

Diagram Hertzsprunga – Russella, ewolucja gwiazd

Jakub Bartkowiak

Astroclass

Streszczenie

Gwiazdy, podobnie jak inne elementy wszechświata, podczas swojego istnienia przechodzą przez różne stadia ewolucyjne. Proces ten nazywany jest ewolucją gwiazd, a jego dokładne zrozumienie pozwala wydedukować pochodzenie znanych nam pierwiastków i docenić ogrom sił i procesów rządzących kosmosem. Pomocnym narzędziem, umożliwiającym sprawne klasyfikowanie gwiazd ze względu na etap ewolucyjny, jest diagram H-R. Pomimo, iż został opracowany na początku XX wieku, do dziś stanowi kluczowy podmiot w kwestii systematyzacji poznawanych przez nas gwiazd.

Spis treści

1	Diagram Hertzsprunga-Russella	1
1.1	Budowa diagramu	1
1.2	Ciąg główny	2
1.3	Olbrzymy	3
1.4	Białe karły	3
2	Cykl ewolucyjny gwiazd	3
2.1	Skrótowe objaśnienie każdego etapu ewolucyjnego	4
3	Źródła, zalecane pomoce naukowe	5

1 Diagram Hertzsprunga-Russella

1.1 Budowa diagramu

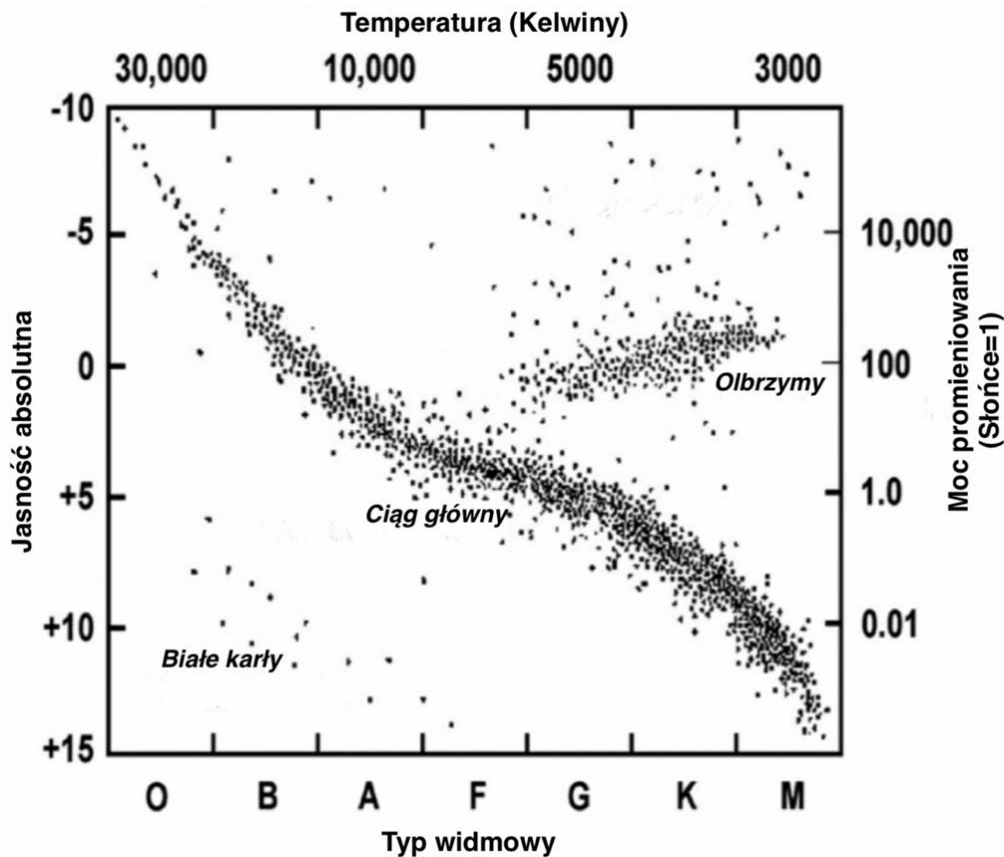
Diagram H-R występuje zwykle w jednym z dwóch wariantów (często oba są ukazane na jednym): jako wykres zależności mocy promieniowania od temperatury gwiazdy lub jako wykres zależności jasności absolutnej, a więc wielkości gwiazdowej podanej w odległości 10 pc (więcej informacji w skrypcie: *Wzór Pogsona*), od koloru (przy odpowiednim skalowaniu są to te same wykresy). Na dolnej krawędzi są ukazane dwie wielkości: **wskaźnik barwy** (ang. colour index) i **typ widmowy** (ang. spectrall class).

