



J. Stodółkiewicza) materia międzygwiazdowa może zostać skondensowana do tego stopnia, że dalej zapada się pod wpływem własnych sił grawitacyjnych.

W tym czasie gaz ogrzewa się emitując część swojej energii w postaci promieniowania maserowego (patrz artykuł T. Kwasta). Wewnętrzna część chmury już po ok. milionie lat jest na tyle gorąca, że w jej środku zaczynają zachodzić reakcje termojądrowe („palenie” wodoru), co zatrzymuje zapadanie się. Po pewnym czasie gwiazda powoli „osiada” na tzw. ciągu głównym, gdzie spędza większość swego życia aż do momentu, kiedy cały wodór w centrum gwiazdy będzie spalony i wytworzy się jądro helowe. Jądro to powoli zapada się. Reakcje w centrum ustają, a pali się tylko cienka warstwa wodorowa przylegająca do helowego jądra, przez co jego masa i temperatura powoli rosną aż do czasu, kiedy nastąpi zapłon helu albo kiedy jądro stanie się silnie zdegenerowane. Degeneracja jest stanem materii, w którym ważną rolę gra zakaz Pauliego (patrz artykuł J. P. Lasoty w *Delcie* 10/1978) i gdzie gęstość i ciśnienie nie zależą od temperatury. Hel pali się tworząc węgiel. Reakcje znowu przenoszą się na zewnątrz, a pozbawione źródeł energii jądro kurczy się pod wpływem własnej grawitacji. Zewnętrzna otoczka gwiazdy staje się w tym czasie tak rozdęta, że osiąga nierzadko rozmiary kilkakrotnie przewyższające odległość od Ziemi do Słońca. Gwiazdy w tym stanie nazywa się nie bez racji czerwonymi olbrzymami, a najbardziej okazałe spośród nich czerwonymi nadolbrzymami. W tym stadium ewolucji, przed osiągnięciem swoich maksymalnych rozmiarów, gwiazdy zataczają charakterystyczne pętle na diagramie Hertzsprung-Russella (okładka). Przechodząc kilkakrotnie przez tzw. pas niestabilności na pewien czas zaczynają pulsować stając się cefeidami. Po kilku zapłonach kolejnych pierwiastków jądro może stać się niestabilne i następuje jego implozja, związana z eksplozją zewnętrznej otoczki gwiazdy. Jest to zjawisko supernowej. Otoczka zostaje odrzucona tworząc tzw. mgławicę planetarną, natomiast jądro zapada się tworząc gwiazdę neutronową lub czarną dziurę. Jednak życie większości gwiazd kończy się w sposób mniej dramatyczny. Kiedy temperatura jądra nie pozwala na zapalenie się kolejnej reakcji lub jest ono dostatecznie zdegenerowane, zaczyna powoli stygnąć i zapadać się, kończąc swoje życie jako biały karzeł dopalający resztki materii na swojej powierzchni. Niezależność między jądrem i otoczką jest na tyle silna, że gdyby otoczka odpłynęła w przestrzeń, to jądro zupełnie by tego nie odczuło.

Utrata masy przez gwiazdy

Dr Maciej KOZŁOWSKI

Gwiazdy nie są wieczne. Część z nich powstała wtedy, gdy formowała się nasza Galaktyka, inne rodzą się i w naszych czasach gdzieś w gęstych obłokach materii międzygwiazdowej. Masywniejsze spośród gwiazd pierwszego pokolenia dawno już zdołały wypalić swe paliwo jądrowe i po mniej lub bardziej gwałtownych wydarzeniach kończących ich życie przestały świecić. Mniej masywne nie zdążyły zgasnąć. Co więcej, sądzi się, że te, które powstały jako lżejsze niż $0,7 M_{\odot}$ (przez M_{\odot} oznacza się w astronomii masę równą masie Słońca, wynoszącą $1,97 \cdot 10^{33}$ g), niewiele się zmieniły od czasu uformowania się przed kilkunastu miliardami lat i przez cały czas palą spokojnie wodór w centrum. Jest jednak coś, co pozwala odróżnić je od młodszych gwiazd. Właściwie są dwie takie cechy. Jedną z nich są właściwości kinematyczne, a drugą skład chemiczny. Gwiazdy, o których wiadomo, że są stare, składają się w skrajnych przypadkach w 99,9 procentach z wodoru i helu z niewielką domieszką cięższych pierwiastków. Natomiast najmłodsze gwiazdy zawierają czasem aż 3—4% pierwiastków cięższych niż hel. Jasne więc, że od czasu powstania Galaktyki materia międzygwiazdowa, z której wyłaniają się nowo powstające gwiazdy, wzbogaciła znacznie swój skład chemiczny. Mogło się to stać tylko w jeden sposób: przez utratę materii z gwiazd kończących swoje życie i to znaczną utratę, bo obejmującą swym zasięgiem położone głęboko we wnętrzu gwiazd rejony, w których na różnych etapach ich życia przebiegały przemiany jądrowe. Głównych dostarczycieli produktów nukleosyntezy do materii międzygwiazdowej trzeba upatrywać w gwiazdach najbardziej masywnych. Procentowo jest ich co prawda niewiele, ale mają to do siebie, że ewoluują bardzo szybko, w każdym razie jak na kosmiczne skale czasowe. Z tego powodu więc, za część materii międzygwiazdowej zdążyła już zapewne wielokrotnie znaleźć się we wnętrzu masywnych gwiazd, wzbogacając za każdym razem swój skład chemiczny. Masywne gwiazdy kończą życie bardzo efektywnie, wybuchając jako gwiazdy znane pod mianem supernowych. Wybuch jest prawdziwą katastrofą w życiu gwiazdy. Znaczna część jej masy, bogata w centralnych regionach w hel i węgiel i dodatkowo jeszcze wzbogacana w ciężkie pierwiastki przez rozmaite egzotyczne reakcje jądrowe pobudzone w procesie samego wybuchu, rozlatuje się w przestrzeń z olbrzymimi prędkościami przekraczającymi 5000 km/s, by zmieszać się z materią międzygwiazdową. Najbardziej centralne warstwy, nie mogąc przeciwstawić się potężnym siłom samograwitacji, zapadają się gwałtownie, co zresztą jest przyczyną samego wybuchu. Na miejscu eksplozji pozostanie gwiazda neutronowa, albo niezbyt masywna czarna dziura, a niewykluczone, że czasem zgoła nic. Gwiazdy o średnich masach również wcześniej czy później tracą większą część swojej materii, a świadczy o tym istnienie w przyrodzie białych karłów oraz obserwacje obiektów będących przynajmniej w części ich poprzednikami — jąder mgławic planetarnych. Droga prowadząca od świeżo narodzonej gwiazdy do białego karła da się w swym ogólnym schemacie streścić bardzo krótko:

