

Ile lat mają gwiazdy?

Mgr Michał CZERNY



Wyznaczanie wieku różnych obiektów jest z reguły przedsięwzięciem skomplikowanym. Jednym z podstawowych problemów archeologii jest sprawa datowania wykopalisk. Paleontolodzy próbują wyznaczyć wiek skamieniałych roślin i zwierząt, a geologowie starają się ocenić, jak stare są różne skały. Wszystkie te poczynania nie należą do łatwych, gdyż przyroda nie obdarzyła swoich twórców w metryki, w których czarno na białym wypisany byłby moment ich powstania. Wyznaczanie wieku gwiazd napotyka na jeszcze jedną dodatkową trudność. Nie można mianowicie umieścić gwiazdy w laboratorium, aby poddać ją analizie; wszystkie informacje musimy wydstać z promieniowania, jakie do nas dociera. Dlatego nie ma bezpośredniej metody określania, ile lat mają gwiazdy, wymyślono natomiast metody pośrednie, opierające się na — lepiej lub gorzej — sprawdzonych teoriach i hipotezach.

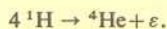
Jednym z charakterystycznych parametrów określających wiek gwiazdy jest skład chemiczny jej zewnętrznych warstw, czyli tzw. atmosfery. Drugim parametrem jest położenie gwiazdy w Galaktyce. Aby to szerzej wyjaśnić, musimy zatrzymać się na chwilę przy teorii powstawania pierwiastków we Wszechświecie, a także przy teorii ewolucji Galaktyki.

Obecnie prawie wszyscy naukowcy uważają, że Wszechświat powstał 15—20 miliardów lat temu. W momencie powstania Wszechświata (w tzw. wielkim wybuchu, lub mówiąc z angielska „big bang”) utworzyły się dwa najlżejsze pierwiastki — wodór i hel. Powstały także minimalne ilości innych pierwiastków, które dalej będziemy nazywać pierwiastkami ciężkimi. Wytworzyły się one w kilku pierwszych zaledwie minutach istnienia Wszechświata, który wtedy był bardzo gorący i gęsty. Przyczyną powstania pierwiastków były reakcje jądrowe.

Nieustanna ekspansja (rozszierzenie się) Wszechświata spowodowała, że po tych kilku pierwszych minutach gęstość i temperatura materii spadły na tyle, iż reakcje jądrowe musiały ustać. Wszechświat w dalszym ciągu powiększał swoją objętość i po pewnym czasie (ale czas ten liczy się już w milionach lat!) materia rozmieszczona początkowo dość jednorodnie zaczęła skupiać się w poszczególne galaktyki. Wtedy także powstała nasza Galaktyka.

Wydaje się, iż nasza Galaktyka miała początkowo kształt wielkiej kuli zbudowanej z rzadkiego gazu. Drobne niejednorodności spowodowały, że część materii zaczęła skupiać się w obłoki gazowe, gęstsze niż otaczający je ośrodek. Obłok taki był niestabilny (siły grawitacyjne przewyższały ciśnienie gazu) i dlatego podlegał procesowi kondensacji. Jego objętość malała, natomiast gęstość i temperatura rosły. W pewnym momencie temperatura w centrum obłoku stała się na tyle duża, iż mogły zachodzić reakcje jądrowe. Energia wyzwalana w takich reakcjach powstrzymała proces kurczenia się obłoku. Powstała stabilna konfiguracja gazu — nowo narodzona gwiazda.

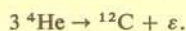
Gwiazdy produkują energię w głębokich wnętrzach. Energia ta wypromieniowywana jest w postaci fal elektromagnetycznych — światła. Źródłem energii są reakcje jądrowe. Reakcje te polegają na łączeniu się jąder lżejszych pierwiastków w jądra pierwiastków cięższych. W początkowych fazach ewolucji w gwieździe zachodzi głównie proces syntezy jąder helu z jąder wodoru; schematycznie można ten proces zapisać tak:



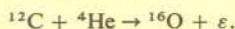
Wzór ten należy rozumieć w następujący sposób: cztery jądra wodoru o jednostkowej masie atomowej przekształcają się w jedno jądro helu o masie atomowej równej czterem; ε oznacza energię wydzieloną w czasie tej reakcji.

Skutkiem reakcji jądrowych zmienia się skład chemiczny wnętrza gwiazdy: staje się ono uboższe w wodór, a bogatsze w hel. Natomiast skład warstw powierzchniowych gwiazdy pozostaje niezmieniony, gdyż zarówno temperatura, jak i gęstość są tam zbyt małe, aby mogły zachodzić reakcje jądrowe.

Gdy cały zapas wodoru w centralnych częściach gwiazdy zostanie wyczerpany, zaczynają zachodzić reakcje syntezy jąder węgla z jąder helu:



Gdy obfitość węgla stanie się wystarczająco duża, wówczas może powstawać tlen:



Jądro tlenu może przyłączyć jądro helu dając w wyniku jądro neonu i tak dalej. Efektem tych wszystkich reakcji jądrowych jest cała gama pierwiastków chemicznych powstających we wnętrzu gwiazdy.