Wskaźnik barwy jest miarą barwy gwiazdy, która pośrednio mówi nam o temperaturze gwiazdy. Gwiazda emituje szerokie widmo promieniowania o natężeniu zależnym od długości fali, co powoduje, że jasność gwiazdy w różnych barwach jest różna. W astronomii to co ciepłe jest niebieskie, a to co zimne – czerwone. Wskaźnik określony jest jako różnica między jasnościami (wielkościami gwiazdowymi) zmierzonymi w dwóch różnych filtrach. Najczęściej spotykane filtry do mierzenia jasności w kolorze to U - nadfiolet, B - niebieski, V - zielono-żółty, R - czerwony i I - podczerwony. Wskaźnik barwy podaje się jako różnicę jasności w filtrach (najczęściej kolejnych) np. B-V.

Typ widmowy to klasyfikacja oparta na widmie gwiazdy, biorąca pod uwagę jej ciśnienie, temperaturę i skład chemiczny. Widmo to rozszczepione światło gwiazdy, pokazujące wszystkie kolory z jakich się składa (tęcza jest przykładem widma). Gwiazdy są klasyfikowane na podstawie temperatury i widocznych linii absorbcyjnych. Są to ciemne, prostopadłe linie w ciągłym widmie światła. Ich charakterystyka pozwala stwierdzić obecność specyficznych molekuł lub atomów, na przykład w atmosferach planet i gwiazd. Klasy widmowe w kolejności od najgorętszej do najzimniejszej to **O B A F G K M**. Aby zapamiętać ich kolejność, często wykorzystuje się mnemotechniki:

-przykład wersji angielskiej-Oh, Be **A** Fine **G**irl(Guy), Kiss Me.

-przykład wersji polskiej-O, Bycie **A**stro **F**izykiem **G**rozi **K**alectwem **M**ózgu.



Rysunek 1: diagram H-R wraz z wyróżnieniem kluczowych podgrup.

1.2 Ciąg główny

Jedną z najcenniejszych właściwości diagramu jest wyraźny podział na kilka grup, które ściśle odpowiadają etapom rozwoju tych gwiazd – **ciąg główny**, **olbrzymy** i **białe karły**. W kolejnych punktach opisana będzie każda z tych podgrup.

Gwiazdy ciągu głównego (ang. main sequence) to ciała niebieskie, będące w swoim najbardziej stabilnym stadium ewolucyjnym. Aby powstrzymać ogromne siły grawitacyjne, przyczyniające się do zapadania materii, gwiazda musi wytwarzać dużą ilość energii.

Źródłem emitowanej energii w gwiazdach ciągu głównego są reakcje jądrowe, zachodzące we wnętrzu gwiazdy. Polegają one na łączeniu lżejszych pierwiastków w cięższe. Są nazywane reakcjami termojądrowymi i stanowią kategorię wysoce wydajnych, wieloetapowych reakcji egzoenergetycznych, czyli wydzielających energię do otoczenia. Do ich rozpoczęcia, a także stabilnego utrzymania, potrzebna jest odpowiednio wysoka temperatura oraz duża gęstość materii. W ich wyniku powstaje ogromna energia, zdolna do powstrzymania ogromnych sił grawitacyjnych przed zapadaniem się materii.

Głównym źródłem energii gwiazd ciągu głównego jest seria reakcji termojądrowych, nazywana cyklem protonowym. Polega ona na syntezie (łączeniu się) atomów wodoru w hel, a następnie łączenia się atomów helu w beryl i tak dalej, aż do otrzymania atomu żelaza. Wodór stanowi „paliwo gwiazdy”, dzięki któremu może ona przeprowadzać fuzję wodoru (cykl protonowy). Cykl reakcji zatrzymuje się na izotopie żelaza Fe^{56} , ponieważ dalsze łączenie się atomów żelaza, w wyniku którego powstawałyby cięższe pierwiastki, jest nieopłacalne, ponieważ wymagałoby dodatkowego nakładu energii.

Położenie gwiazdy w ciągu głównym jest głównie określone przez jej masę. Czas, na jaki dana gwiazda pozostaje w ciągu głównym, zależy od jej masy początkowej. Im masywniejsza jest gwiazda, tym krótszy jej czas życia. Ta nieintuicyjna zależność jest skutkiem szybszego zużywania paliwa, niezbędnego do przeprowadzania reakcji jądrowych, przez bardziej masywne gwiazdy (podobnie jak szybkie samochody, zużywające więcej benzyny).

Spośród znanych gwiazd w stadium ciągu głównego znajdują się m.in. Słońce, Syriusz czy Wega.

1.3 Olbrzymy

Faza, podczas której gwiazda staje się olbrzymem, jest stosunkowo krótka. Dotyczy ona gwiazd średniej masy. Moc promieniowania takiego olbrzyma jest kilkaset razy większa od mocy promieniowania Słońca. Najbliższa nam gwiazda również stanie się olbrzymem w przeciągu następnych 5 mld lat. Średnica Słońca wzrośnie wówczas ponad stukrotnie, a moc promieniowania tysiąckrotnie.