Astronomowie przypuszczają, że tak właśnie dzieje się na niebie i że bezpośrednimi produktami rozpadu czerwonych olbrzymów są mgławice planetarne. Przekonanie to nie jest bezpodstawne. Jądra mgławic planetarnych mają właściwości świadczące i o tym, że są tak gęste jak białe karły, i o tym, że głównym źródłem ich jasności jest paląca się tuż pod powierzchnią warstwa materii, a resztki odpływającej otoczki czerwonego olbrzyma po prostu widać przez teleskop

w postaci gorącej mgławicy otaczającej jądro. Ocenia się, że masy mgławic planetarnych są niewielkie, rzędu $0,1 M_{\odot}$, ale nie oznacza to, że łączne ilości wyrzuconej materii są tak małe, ponieważ widać tylko to, co jest ogrzane przez jonizujące promienie obiektu centralnego. Cała reszta ukrywa się w mrokach przestrzeni i o tym, że tak jest rzeczywiście, zaświadczy porównanie mas gwiazd zaczynających ewolucję z masami jej produktów: masy białych karłów nie mogą być większe niż $1,4 M_{\odot}$, co wynika z przesłanek teoretycznych i znajduje swe potwierdzenie w obserwacjach.

Nasuwa się pytanie: czy wyrzucenie otoczki czerwonego olbrzyma jest wydarzeniem jednorazowym w życiu gwiazdy, czy też procesem trwającym powoli i przez dłuższy czas? Dziesięć lat temu przedstawiono argumenty za tym, że może to być zjawisko jednorazowe. Następowałoby ono w wyniku dynamicznego rozhuśtania się otoczki, bowiem zmagazynowana w niej energia cieplna wystarcza, aby nadać jej prędkości potrzebne do wyniesienia jej dowolnie daleko. Rzecz tylko w tym, w jaki sposób zamienić energię cieplną na mechaniczną. Nawiasem mówiąc, prędkości ucieczki z powierzchni czerwonego olbrzyma są ciągle niemałe, pomimo jego rozděcia, bo rzędu kilkudziesięciu kilometrów na sekundę. Obecnie gromadzi się coraz większy materiał obserwacyjny świadczący o tym, że proces utraty masy trwa długo i powoli i co więcej, że jest zjawiskiem powszechnym, obejmującym swym zasięgiem w mniejszym lub większym stopniu większość gwiazd, także i te, w których materia musi rozpędzić się do prędkości tysiąca kilometrów na sekundę, aby pokonać przyciąganie grawitacyjne macierzystej gwiazdy.

Obserwacje bezpośredniej utraty masy z czerwonych olbrzymów zostały zapoczątkowane w 1956 roku odkryciem A. Deutscha z obserwatorium Mt. Wilson, o którym to odkryciu warto powiedzieć kilka słów. Deutsch obserwował spektroskopowo układ gwiazdy α Herculis, składający się z czerwonego olbrzyma i odległego od niego o 4,7 sekundy łuku żółtego towarzysza. Obserwacje żółtego składnika doprowadziły do wyodrębnienia w jego widmie dwu układów linii o periodycznie zmieniających się z niewielką amplitudą długościach fali. Interpretacja tej właściwości doprowadziła do stwierdzenia, że składnik ten jest również podwójny, a przesunięcia linii są dopplerowskim odbiciem ruchu jego komponentów wokół wspólnego środka masy. Nie było w tym jeszcze nic szczególnego, bo takie wielokrotne układy nie są rzadkością wśród gwiazd. Ciekawe natomiast były wąskie linie absorpcyjne, widoczne zarówno w widmie czerwonego olbrzyma, jak i w widmie żółtej gwiazdy. Najbardziej interesujące było to, że nie brały one udziału w dopplerowskim ruchu widma ciasnej pary, z czego natychmiast wypływał wniosek, że powstają na drodze pomiędzy układem a obserwatorem. Dokładniejsza analiza materiału obserwacyjnego pozwoliła stwierdzić, że źródłem linii jest materia wypływająca z czerwonego olbrzyma z prędkością 20 km/s i w tempie $3 \cdot 10^{-8} M_{\odot}/\text{rok}$.

