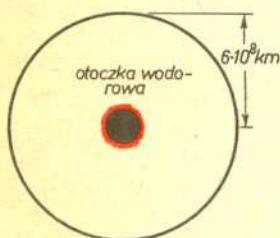
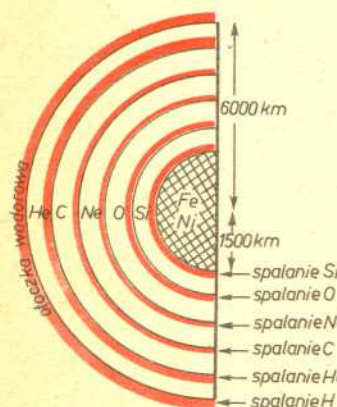


Kosmiczne superwybuchy

Doc. dr Paweł HAENSEL



Rys. 1. Czerwony nadolbrzym o masie $15 M_{\odot}$ ma promień $6 \cdot 10^8$ km. Składa się z rzadkiej otoczki wodorowej oraz rdzenia zbudowanego z produktów syntezy termojądrowej. Palenie wodoru odbywa się na brzegu rdzenia. W rzeczywistości promień rdzenia stanowi 10^{-5} promienia otoczki.



Rys. 2. Struktura rdzenia czerwonego nadolbrzyma w okresie bezpośrednio poprzedzającym implozję.

Pokryte gwiazdami nocne niebo jest symbolem spokoju. Jednak ewolucja gwiazd, mówiąc obrazowo: ich życie, zawiera czasem momenty, które śmiało można nazwać dramatycznymi. Życie gwiazdy to nieustanne zmaganie między siłami grawitacji dążącymi do ściśnięcia kuli gazowej, jaką jest gwiazda, do jak najmniejszej objętości oraz ciśnienia, które przeciwstawiając się siłom grawitacji dąży do zwiększenia objętości i promienia gwiazdy. Spokojne życie gwiazdy to efekt równowagi między tymi dwiema przeciwstawnymi siłami.

Badania astrofizyczne rozpoczęte w latach pięćdziesiątych i rozwijane w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych doprowadziły do wniosku, że okres, w którym gwiazda prowadzi spokojny żywot zachowując — w przybliżeniu — stałą jasność, a więc — jak mówimy — znajdując się na tzw. ciągu głównym cyklu ewolucyjnego, w istotny sposób zależy od jej masy.

Dobłą jednostką masy gwiazd jest masa naszego Słońca, oznaczana symbolem M_{\odot} . Wartość liczbową $M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{33}$ g. Jak wynika z badań teoretycznych, przeprowadzonych w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych, dla gwiazd masywnych — o masie większej niż około $8 M_{\odot}$, a mniejszej niż około $20 M_{\odot}$ — czas spokojnego życia na ciągu głównym jest rzędu 10^7 lat. Czas ten maleje wraz ze wzrostem masy. Gwiazdy masywne przebywają w stadium ciągu głównego tysiąc razy krócej niż gwiazdy takie jak nasze Słońce!

Rozważmy gwiazdę o masie $15 M_{\odot}$, której wiek liczony od momentu jej powstania z obłoku materii międzygwiazdnej (zakładamy, że materia ta składała się głównie z wodoru) wynosi 10^7 lat.

