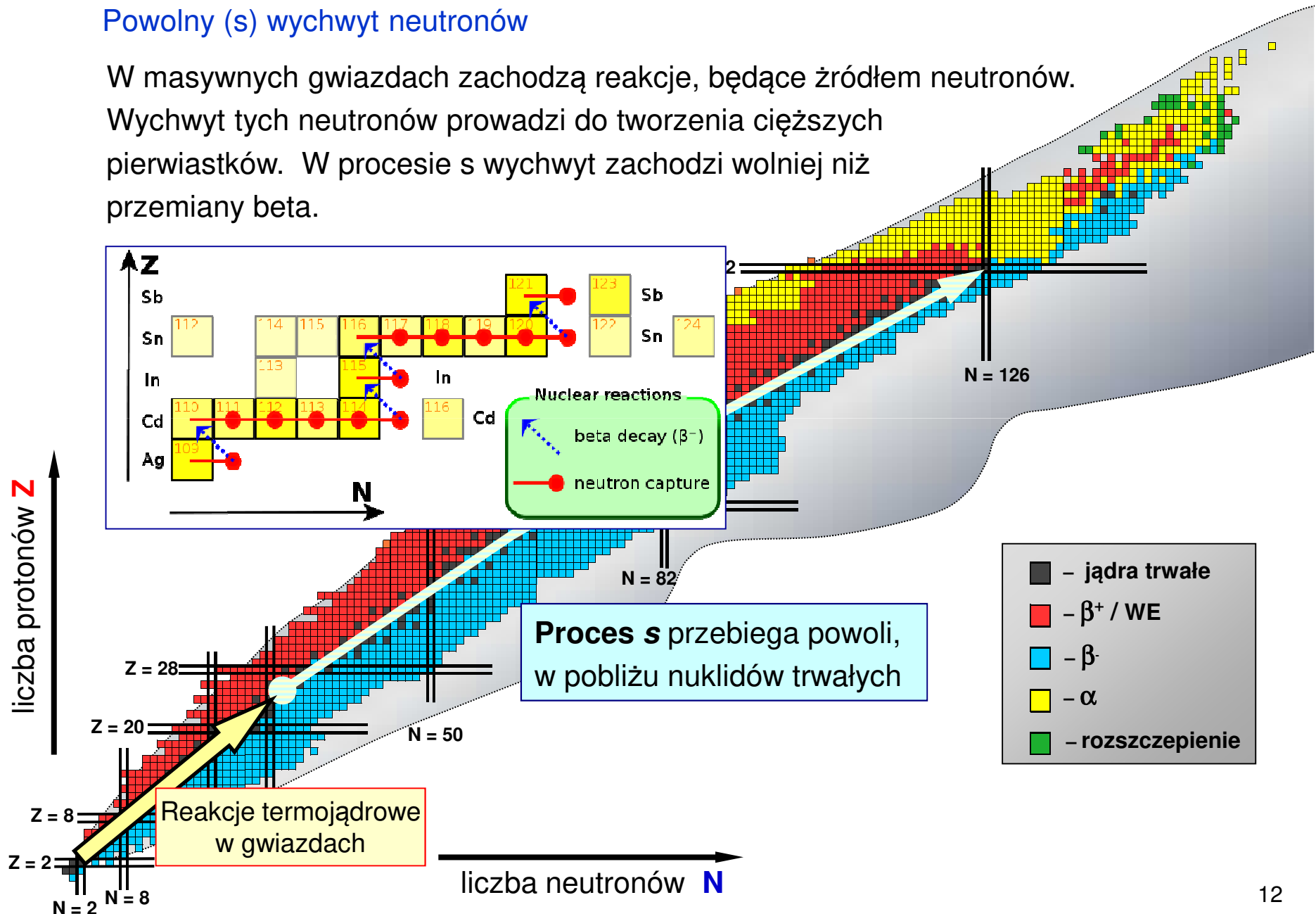


Jeśli pierwsza z tych reakcji miałaby rezonansowy charakter, jak wytwarzanie węgla, to cały węgiel zostałby zamieniony w tlen! Na szczęście tak nie jest i dzięki temu mamy w świecie dostatecznie dużo i węgla i tlenu.