Fotosfera, czyli powierzchniowa warstwa olbrzyma, jest stosunkowo zimna. W astronomii asocjacja temperatury z barwą zachodzi na odwrót niż w życiu codziennym. Z tego powodu niebieskie obiekty są gorące, natomiast chłodniejsze, takie jak olbrzymy, są czerwone.

Na diagramie Hertzsprunga-Russella gwiazdy te znajdują się ponad ciągiem głównym.

1.4 Białe karły

Gdy w niewielkiej gwiazdce o średniej masie przestają zachodzić reakcje jądrowe, staje się ona białym karłem.

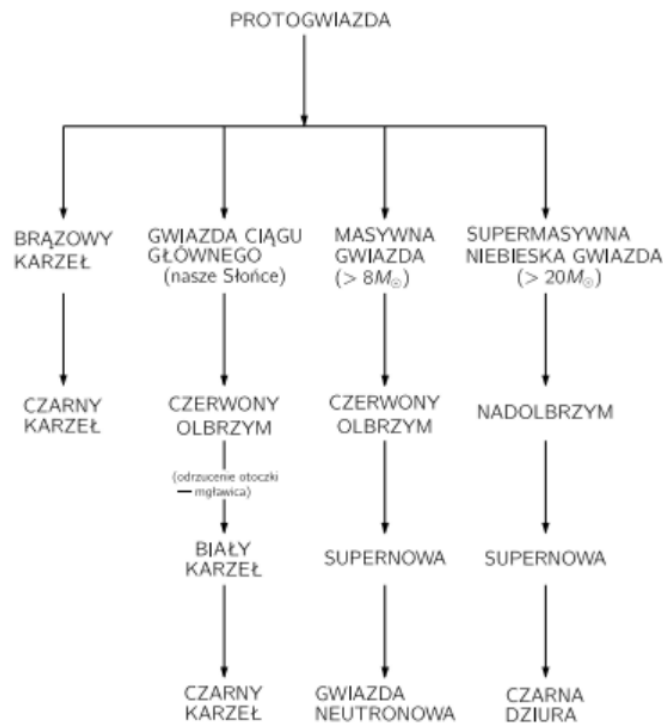
Ten etap dotyczy także mało masywnych gwiazd o masie od 0,08 do 0,4 mas Słońca, które nie posiadają wystarczająco paliwa wodorowego, niezbędnego do rozpoczęcia przeprowadzania cyklu protonowego. Powstają z nich wówczas białe karły helowe, które stają się wówczas obiektem o wielkości rzędu rozmiarów Ziemi, składającym się ze zdegenerowanej materii, emitującym m.in. promieniowanie w zakresie widzialnym.

Oprócz białych karłów wyróżniamy również m.in. czerwone i brązowe karły. Pierwsze z nich to obiekty o masie, rozmiarze i jasności mniejszej niż Słońce, a temperatury ich powierzchni są niższe niż 4000 kelwinów. Mogą żyć miliardy lat – znacznie dłużej niż jaśniejsze gwiazdy. Natomiast brązowe karły to obiekty o masie zbyt małej, aby mogły w nich zachodzić reakcje syntezy wodoru w hel (czyli głównego źródła energii wytwarzanej w gwiazdach), ale większej od gazowych olbrzymów (planet). Przyjmuje się, że brązowe karły mają masy od około 14 do 80 mas Jowisza.

Karły znajdują się pod głównym ciągiem na diagramie H-R.

2 Cykl ewolucyjny gwiazd

Najważniejszym czynnikiem decydującym o tym, w jaki sposób gwiazda będzie ewoluować oraz jak długo będzie trwał ten proces, jest **masa gwiazdy**.



Rysunek 2: Kolejne etapy ewolucji gwiazd. Ścieżka rozwoju gwiazdy zależy od jej masy początkowej.
Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki

