

# Błękitni maruderzy

Okres, w którym źródłem energii gwiazdy są zachodzące w jej jądrze reakcje termojądrowe, gdzie wodór zamieniany jest w hel, należy do najdłuższych i najspokojniejszych w trakcie jej ewolucji. Stosunkowo nieliczne gwiazdy potrafią ten okres młodości w znaczący sposób przedłużyć. Szczególnie widoczne są one w gromadach gwiazdowych, gdzie odróżniają się większą jasnością i temperaturą powierzchniową od większości gwiazd spalających wodór. Ich wyższa temperatura i „niechęć” do przejścia na następne etapy ewolucji spowodowały, że nadano im nazwę błękitnych maruderów (BM). Aby łatwiej było zrozumieć, czym się wyróżniają, jak powstają i co się z nimi później stanie, warto przypomnieć kilka podstawowych informacji dotyczących ewolucji gwiazd.

Dużą rolę w jej zrozumieniu miało wprowadzenie na początku XX wieku tak zwanego diagramu Hertzsprunga–Russela (diagramu H-R), na którym naniesione są typy widmowe i jasności gwiazd, dla których te parametry mogą być zmierzone. Obecnie, kiedy znamy lepiej kalibrację niektórych obserwowanych wielkości, często zamiast typu widmowego podaje się kolor (różnicę jasności w dwóch różnych barwach) lub temperaturę efektywną (trudniejszą do określenia na podstawie obserwacji, za to będącą parametrem bezpośrednio otrzymywanym z modeli teoretycznych).

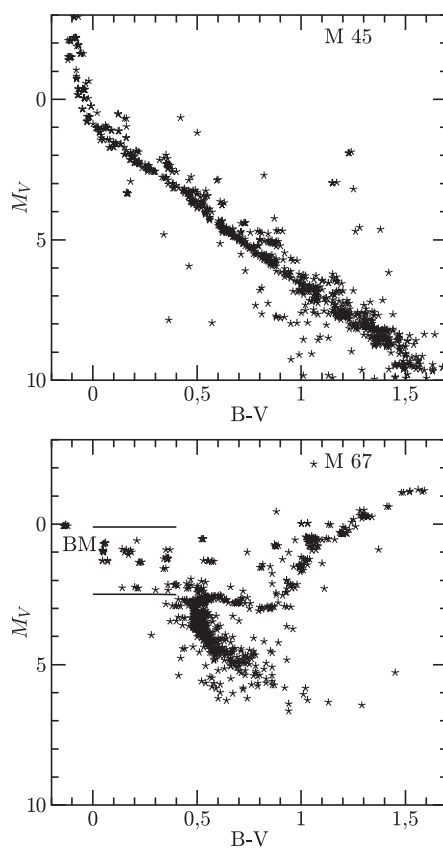
Na diagramie H-R szczególnie dużo gwiazd znajduje się na tak zwanym ciągu głównym. Jak wiemy, są to gwiazdy, których energia pochodzi ze stabilnych reakcji termojądrowych zamiany wodoru w hel. Własności tych gwiazd silnie zależą od ich masy. Im gwiazda jest masywniejsza, tym wyższa temperatura panuje w jej centrum, tym szybciej zachodzą tam reakcje termojądrowe i w rezultacie – ma większą jasność. Na przykład, dla gwiazd o masach pomiędzy 1 a 10 mas Słońca zależność między jasnością  $L$  a masą  $M$  ma wykładnik w przybliżeniu równy 4, czyli  $L \sim M^4$ . Wynika z tego, że im masywniejsza jest gwiazda, tym krócej żyje na ciągu głównym, gdyż zapas paliwa do reakcji termojądrowych jest w przybliżeniu proporcjonalny do masy gwiazdy, a tempo jego zużywania do jasności gwiazdy. I tak czas życia Słońca na ciągu głównym wynosi około 10 mld lat, natomiast gwiazdy o masie dwa razy większej tylko około 1 mld lat.

