EWOLUCJA GWIAZD

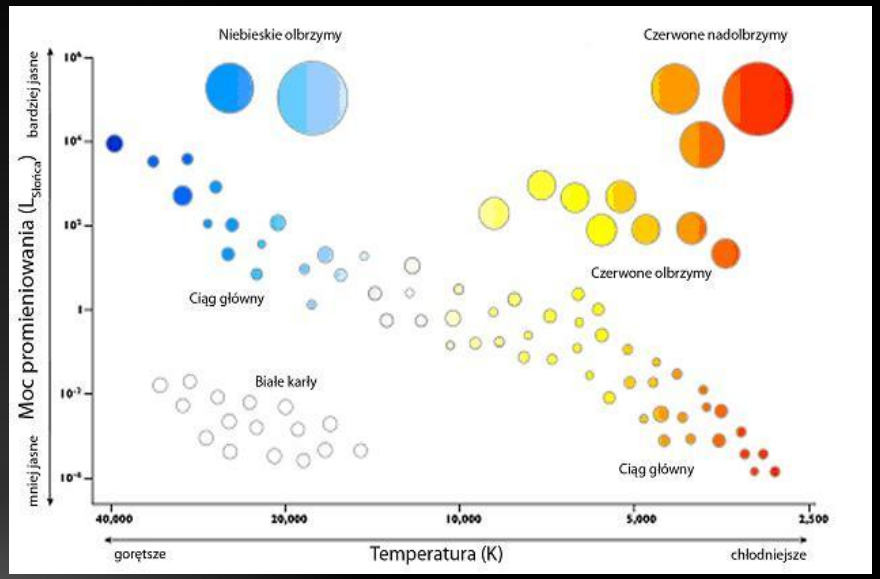
Tadeusz Smela

Prelekcja wygłoszona na V Zlocie Miłośników Astronomii w Zatomiu 22 września 2012

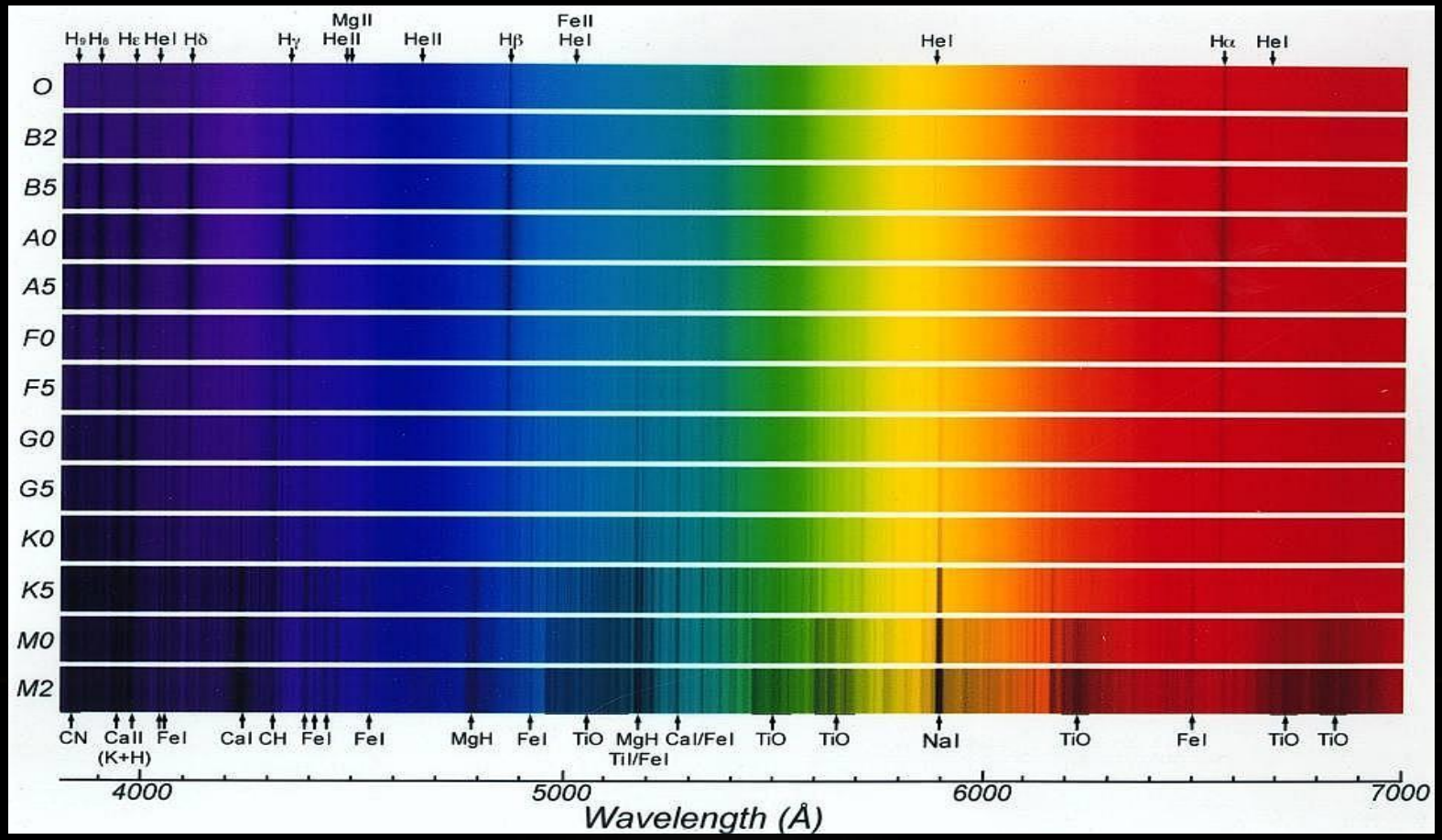
- Jak powstają gwiazdy, czym różnią się białe karły od brązowych, błękitnych, czerwonych czy żółtych karłów, jak powstają nadolbrzymy, mgławice planetarne no i jak kończy się życie niektórych rodzajów gwiazd, jak powstają pulsary i czarne dziury. Na te i wiele innych pytań postaram się odpowiedzieć.