Przez 10 milionów lat świeciła ona z prawie niezmienną jasnością, czerpiąc energię z reakcji syntezy wodoru na hel. To spalanie termojądrowe zachodziło w rdzeniu gwiazdy, gdzie panowała temperatura ponad 10^7 K. Rośnie masa produktu reakcji syntezy, helu. Wodoru do spalania jest coraz mniej. Z powodu braku paliwa wodorowego spalanie w centrum gwiazdy w końcu ustaje. Wodór spalany jest już tylko na zewnętrznym brzegu jądra zbudowanego z helowego „popiołu”. Hel zgromadzony w rdzeniu gwiazdy nie może być spalany, gdyż do tego potrzebna jest temperatura około $1,5 \cdot 10^8$ K. Zahamowanie spalania wodoru narusza równowagę w centralnej części gwiazdy, gdzie w wyniku ustania procesu produkcji ciepła grawitacja zaczyna przeważać nad ciśnieniem. Rdzeń helowy zaczyna się kurczyć. W konsekwencji prowadzi to do jego zgęszczenia i ogrzania. W momencie, gdy temperatura w środku rdzenia osiągnie wartość $1,5 \cdot 10^8$ K, rozpoczyna się proces syntezy helu na węgiel, tlen i neon. Jak wykazały badania teoretyczne, kurczeniu się rdzenia helowego towarzyszy gwałtowne rozdymanie otoczki wodorowej. Gwiazda gwałtownie zwiększa blisko stokrotnie swój promień — do ponad 10^8 km. Dla porównania: promień Słońca wynosi $7 \cdot 10^5$ km, a odległość Ziemi od Słońca — $1,5 \cdot 10^8$ km. Słusznie więc gwiazdę taką nazywamy *nadolbrzymem*. Ponieważ barwa widzialnego promieniowania, emitowanego przez rozdętą wodorową otoczkę gwiazdy, jest czerwona, pełna nazwa nadana gwiazdom tej klasy brzmi: *czerwony nadolbrzym*. O dalszych losach gwiazdy decydują procesy zachodzące w jej rdzeniu. Proces kurczenia się jądra złożonego z produktów syntezy jądrowej — prowadzący do zagęszczenia i rozgrzania rdzenia gwiazdy i w konsekwencji do zapalenia „popiołu” — powtarza się kilka razy, aż do momentu, w którym „popiołem” będą jądra żelaza i niklu. Rosnący rdzeń żelazno-niklowy jest plazmą złożoną z jąder żelaza, niklu i elektronów; jego temperatura przekracza $3,5 \cdot 10^9$ K, gęstość zaś wynosi ponad 10^9 g/cm³. Gęstość jest rzeczywicie astronomiczna: 1 cm³ takiej plazmy ważyłby na Ziemi 100 ton! Schematyczny obraz struktury czerwonego nadolbrzyma na tym etapie życia gwiazdy przedstawiony jest na rysunkach 1 i 2. Materia, z której zbudowany jest rdzeń żelazno-niklowy, jest *zdegenerowana*: jej ciśnienie zależy tylko od gęstości elektronów w plazmie, a nie zależy od temperatury. Wraz z upływem czasu masa rdzenia żelazno-niklowego rośnie, wzrasta jego gęstość i temperatura. Zapalenie tej plazmy jest jednak niemożliwe. Plazma żelazno-niklowa to ostateczny produkt nukleosyntezy, bowiem jądra Fe i Ni mają największą energię wiązania ze wszystkich jąder atomowych. „Popiół” Fe-Ni nie może się zapalić, ponieważ wszelkie przemiany jąder Fe i Ni mają charakter endotermiczny. Równowaga rdzenia Fe-Ni zapewniona jest przez zrównoważenie gigantycznych sił grawitacji dążących do zmniejszenia promienia rdzenia i ciśnienia gazu zdegenerowanych elektronów w plazmie.

Rachunki teoretyczne wykazują, że w momencie, gdy masa rdzenia Fe-Ni wzrośnie do około $1,4 M_{\odot}$, temperatura w centrum gwiazdy osiągnie $7 \cdot 10^9$ K, gęstość zaś wyniesie $5 \cdot 10^9$ g/cm³ ($5 \cdot 10^9$ ton/cm³!). W tak wysokiej temperaturze rozpoczyna się *dysocjacja* jąder Fe i Ni na cząstki alfa (jądra helu) i neutrony. Reakcja jest endotermiczna:



w związku z tym prowadzi do obniżenia temperatury plazmy. Dysocjacja jednego jądra żelaza pochłania ponad 124 MeV. Po drugie, przy tak dużej gęstości możliwy jest tzw. odwrotny rozpad beta — *wychwyt elektronów* przez jądra żelaza i niklu. Symboliczny zapis reakcji wychwytu elektronów na jądro o liczbie atomowej Z i liczbie masowej A ma postać:



Każdemu wychwytowi towarzyszy więc zmniejszenie liczby protonów o jeden oraz emisja neutrina. Wychwyty elektronów prowadzą do zwiększenia liczby neutronów (*neutronizacja materii*) oraz do produkcji neutrin. Oba procesy: dysocjacja i wychwyt elektronów prowadzą do obniżenia ciśnienia plazmy. Narusza to delikatną równowagę między siłami grawitacji i ciśnienia: siły grawitacji zwyciężają i rdzeń Fe-Ni ulega gwałtownej *implozji*. W ciągu około 0,3 sekundy wewnętrzna część rdzenia zmniejsza swoje wymiary ponad 100-krotnie.

