

Potrójny proces alfa. Z trzech jąder helu (cząsteczki alfa) mających po dwa protony (na szaro) i po dwa neutrony (na czerwono) powstaje jądro węgla. W tym procesie są uwalniane wysokoenergetyczne fotony (γ)

powstaje jedynie jądro bardzo niestabilnego berylu-8, które musi natychmiast zostać zaopatrzone w trzecie jądro helu. Ten tak zwany potrójny proces α (\downarrow) jest jak ucho igielne, które należy pokonać podczas syntezy ciężkich jąder atomowych. Wystarczająca gęstość i temperatura do takich procesów występuje dopiero w mocno skompresowanych wnętrzach gwiazd.

Synteza helu w węgiel dostarcza na dane jądro węgla znacznie mniej energii niż synteza wodoru w hel, przez co to źródło energii dużo szybciej się wyczerpuje. Część energii można pozyskać także poprzez syntezę węgla-12 i helu-4 w tlen-16, lecz takie gwiazdy jak nasze Słońce nie mają wystarczającej masy, aby stworzyć jeszcze wyższe gęstości i temperatury w swoim wnętrzu, które byłyby potrzebne do zainicjowania kolejnych procesów syntezy. Podczas ostatnich faz „spalania”, gwiazdy te rosną



Gwiazdozbiór Oriona. Rigel jest widoczny jako jasna, niebieska gwiazda w prawym dolnym rogu, a Betelgeza – jako czerwona gwiazda w lewym górnym rogu. Obie te gwiazdy są olbrzymami mającymi ponad dziesięciokrotnie większą masę niż Słońce

do stadium czerwonego olbrzyma i ostatecznie wyrzucają w kosmos swoje zewnętrzne powłoki, które przez kilka tysięcy lat tworzą przepiękne mgławice planetarne, podczas gdy wypalony, mocno skoncentrowany rdzeń gwiazdy tworzy białego karła wielkości Ziemi.

W powłokach czerwonych olbrzymów zachodzi jednak jeszcze jeden proces, w wyniku którego mogą powstawać pierwiastki ciężkie – jest to *powolny wychwyt neutronów* (proces s). W jego trakcie pojedyncze wolne neutrony przyłączają się do jąder atomowych, które następnie stopniowo przekształcają się w coraz cięższe izotopy lub, jeśli nowe jądro jest niestabilne, tworzą poprzez rozpad beta kolejny pierwiastek w układzie okresowym. W ten sposób umierające, ubogie w masę gwiazdy mogą tworzyć różne pierwiastki aż po ołów.

Gwiazdom o dużej masie, takim jak Betelgeza, udaje się jeszcze dokonać zapłonu kolejnych procesów fuzji, podczas których powstają coraz cięższe pierwiastki. Lecz najpóźniej przy żelazie synteza ta zostaje ostatecznie zatrzymana, ponieważ od tego bardzo stabilnego jądra atomowego nie można już uzyskać żadnej energii.

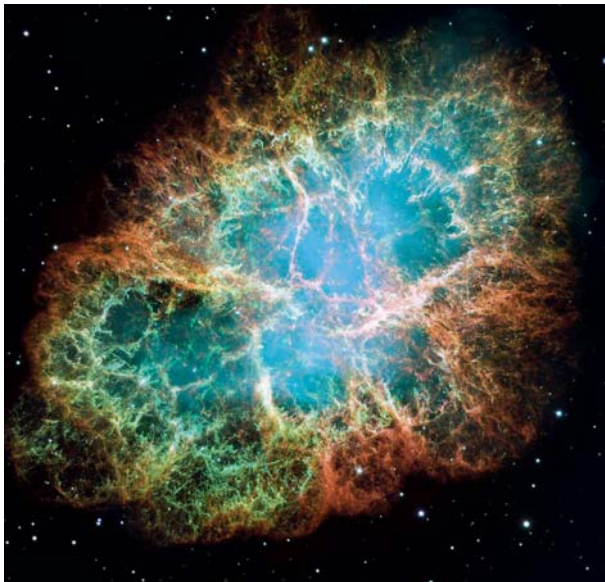


Supernowe

Czyli pierwiastki powstają przez eksplozję

Co, jeśli gwiazdzie skończy się paliwo na dalsze reakcje syntezy? Jaka siła stabilizuje wówczas wypalony rdzeń gwiazdy wobec ogromnych sił grawitacji? Siły te są przecież ponad sto tysięcy razy silniejsze niż na powierzchni Ziemi.

W przypadku stosunkowo lekkich gwiazd takich, jak nasze Słońce, tak zwane *ciśnienie degeneracji* elektronów chroni białe karły przed zapadnięciem się. To silne ciśnienie przeciwstawne ma swoje początki w kwantowo-mechanicznej regule Pauliego (zakazie Pauliego), zgodnie z którą elektrony starają się zbyt-
nio do siebie nie zbliżać – reguła ta odpowiada również za strukturę budowy powłok atomowych.



W przypadku gwiazd o znacznie większej masie niż Słońce, ciśnienie degeneracji nie jest jednak wystarczające. Gdy skończy się paliwo w mocno skoncentrowanym żelaznym wnętrzu, nie istnieje nic, co mogłoby uchronić go przed zapadnięciem się. W ciągu ułamka sekundy centrum gwiazdy zapada się, a elektrony z plazmy zostają wepchnięte w protony jąder atomowych. Te przemieniają się wówczas w neutrony, jednocześnie wysyłając błysk składający się z neutrin. Z rdzenia gwiazdy wielkości Ziemi powstaje wówczas gwiazda neutronowa – taka kula o średnicy tylko 20 km zawiera więcej masy niż całe Słońce. Kwantowo-mechaniczne ciśnienie degeneracji neutronów stabilizuje gwiazdę neutronową maksymalnie do masy równej dwóch lub trzech mas Słońca. Jeśli gwiazda stanie się cięższa, zapada się, tworząc czarną dziurę.

Przez zapadnięcie się wnętrza gwiazdy, pozostała gwiazdna materia traci w oka mgnienia całe oparcie. Zapada się do wnętrza i odbija od gwiazdy neutronowej, przez co powstają bardzo gorące fronty fali uderzeniowej skierowane do powierzchni gwiazdy. Fronty te są dodatkowo podgrzewane przez błysk neutrin, przez co materia gwiazdy w pobliżu wnętrza jest tak gęsta, że nawet „cząstki-duchy” nie mogą się z niej wydostać. Dopiero po kilku godzinach fala

Mgławica Kraba jest pozostałością supernowej implozyjnej, w której centrum do dzisiaj pulsuje gwiazda neutronowa. Żółtopomarańczowe obszary składają się głównie z wodoru i helu, niebieskie obszary zawierają obojętny tlen, a zielone – zjonizowaną siarkę i podwójnie zjonizowany tlen. W mgławicy tej wykazano również śladowe ilości azotu, żelaza i neonu