- W końcowych etapach życia bardzo masywnych gwiazd, po wypaleniu się helu, mogą zachodzić reakcje syntezy jeszcze cięższych jąder. Końcowymi produktami szeregu takich reakcji są najsilniej związane jądra ${}^{56}\text{Ni}$, ${}^{56}\text{Co}$, ${}^{56}\text{Fe}$. Synteza cięższych jąder przestaje być energetycznie korzystna.
- Za wytworzenie pierwiastków cięższych od żelaza odpowiedzialne są inne procesy astrofizyczne. Najważniejsze z nich to powolny i szybki wychwyt neutronów.

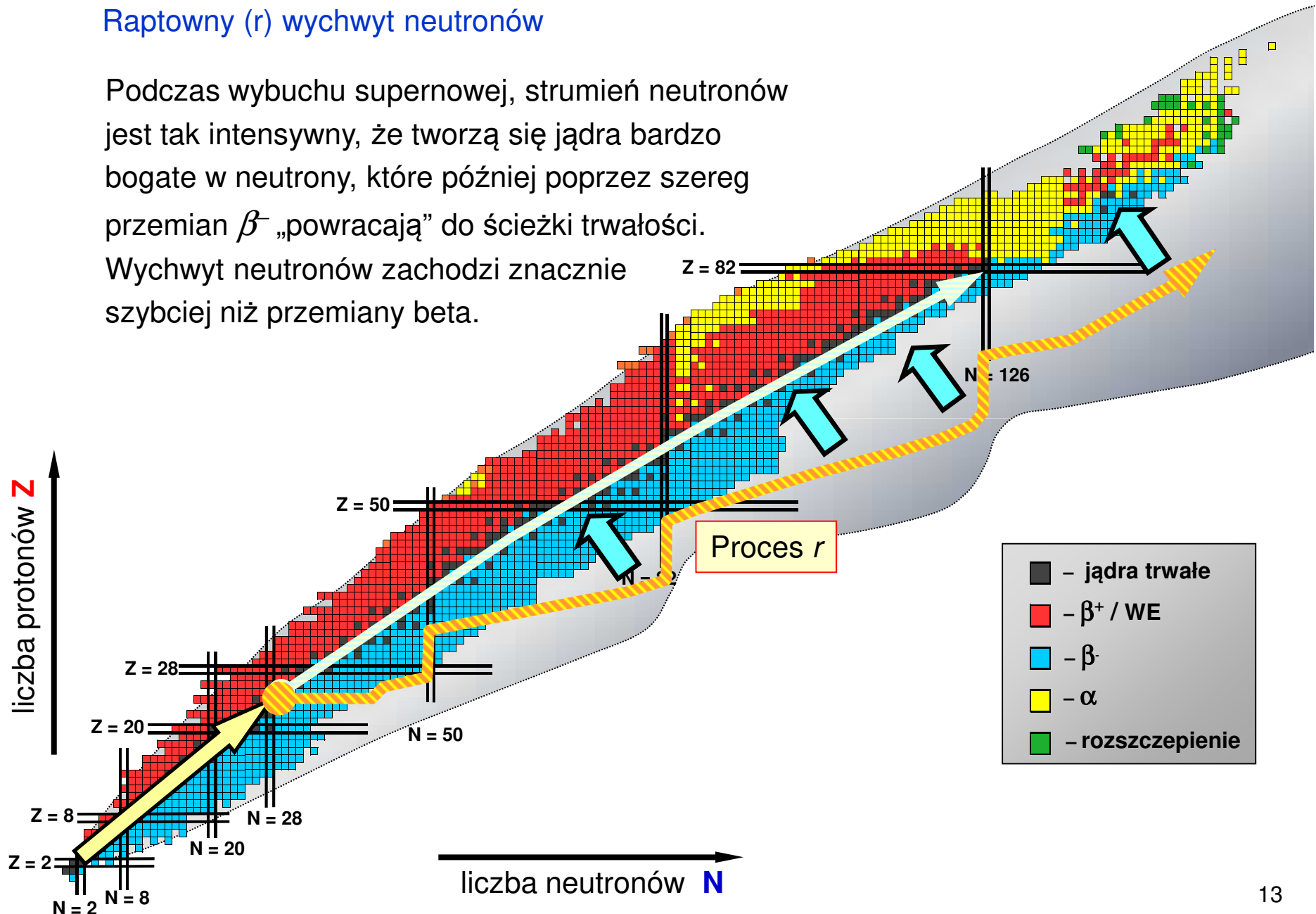
Powolny (s) wychwyt neutronów

W masywnych gwiazdach zachodzą reakcje, będące źródłem neutronów. Wychwyt tych neutronów prowadzi do tworzenia cięższych pierwiastków. W procesie s wychwyt zachodzi wolniej niż przemiany beta.