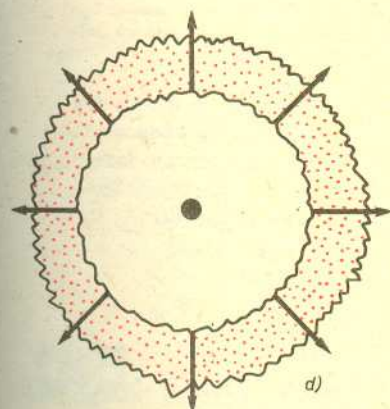
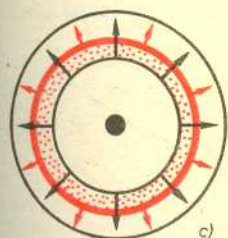
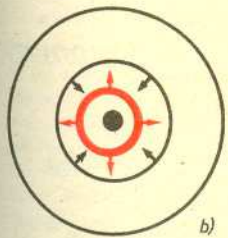
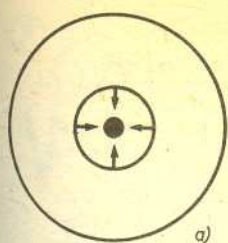
Zgęszczenie kurczącego się rdzenia i jego rozgrzanie prowadzi do całkowitej dysocjacji jąder Fe i Ni na nukleony. Elektrony supergęstej plazmy wychwytywane są na protonach w reakcji



w której wyniku powstaje ogromna ilość neutrin elektronowych. Wzrostowi gęstości aż do ponad 10^{14} g/cm³ towarzyszy ogrzanie do około 10^{11} K. Produkowane w wielkich ilościach neutrina są cząstkami bezmasowymi (o zerowej masie spoczynkowej) i w normalnych warunkach niezwykle słabo oddziałują z materią. Aby tę własność zilustrować, wystarczy wspomnieć, że średnia droga



Rozwiązanie zadania M 442. Niech X oznacza liczbę rzutów potrzebną do otrzymania orła. Rozpatrzmy sytuację po pierwszym rzucie. Z prawdopodobieństwem p otrzymaliśmy orła (wtedy $X = 1$) a z prawdopodobieństwem $1-p$ reszkę. W drugim przypadku średnio potrzeba $1+EX$ rzutów do zakończenia gry, jako że poszczególne rzuty są niezależne. Zatem $EX = p \cdot 1 + (1-p) \cdot (1+EX)$, stąd $p \cdot EX = 1$, czyli $EX = \frac{1}{p}$.



Rys. 3. Najważniejsze etapy wybuchu. Nie jest zachowana rzeczywista skala elementów rysunków.

- Po implozji rdzenia Fe-Ni (czarne kółko) spadają nań kolejne warstwy gwiazdy. Czarne kółko to protoplasta gwiazdy neutronowej.
- Po odbiciu od powierzchni zapadniętego rdzenia najbardziej wewnętrzne warstwy poruszają się na zewnątrz, zderzając się z opadającymi bardziej zewnętrznymi warstwami. Powstaje fala uderzeniowa, zaznaczona jako czerwony, rozszerzający się pierścień.
- Fala uderzeniowa pociąga za sobą kolejne warstwy otoczki.
- Rozszerzająca się otoczka tworzy świecąca mgławicę. Wewnątrz mgławicy znajduje się gwiazda neutronowa.

swobodna neutron o energii 10 MeV w materii, z której zbudowana jest Ziemia, wynosi 10^{15} km \approx 1 rok świetlny! Neutrino takie przeleci przez Ziemię po torze przechodzącym przez jej środek nie ulegając w praktyce ani razu rozproszeniu na nukleonach i elektronach, z których zbudowana jest nasza planeta. Ale w niezwykle warunkach, gdy materia ma gęstość ponad 10^{12} g/cm³ i temperaturę ponad 10^{10} K, zderzenia neutron z nukleonami i elektronami będą znacznie częstsze. Rachunki teoretyczne wskazują, że zderzenia te są wówczas tak częste, że od momentu, w którym gęstość rdzenia osiągnie wartość 10^{12} g/cm³, neutrino są „uwięzione”: ich droga swobodna zmniejsza się do kilkudziesięciu metrów i czas potrzebny na wydotanie się z kurczącej się materii jest dłuższy od czasu implozji rdzenia gwiazdy, w którym powstają.

Gdy gęstość kurczącego się rdzenia osiągnie wartość około $2,4 \cdot 10^{14}$ g/cm³, równą w przybliżeniu gęstości materii jądrowej, z której zbudowane są jądra atomowe, materia staje się tak sztywna (twarda), że ogromne ciśnienie jest w stanie w końcu zrównoważyć siły grawitacyjne. Oszacujmy promień rdzenia w momencie, gdy jego „zapadanie się” zostało zatrzymane. Zakładając, że jego gęstość wynosi $\rho_r = 2,4 \cdot 10^{14}$ g/cm³ przy masie $M_r = 1,4 M_{\odot}$ otrzymujemy

$$(4) \quad R_r = \left(\frac{3M_r}{4\pi\rho_r} \right)^{\frac{1}{3}} = 13 \text{ km.}$$