Gwiazdy kończą swoją ewolucję, gdy wyczerpią zasób energii jądrowej. Gwiazdy mniej masywne stają się wówczas białymi karłami, tj. stosunkowo małymi, lecz bardzo gęstymi kulami rozgrzanej materii, która powoli stygnie. Gwiazdy masywniejsze kończą swój żywot gigantycznym fajerwerkiem, jakim jest wybuch supernowej. Prawie cała gwiazda zostaje wówczas rozerwana „na strzępy”, a jedynie z najbardziej centralnych warstw tworzy się tzw. gwiazda neutronowa. Masa gwiazdy neutronowej jest bliska masy Słońca (równie 2×10^{30} kg), a promień jest rzędu zaledwie 10 km. Czytelnik może łatwo obliczyć, jak wielka jest średnia gęstość takiego obiektu.

Rozwiązanie zadania M 224

Przypuśćmy, że k jest pierwiastkiem całkowitym naszego równania. Wtedy

$$(x-a)(x+10)+1 = (x-k)(x-l)$$

i podstawiając $x = k$ mamy:

$$(k-a)(k+10)+1 = 0,$$

czyli $(k-a)(k+10) = -1$ i ponieważ $k-a$

i $k+10$ są całkowite, więc albo

$$k-a = 1, k+10 = -1,$$

$$\text{albo } k-a = -1, k+10 = 1.$$

Mamy więc dwie możliwe wartości a : $a = -12$

lub $a = -8$. Jeżeli $a = -12$, to

$$(x-a)(x+10)+1 = (x+12)(x+10)+1 =$$

$$= (x+11)^2, \text{ a jeżeli } a = -8, \text{ to}$$

$$(x-a)(x+10)+1 = (x+8)(x+10)+1 =$$

$$= (x+9)^2.$$

Wobec tego $a = -12$ lub $a = -8$ i tylko te dwie wartości a spełniają warunki zadania.

Tempo ewolucji gwiazdy zależy drastycznie od jej masy. Gwiazda o masie równej masie Słońca potrzebuje ok. 10 miliardów lat, aby stać się białym karłem; natomiast gwiazdzie o masie kilkadziesiąt razy większej wystarczy zaledwie parę milionów lat, by wybuchnąć jako supernowa. Wróćmy do naszej Galaktyki. Zostawiliśmy ją w momencie, gdy miała kształt kulisty i zaczynały tworzyć się pierwsze gwiazdy. Oczywiście rozmieszczone one były w sposób sferycznie symetryczny. Z biegiem czasu gaz znajdujący się w Galaktyce opadał do płaszczyzny równika galaktycznego. Jednocześnie najmasywniejsze spośród najwcześniej powstałych gwiazd kończyły już swoją ewolucję wybuchami supernowych. Materia tych gwiazd rozrywana w czasie wybuchu zawierała znaczne ilości pierwiastków ciężkich. Po wybuchu przenikała ona do gazu międzygwiazdowego. W ten sposób następowało wzbogacenie materii międzygwiazdowej w pierwiastki ciężkie. Proces tworzenia się gwiazd z gazu międzygwiazdowego trwał dalej — trwa on zresztą do dzisiaj. Gwiazdy powstawały (i powstają) jednak już tylko w pobliżu płaszczyzny równika galaktycznego, gdyż tylko tam pozostała wystarczająca ilość materii. Wybuchy supernowych ustawicznie wzbogacają tę materię w pierwiastki ciężkie. Dlatego im później powstała gwiazda, z tym większą ilości pierwiastków ciężkich była zbudowana.

Jak widać, gwiazdy w naszej Galaktyce można podzielić z grubsza na dwie grupy. Pierwsza — to gwiazdy stare, należące do tzw. podsystemu sferycznego Galaktyki. Mają one co najmniej 10 miliardów lat. Są to gwiazdy mało masywne, gdyż masywniejsze zakończyły już swoją ewolucję. Zewnętrzne warstwy tych gwiazd, nie przekształcone przez reakcje jądrowe, zawierają bardzo mało pierwiastków ciężkich. Drugą grupę stanowią gwiazdy młodsze, tworzące podsystem płaski, gdyż grupują się w pobliżu płaszczyzny równika galaktycznego. W warstwach powierzchniowych tych gwiazd znajduje się stosunkowo dużo pierwiastków ciężkich.

Skład chemiczny zewnętrznych warstw gwiazdy można wyznaczyć z obserwacji. W tym celu należy przeprowadzić tzw. analizę widmową promieniowania. Światło gwiazdy skupione w ognisku teleskopu należy przepuścić przez pryzmat lub siatkę dyfrakcyjną. Otrzymamy wówczas widmo promieniowania gwiazdy. Wystąpią w nim ciemne prążki. Istnienie każdego z tych prążków świadczy o występowaniu w atmosferze gwiazdy jakiegoś pierwiastka. Natężenie prążka świadczy o obfitości tego pierwiastka.