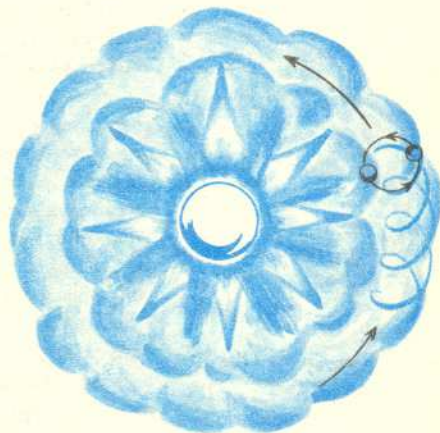
Od czasu pionierskiego odkrycia Deutscha opracowano nowe techniki obserwacyjne, rozciągnięto dziedzinę obserwacji chłodnych gwiazd na podczerwień i mikrofałę. Odkryto produkowane przez czerwone olbrzymy pyły grafitu i silikatów oraz molekuly objawiające swe istnienie efektem maserowym, przepompowującym schwytaną w różny sposób energię do promieniowania o pewnych uprzywilejowanych długościach fali. Udało się stwierdzić, że tempo utraty masy rośnie wraz ze stopniem rozděcia gwiazdy. Powszechności utraty materii przez wszystkie chłodne gwiazdy dotychczas jeszcze nie ogłoszono, ale kto wie, czy za kilka lat do tego nie dojdzie.

Czerwone olbrzymy nie są jedyną klasą gwiazd tracących

w sposób ciągły materię. Jej intensywny wypływ, sięgający do $10^{-4} M_{\odot}/\text{rok}$, obserwuje się także wśród masywnych, gorących, jasnych gwiazd. W większości są to młode gwiazdy, które powstały zapewne nie dawniej niż przed kilku milionami lat, ale są wśród nich i bardziej zaawansowane wiekiem, o nienormalnym składzie chemicznym, prawie zupełnie pozbawione wodoru, za to bogate w hel, tzw. gwiazdy Wolfa-Rayeta. Ciekawe, że utratę masy z gorących gwiazd odkryto jeszcze w latach trzydziestych, ale większość odkryć i wyznaczeń w tej dziedzinie pochodzi z ostatnich lat. Powód jest prosty: gwiazdy te są gorące i mają jeszcze bardziej gorące otoczki, promieniujące najchętniej w ultrafiolecie, zaś badania w dalekim ultrafiolecie można wykonywać tylko spoza atmosfery ziemskiej przy użyciu rakiet i sztucznych satelitów Ziemi.

Przyczynę do przemyśleń nad powszechnością utraty materii z gwiazd dały ostatnio wyznaczenia mas niektórych pojedynczych zaawansowanych wiekiem gwiazd, znacznie niższe od wspomnianych na początku granicznych $0,7 M_{\odot}$. I tak masy tzw. cefeid karłowatych są szacowane na poziomie $0,2-0,25 M_{\odot}$, zaś masa *Aldebarana* (α Tauri) na $0,4 M_{\odot}$. Gdyby to były składniki układów podwójnych, to nie należałoby się niczemu dziwić, bowiem w układach podwójnych, a szczególnie ciasnych, możliwe jest wszystko. W tym przypadku, o ile przyszłe obserwacje potwierdzą wiarygodność tych wyznaczeń, oznaczałoby to silną utratę masy z gwiazd, które nie są ani bardzo jasne, ani bardzo rozděte i w dodatku lekkie.

Do kompletu gwiazd tracących masę wypada na zakończenie dołączyć Słońce z jego wiatrem słonecznym. Wiatr słoneczny niesie bardzo mało masy, zaledwie dwukrotnie więcej niż ilość wypromieniowywana w postaci energii świetlnej ($E = m \cdot c^2$), ale zrozumienie mechanizmów decydujących o jego istnieniu (wiadomo, że bardzo skomplikowanych) jest bardzo ważne. Niewykluczone bowiem, że przyczyny utraty masy na znacznie większą skalę, szczególnie wśród chłodnych gwiazd, mogą być podobne jak w przypadku wiatru słonecznego. Wśród gorących gwiazd mechanizmy są zapewne inne, ale zamiast o tym pisać, skwitujmy to stwierdzeniem, że ciągle na ten temat za mało wiadomo.



Układ potrójny α Herculis.