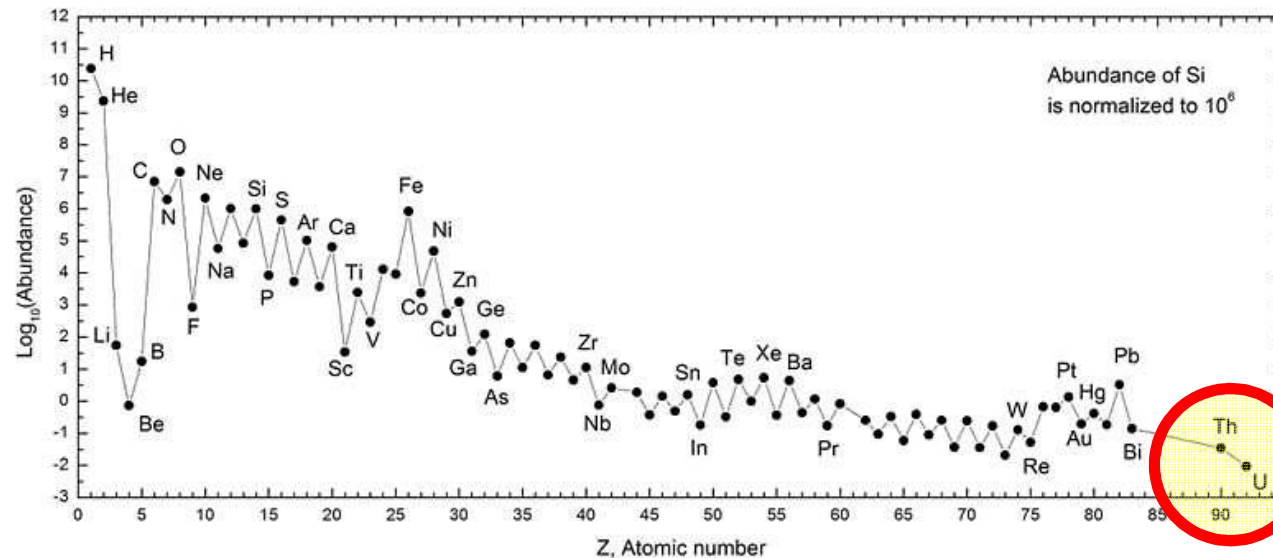


Raptowny (r) wychwyt neutronów

Podczas wybuchu supernowej, strumień neutronów jest tak intensywny, że tworzą się jądra bardzo bogate w neutrony, które później poprzez szereg przemian β^- „powracają” do ścieżki trwałości. Wychwyt neutronów zachodzi znacznie szybciej niż przemiany beta.



- Wybuchy supernowych rozrzucają wzbogaconą materię w przestrzeni kosmicznej. Z materii tej tworzą się gwiazdy następnej generacji. Krzywa rozpowszechnienia pierwiastków w Układzie Słonecznym wskazuje na to, że Słońce jest gwiazdą co najmniej drugiej generacji.



Radionuklidy obecne na Ziemi

Izotop	$T_{1/2}$ [mld lat]
^{232}Th	14
^{238}U	4.5
^{40}K	1.3
^{235}U	0.7

- ➔ Na Ziemi dogasają jeszcze długożyciowe resztki promieniotwórczych nuklidów, które powstały razem z całą materią planetarną. To one pozwoliły nam odkryć świat zjawisk subatomowych. Dzięki nim wiemy, że Układ Słoneczny powstał ok. 4.5 mld lat temu. One są ważnym źródłem ciepła we wnętrzu Ziemi, które poprzez konwekcję w płaszczu Ziemi napędza ruchy tektoniczne i kształtuje powierzchnię naszej planety.