Na ten niezwykle gęsty rdzeń gwiazdy spadają pod wpływem siły ciężkości kolejne jej warstwy, co zostało uwidocznione na rysunku 3a. Pod ich ciężarem rdzeń ulegnie jedynie lekkiemu ściśnięciu, a następnie gwałtownie „zaspężynuje” odbijając od siebie stykającą się z nim bezpośrednio warstwę materii. To niezwykle gwałtowne odbicie wewnętrznej części otoczki rdzenia od jego powierzchni prowadzi do powstania — wskutek zderzenia ze spadającymi bardziej zewnętrznymi warstwami gwiazdy — fali uderzeniowej, która rozchodzi się od środka gwiazdy ku jej powierzchni (rys. 3b). Szczegółowe obliczenia wskazują, że fala uderzeniowa rozchodzi się z prędkością początkową ponad 60 000 km/s, odrzucając na zewnątrz kolejne, coraz rzadsze warstwy otoczki (rys. 3c). Dużą rolę w procesie propagacji fali uderzeniowej odgrywają neutrino, które dopiero teraz wydostają się z gorącego i gęstego rdzenia. W warstwie położonej tuż za czołem fali uderzeniowej panuje temperatura około 10^{11} K. W takiej temperaturze typowa (średnia) energia ruchu cieplnego cząstek (w tym również neutronów) wynosi 10 MeV. Fala uderzeniowa i neutrino przekazują otoczce, która w przypadku naszej gwiazdy stanowi 90% masy, część ogromnej energii, która wydzieliła się w wyniku implozji rdzenia.

Rozważmy proces implozji rdzenia o masie $1,4 M_{\odot}$. Przed implozją, przy założeniu stałej gęstości, jego energia potencjalna wynosiła:

$$(5) \quad E_1 = -\frac{3GM_r^2}{5R_1} = -2 \cdot 10^{51} \text{ ergów.}$$

Podobnie jak na rysunku 2 założyliśmy, że $R_1 = 1500$ km. Po implozji $R = R_r = 13$ km (patrz równanie (4)), energia potencjalna równa jest

$$(6) \quad E_2 = -\frac{3GM_r^2}{5R_r} = -2,4 \cdot 10^{53} \text{ ergów.}$$

W wyniku implozji wydzieli się więc energia

$$(7) \quad \Delta E = E_1 - E_2 = 2,3 \cdot 10^{53} \text{ ergów.}$$

Ogromna większość tej energii (98%) zostanie uniesiona przez neutrino. Neutrino wyemitowane przez falę uderzeniową bez trudności przelatują przez otoczkę nadolbrzyma. Ich typowa energia równa się energii cieplnej cząstek przy temperaturze 10^{11} K, a więc $E_{\nu} = 10$ MeV. W wyniku implozji zostanie zatem w ciągu kilkunastu sekund wyemitowany na zewnątrz gwiazdy potężny impuls neutronów o energii około 10 MeV. Ilość ich wynosi

$$(8) \quad \Delta E/E_{\nu} = 10^{58}.$$

Zaledwie około 2% energii ΔE , a więc w naszym przypadku około $4 \cdot 10^{51}$ ergów, będzie przekazane przez falę uderzeniową otoczce, która zostanie wyrzucona z dużą prędkością na zewnątrz. Reszta energii zostaje użyta na emisję różnego typu promieniowania, w tym także widzialnego, oraz na ogrzanie materii.

Implozja rdzenia gwiazdy zamienia się więc w wybuch otoczki (rys. 3d), która rozszerza się w ciągu setek lat z prędkością tysięcy km/s. Promieniowanie otoczki wodorowej widzimy na Ziemi jako rozbłysk *supernowej* (dokładniej: supernowej typu II). Jasność supernowej w ciągu pierwszych kilku tygodni może dorównywać jasności galaktyki, w której supernowa rozbłysła. Tak więc bezpośrednio po eksplozji czerwonego olbrzyma jasność supernowej może być miliard razy większa od jasności typowej gwiazdy, takiej jak nasze Słońce! Supernowe, które rozbłysły w naszej Galaktyce, wzbudzały ogromne zainteresowanie z powodu swej ogromnej jasności oraz nagłości, z jaką się pojawiały. Najślawniejsza chyba supernowa była obserwowana w 1054 roku przez astronomów chińskich i została przez nich nazwana gwiazdą-gościem.

Stopniowo, w ciągu setek lat, otoczka rozszerza się tworząc świecąca mgławicę. Wybuch supernowej z 1054 roku pozostawił po sobie Mgławicę Krab. Bezpośrednim produktem implozji, która dała początek supernowej, jest w omawianym przez nas przypadku kula o masie nieco większej od masy Słońca i promieniu kilkunastu kilometrów, która w konsekwencji neutronizacji materii składa się głównie z neutronów. Ten zadziwiający twór — to *gwiazda neutronowa* (patrz *Delta* 7/1980), obserwowana w przypadku Mgławicy Krab jako *pulsar* (patrz *Delta* 8/1980).