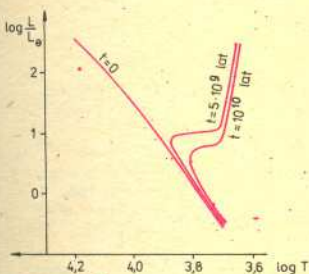
Stwierdzono, że w gwiazdach podsystemu sferycznego ułamek masy atmosfery, jaki stanowią pierwiastki ciężkie, wynosi zaledwie parę tysięcznych. Dla gwiazd podsystemu płaskiego jest on odpowiednio większy. I tak dla Słońca (którego wiek ocenia się na 4,6 miliarda lat) wynosi on dwie setne, natomiast dla gwiazd najmłodszych (mających tylko kilka milionów lat) jest on równy czterem setnym.

Problem ewolucji gwiazd jest jednym z lepiej zbadanych zagadnień współczesnej astronomii. Obecnie możemy powiedzieć, jak zmieniają się w czasie charakterystyczne parametry gwiazdy, takie jak promień, jasność (tj. ilość energii emitowana w ciągu sekundy), temperatura powierzchniowa itp. Dlatego mogłoby wydawać się prostym wyznaczenie wieku gwiazdy przez porównanie jej obserwowanych parametrów z teoretycznymi obliczeniami. Metoda ta jednak zawodzi, gdyż — jak już powiedzieliśmy wyżej — ewolucja gwiazdy zależy niesłychanie silnie od jej masy, nie ma zaś dokładnej metody wyznaczania mas gwiazd. Jedynym wyjątkiem jest nasze Słońce, którego masę znamy z wystarczającą precyzją. Wyniki teorii ewolucji można jednak zastosować do wyznaczania wieku gromad gwiazd. Są to wielkie skupiska gwiazd wewnątrz Galaktyki. Wyróżniamy dwa rodzaje gromad. Gromady kuliste zawierają $10^5 - 10^6$ gwiazd, a ich promienie wynoszą 50—100 parseków. Przypominają one wielkie kule. Gromady otwarte są mniejsze. Do każdej z nich należy kilkadziesiąt lub kilkaset gwiazd. Ich kształt jest nieregularny, a typowe rozmiary wynoszą kilka parseków. Gromady kuliste należą do podsystemu sferycznego Galaktyki, natomiast gromady otwarte — do płaskiego. Sądzimy, że gwiazdy należące do jednej gromady uformowały się jednocześnie.

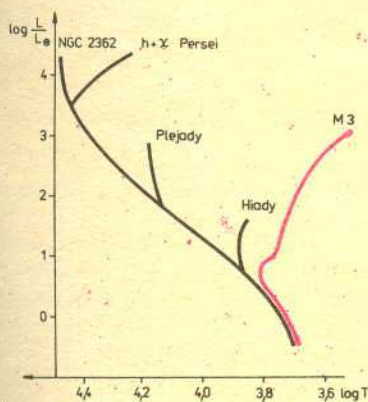
W celu wyznaczenia wieku gromady wygodnie jest posłużyć się diagramem Hertzsprunga-Russella (w skrócie diagramem H—R). Na poziomej osi tego diagramu (skierowanej — ze względów historycznych — na lewo!) odłożony jest logarytm temperatury powierzchniowej gwiazdy, natomiast na osi pionowej — logarytm jej jasności. Każdą gwiazdę reprezentuje na diagramie H—R jeden punkt. Gwiazdy w momencie powstania układają się wzdłuż prostej linii, która nazywa się ciągiem głównym wieku zerowego. Im większa jest masa gwiazdy, tym wyżej znajdzie się ona w ciągu głównym. Po pewnym czasie zmieniają się parametry gwiazd, tych masywniejszych — bardziej, tych mniej masywnych — odpowiednio mniej. Gwiazdy będą układać się wzdłuż innej linii na diagramie H—R. Można obliczyć teoretyczny kształt takich linii (są to tzw. izochrony) w zależności od czasu, jaki upłynął od momentu powstania gwiazd. Porównując teoretyczne izochrony z rozmieszczeniem gwiazd z gromady na diagramie H—R można wyznaczyć wiek tejże gromady.

Procedurę taką zastosowano do zbadania wieku wielu gromad. Okazało się, że wiek gromad kulistych jest praktycznie identyczny i wynosi około 15 miliardów lat. Diagramy H—R dla gromad otwartych różnią się natomiast znacznie swoim wyglądem, a tym samym gromady te mają różny wiek. Istnieją gromady otwarte, które mają zaledwie parę milionów lat; są także takie, których wiek wynosi miliardy lat.

Schematyczny wygląd naszej Galaktyki „z boku”. Punkty czerwone wyobrażają gwiazdy o małej obfitości pierwiastków ciężkich, natomiast czarne — o dużej.



Teoretyczny diagram H-R. Na osi poziomej zaznaczony jest logarytm temperatury powierzchniowej (w kelwinach), a na pionowej — logarytm jasności (w jednostkach słonecznych). Zaznaczony jest ciąg główny wieku zerowego i izochrony odpowiadające pięciu i dziesięciu miliardom lat.



Schematyczny diagram H-R dla kilku gromad otwartych (czarne linie) i jednej gromady kulistej (linia czerwona).