Gdy we wnętrzu gwiazdy wyczerpie się wodór, powstaje jądro złożone głównie z helu, które otoczone jest warstwą, gdzie w dalszym ciągu spalany jest wodór. Rosnąca masa jądra, w którym nie zachodzą reakcje termojądrowe, powoduje, że zaczyna się ono kurczyć, czemu towarzyszy rozszerzanie zewnętrznych obszarów gwiazdy i spadek temperatury powierzchniowej. Taka gwiazda wkracza na gałąź czerwonych olbrzymów, odchodząc od ciągu głównego w stronę niższych temperatur powierzchniowych i większych jasności (o ile

Marcin KIRAGA \*

nie jest to gwiazda bardzo jasna i bardzo masywna, gdyż takie, odchodząc od ciągu głównego, niewiele zmieniają swoją jasność).

Efekty ewolucji widać szczególnie wyraźnie w gromadach gwiazd. Gwiazdy w gromadzie mają ten sam wiek i skład chemiczny (a przynajmniej tak zakładamy). Jeżeli gromada jest bardzo młoda, to jej ciąg główny sięga do gwiazd bardzo jasnych i gorących, gdyż najmasywniejsze gwiazdy gromady są jeszcze na ciągu głównym. Z upływem czasu efekty ewolucji są dla nich najbardziej widoczne i odchodzą one w stronę gwiazd chłodniejszych. Stopniowo wypalają wodór w swoich wnętrzach gwiazdy o coraz mniejszych masach. Im więc starsza jest gromada, tym „krótszy” jest jej ciąg główny. Ilustruje to rysunek, na którym pokazane są diagramy H-R dla dwóch gromad otwartych dość wyraźnie różniących się wiekiem (M 45 – Plejady i M 67).



Diagramy H-R dla dwóch gromad otwartych. Na górnym rysunku mamy dość młodą gromadę Plejady (M45), której wiek wynosi około 100 milionów lat, a poniżej dużo starszą M 67, która liczy około 4 miliardów lat. Kolor B-V jest miarą powierzchniowej temperatury gwiazd (im większa wartość B-V, tym gwiazda chłodniejsza), a  $M_V$  jest absolutną wielkością gwiazdową w filtrze V (im mniejsza wartość  $M_V$ , tym jaśniejsza gwiazda). Widać, że w Plejadach nie ma czerwonych olbrzymów, a ciąg główny zawiera gwiazdy gorętsze i jaśniejsze niż w gromadzie M 67. W gromadzie M 67 najliczniejsze są gwiazdy ciągu głównego, ale dużo jest w niej gwiazd na gałęzi czerwonych olbrzymów i występują dość licznie błękitni maruderzy (BM – gwiazdy gorętsze i jaśniejsze niż gwiazdy odchodzące od ciągu głównego na gałąź czerwonych olbrzymów).

\*Obserwatorium Astronomiczne, Uniwersytet Warszawski

Na gałęzi olbrzymów znajdują się obiekty o masie niewiele większej niż jej najmasywniejsze w danym czasie gwiazdy ciągu głównego. W najstarszych znanych gromadach, takich jak gromady kuliste naszej Galaktyki, które liczą już kilkanaście miliardów lat, najmasywniejsze gwiazdy ciągu głównego mają masy trochę mniejsze od słonecznej, a ich jasność i temperatura powierzchniowa jest podobna jak obecnego Słońca. Jest to zgodne z modelem ewolucji pojedynczej gwiazdy ciągu głównego. Jednak w gromadach można znaleźć gwiazdy jaśniejsze i gorętsze od tych, które zeszyły już z ciągu głównego. Wydają się pozostawać na ciągu głównym dłużej niż większość gwiazd, która już przeszła na dalszy etap ewolucji. Te właśnie gwiazdy nazywamy błękitnymi maruderami (BM).

Ich położenie na diagramie kolor-jasność może sugerować, że są młodsze niż pozostałe gwiazdy gromady. Jedną z hipotez tłumaczących ich istnienie wskazywała na możliwość przechwycenia przez gromadę gwiazd młodszych niż te, które ją tworzą. Jest to jednak bardzo mało prawdopodobne, bo gromady raczej tracą swoich członków, a nie zyskują nowych.