2.1 Skrótowe objaśnienie każdego etapu ewolucyjnego

- Tworzy się mgławica, czyli zgrupowanie obłoku gazu i pyłu międzygwiazdowego, o masie $10^2 - 10^7$ mas Słońca, która powoli dzieli się na mniejsze. Temperatura wynosi powyżej 100K. Fragment mgławicy kurczy się i wiruje zwiększając prędkość obrotową. W centrum mgławicy wytwarza się nieprzezroczyste zagęszczenie. Centralny obiekt nagrzewa się do temperatury ponad 2000K i staje się protogwiazdą, otoczoną przez resztę mgławicy.
- Fazy protogwiazdy
 - Pojawia się jądro, w którym występuje promieniowanie, powodujące zmniejszanie się energii. Temperatura jądra rośnie, ale kurczenie się bardzo spowalnia.
 - Obiekt nadal się kurczy, świeci głównie w podczerwieni. Jest to rodzaj „światła” (promieniowania elektromagnetycznego) poza zakresem widzialnym. Podczerwień emitowana jest przez każde ciało, posiadające ciepło.
 - Rozpoczynają się wysokoenergetyczne reakcje termojądrowe (najczęściej są to reakcje syntezy).
- Właściwe etapy życia gwiazd
 - Gwiazda na ciągu głównym – wodor stopniowo przereagowuje i w jądrze powstaje hel (jest tam coraz więcej helu, a coraz mniej wodoru). Rośnie temperatura oraz promień gwiazdy.
 - Zaczynają zachodzić reakcje termojądrowe – wodor przemienia się w hel. Gwiazda staje się bardziej czerwona.
 - „Wypala” się ostatnie kilka procent wodoru pozostałego w jądrze. Gwiazda się kurczy, jasność nieznacznie spada. Helowe jądro otoczone jest wodorową otoczką.
 - Helowe jądro rozgrzewa się, a wodorowa otoczka rozrzedza się.

- Następuje tak zwany zapłon helu w jądrze – zaczynają zachodzić reakcje termojądrowe z udziałem helu, więc tego pierwiastka stopniowo ubywa. W otoczce nadal przebiegają reakcje termojądrowe wodoru.
- W wyniku reakcji termojądrowych w jądrze kończy się hel i wytwarza się węgiel oraz tlen. W otoczce jądra jest go natomiast coraz więcej, więc zaczynają tam zachodzić reakcje termojądrowe helu.
- **Etap tylko małomasywnych gwiazd** -> Temperatura w jądrze jest zbyt mała, aby następowały dalsze przemiany termojądrowe. Jądro zaczyna się kurczyć, a otoczka gwiazdy, czyli warstwa gazu otaczająca wnętrze gwiazdy, zostaje odrzucona – tworzy się mgławica planetarna, a jądro staje się białym karłem. W rzeczywistości nazwa tej mgławicy nie ma nic wspólnego z planetami. Niewłaściwa nazwa została nadana przez Williama Herschela. Stwierdził on, że ta otoczka gazu, będąca końcowym stadium ewolucyjnym w życiach gwiazd, jest podobna do tarczy planetarnej.
- **Etap tylko małomasywnych gwiazd** -> Białe karzeł zaczyna stygnąć, ponieważ nie ma już paliwa jądrowego (pierwiastków umożliwiających mu przeprowadzanie reakcji termojądrowych). Po całkowitym ustaniu świecenia stanie się czarnym karłem.
- Temperatura jest wystarczająca do kolejnych przemian termojądrowych w jądrze. Następują kolejno przemiany w coraz cięższe pierwiastki, aż do żelaza (Fe). Ewolucja gwałtownie przyspiesza - przemiany w jądrze od neonu do żelaza mogą trwać zaledwie rok.
- W jądrze kończą się pierwiastki niezbędne do reakcji termojądrowych. Jądro w ułamku sekundy się kurczy, wydziela się ogromna energia, gwałtownie zachodzą reakcje termojądrowe wyższych sfer gwiazdy. Przestają zachodzić reakcje w jądrze gwiazdy – następuje eksplozja supernowej. Na skutek zapadnięcia się gwiazdy pod własnym ciężarem dochodzi do wyrzutu w przestrzeń większości lub całej materii gwiazdy. Następuje wówczas znaczny wzrost jasności obiektu. Powstaje w ten sposób nietrwała mgławica oraz jądro. W przypadku eksplozji gwiazd o średniej masie jądro zostaje gwiazdą neutronową. Jest to obiekt niezwykle gęsty. Łyzeczka materii tego ciała niebieskiego ma masę około 6 miliardów ton. Natomiast z bardzo masywnych gwiazd (powyżej 20 mas Słońca) powstaje czarna dziura. Określana jest jako obszar czasoprzestrzeni, którego z uwagi na wpływ grawitacji, nic – łącznie ze światłem i informacją – nie może opuścić.

3 Źródła, zalecane pomoce naukowe

- Krótki film dobrze obrazujący zadany temat: Ewolucja Gwiazd, Astronarium
<https://www.youtube.com/watch?v=VXMXHFxfI3Q>
- Kamil Ciebiera, "Astrofizyka 2: Diagram Hertzsprunga- Russella (HR)", Astronet.pl, 20 października 2021
- Monika Sitek, "Ewolucja gwiazd", zpe.gov.pl.

Konspekt zajęć poruszający podobne kwestie. Zawiera dobrze opracowane zadania do weryfikacji zrozumienia tematu.