Problem BM pojawił się w 1953 roku. Ich obecność po raz pierwszy stwierdził Sandage w gromadzie kulistej M3. Później wykryto je również w gromadach otwartych. Po wprowadzeniu do obserwacji astronomicznych detektorów CCD liczba znanych BM zaczęła szybko rosnąć, a szczególnie istotny postęp dokonał się po uruchomieniu Teleskopu Hubble'a. Jego wysoka zdolność rozdzielcza umożliwiła na tyle dokładne obserwacje centralnych części gromad kulistych, że możliwe stało się stwierdzenie obecności tam BM. Okazało się, że można je spotkać w każdej odpowiednio dokładnie zbadanej gromadzie kulistej i w większości starszych gromad otwartych (liczących prawie kilkaset milionów lat). Liczba BM jest dość znaczna. W starszych gromadach otwartych mamy zazwyczaj od kilku do kilkudziesięciu gwiazd tego typu, w gromadach kulistych, które zawierają znacznie większą liczbę gwiazd, występuje zazwyczaj od kilkudziesięciu do kilkuset BM. Jak na razie, znanych jest około 3000 BM w gromadach kulistych i blisko 2000 w gromadach otwartych. Co ciekawe, istnienie gwiazd o zbyt długim okresie życia na ciągu głównym nie ogranicza się tylko do gromad (choć w nich najłatwiej jest stwierdzić ich obecność). Istnieją bowiem gwiazdy nazywane niebieskimi gwiazdami o małej metaliczności, tj. zawierające mało pierwiastków cięższych od helu. Część ich ma własności kinematyczne i skład chemiczny odpowiadający gwiazdom bardzo starym, takim, jakie tworzą gromady kuliste. Są jednak gorętsze i jaśniejsze niż mające taki sam wiek gwiazdy ciągu głównego i można je uznać za odpowiedniki BM, tylko niezwiązane obecnie z żadną gromadą.

Aby badać, w jaki sposób BM mogą powstawać, warto określić względną częstość ich występowania.

Przykładowo w największej z gromad kulistych naszej Galaktyki,  $\omega$  Cen znamy około 300 BM, a jedna gwiazda tego typu przypada na około 100 gwiazd gałęzi czerwonych olbrzymów i na 12 gwiazd gałęzi horyzontalnej, tj. starych gwiazd o małej metaliczności, które w swoich wnętrzach stabilnie spalają hel. Okazało się, co było pewnym zaskoczeniem, że im masywniejsza i gęstsza jest gromada, tym częstość występowania BM jest mniejsza. W najmniej masywnych gromadach kulistych i w starych gromadach otwartych częstość występowania BM jest kilkadziesiąt razy większa niż w  $\omega$  Cen i jest praktycznie taka sama jak częstość występowania niebieskich gwiazd o małej metaliczności. Wydaje się więc, że w masywnych i gęstych gromadach kulistych występują czynniki hamujące powstawanie BM.

Istotne informacje o pochodzeniu BM może dać również ich położenie w gromadzie gwiazd. W większości gromad kulistych najwięcej BM jest w centrum gromady, a ich liczba spada ze wzrostem odległości od niego.

Zapewne duża część BM w gromadach kulistych i większość BM w starych gromadach otwartych powstaje więc w wyniku zlewania się ciasnych układów podwójnych. Z kolei, w gęstych jądrach gromad kulistych, gdzie gęstość gwiazd jest rzędu  $10^5$  na parsek sześcienny, tj. około miliona razy większa niż w okolicy Słońca, możliwe są zderzenia gwiazd lub zderzenia składników układu podwójnego spowodowane bardzo bliskim przejściem innej gwiazdy.

Pozycja BM na diagramie HR wydaje się więc potwierdzać hipotezę, że powstają one na skutek łączenia się gwiazd. Jasność najjaśniejszych BM odpowiada masie gwiazd ciągu głównego około dwa razy większej niż tych gwiazd gromady, które kończą ewolucję na ciągu głównym. W przypadku gromad kulistych BM często mają masy około  $1,3 M_{\odot}$ .

Większość niebieskich gwiazd o małej metaliczności znajduje się w układach podwójnych, z których część jest w układach o dużych okresach orbitalnych (powyżej 1000 dni), gdzie drugi składnik nie jest obserwowany. Można przypuszczać, że swoją dużą jasność zawdzięczają materii, którą otrzymały od towarzyszącej im gwiazdy, gdy była w stadium czerwonego olbrzyma. A układy o długich okresach w gromadach kulistych są szybko niszczone, więc nie stają się tam źródłem powstawania BM.

Jednak określenie BM jako gwiazdy należącej do gromady i znajdującej się na diagramie HR na przedłużeniu ciągu głównego może obejmować gwiazdy o różnym pochodzeniu.

Obecność BM w stosunkowo młodych gromadach (o wieku poniżej miliarda lat) może tłumaczyć hipoteza efektywnego mieszania wodoru we wnętrzach gwiazd szybko rotujących. Dzięki temu gwiazda miałaby do dyspozycji więcej paliwa niż gwiazda wolno rotująca. Mechanizm ten jest istotny dla gwiazd o masach

większych niż  $1,5 M_{\odot}$ , których obrót nie jest hamowany przez wiatr gwiazdowy będący wynikiem aktywności magnetycznej.

Jak widać, gwiazdy, które nazywamy BM, mogą powstawać na różne sposoby. „Klasyczne” BM powstały w wyniku oddziaływania dwóch lub większej liczby gwiazd, z tym że możliwe są tu procesy bardzo różne: przepływ masy w układzie podwójnym, zlanie się składników ciasnego układu podwójnego, zderzenie gwiazd układu podwójnego na skutek bliskiego przejścia innej gwiazdy czy też zderzenie dwóch gwiazd pojedynczych w gęstym centrum gromady kulistej. Tak więc zagadnienie powstawania BM z pewnością

jeszcze długo będzie przedmiotem zainteresowania astronomów.

A przyszłość BM? Wszystko na to wskazuje, że podlegają tym samym prawom ewolucji, co pozostałe gwiazdy. Kiedy skończą palić w centrum wodoru, staną się chłodniejsze, zwiększą swoje rozmiary (odejdą na gałąź olbrzymów) i choć będą jaśniejsze niż obecnie, to najprawdopodobniej nie będą się wydawały już tak intrygujące. O ich nietypowej przeszłości można będzie wtedy się dowiedzieć za pomocą dokładnych obserwacji spektroskopowych, które mogą wykazać niezwykle skład chemiczny będący wynikiem zlania się dwóch gwiazd lub też większej niż zazwyczaj prędkości rotacji.



## Zadania

Redaguje Ewa CZUCHRY

**F 713.** W próżni umieszczono kulisty balonik o promieniu  $R_1$  wypełniony gazem. Wewnątrz tego balonika znajduje się inny balonik, o promieniu  $R_2$ , wypełniony tym samym gazem. Jaki będzie promień zewnętrznego balonika po pęknięciu tego wewnętrznego, jeśli temperatura gazu nie zmieni się? Przyjąć, że powierzchnia balonika wywiera na gaz ciśnienie odwrotnie proporcjonalne do jego promienia.

Rozwiązanie na str. 16

**F 714.** W długiej wąskiej probówce, wypełnionej powietrzem, znajduje się kropla rtęci. Gdy rurka leży poziomo, rtęć znajduje się w odległości  $l_1$  od końca probówki, a gdy jest pionowa – w odległości  $l_2$ . W jakiej odległości znajdzie się kropla rtęci po odwróceniu probówki „do góry nogami”?

Rozwiązanie na str. 21

Redaguje Waldemar POMPE

**M 1201.** Dowieść, że dla każdych dodatnich liczb całkowitych  $a, b, c$  spełniona jest nierówność

$$\sqrt{2a} + \sqrt{2b} + \sqrt{2c} \leq \sqrt{a+b} + \sqrt{b+c} + \sqrt{c+a}.$$

Rozwiązanie na str. 7

**M 1202.** Rozstrzygnąć, czy istnieje takich 100 różnych liczb całkowitych dodatnich, z których każda jest dzielnikiem sumy pozostałych 99 liczb.

Rozwiązanie na str. 14

**M 1203.** Punkty  $D, E, F$  leżą odpowiednio na bokach  $BC, CA, AB$  trójkąta  $ABC$  (rysunek). Promień okręgu opisanego na trójkącie  $ABC$  wynosi  $R$ .

Wykazać, że pole trójkąta  $DEF$  jest równe

$$\frac{1}{4R}(BD \cdot CE \cdot AF + DC \cdot EA \cdot FB).$$

Rozwiązanie na str. 15