- Wydawać by się mogło że największe gwiazdy powinny żyć najdłużej ale jest zupełnie odwrotnie. Gwiazdy o małej masie żyją wielokrotnie dłużej od tych o większych masach. Największe gwiazdy żyją krótko ale intensywnie.

- Gwiazdy różnią się kolorem, wielkością, jasnością, temperaturą powierzchniową czy masą. Przed omówieniem ewolucji pokażę na początku sposób klasyfikowania gwiazd a potem, bazując na diagramie Hertzsprunga-Russela pokażę jakie są ich ścieżki życia.



KLASYFIKACJA GWIAZD

- Podstawowe informacje o istocie gwiazd uzyskujemy z obserwacji widm gwiazdowych i ich jasności absolutnych.
- Badania widm gwiazd rozpoczęły się w XIX w. od obserwacji J.Fraunhofera, który za pomocą skonstruowanego przez siebie spektroskopu stwierdził, że na ogół widma gwiazd są podobne do widma Słońca ale wykazują znaczną różnorodność.
- 

KLASYFIKACJA GWIAZD DIAGRAM HERTZSPRUNGA-RUSSELA

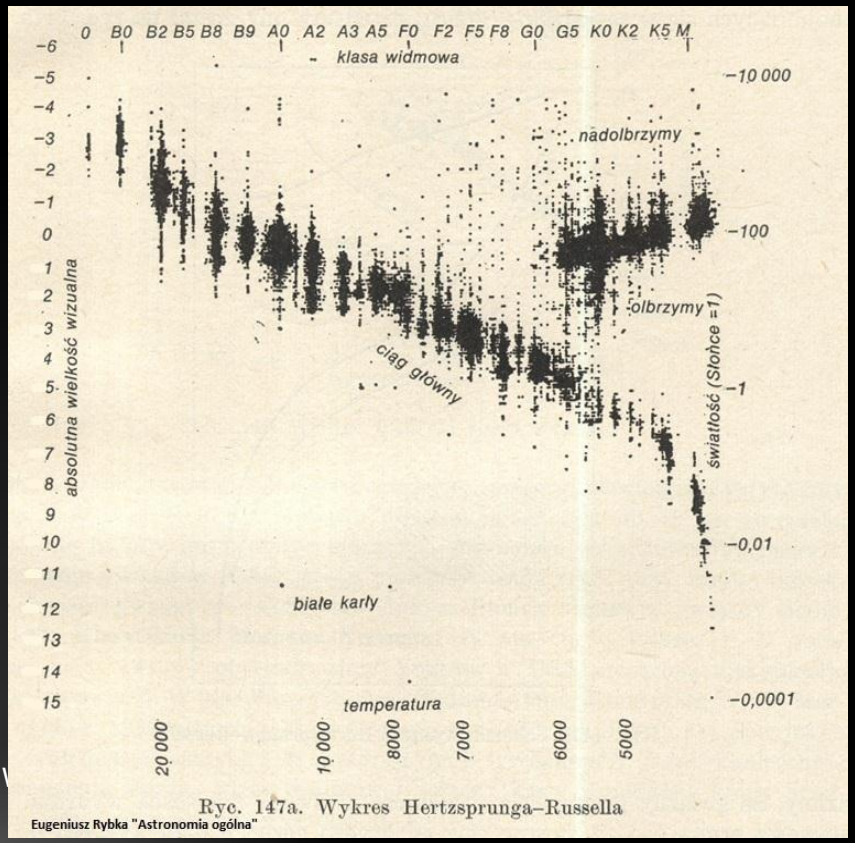
Na początku XX w. duński astronom Ejnar Hertzsprung i amerykanin Henry Norris Russel na podstawie obserwacji widm i jasności absolutnych wielu tysięcy gwiazd zauważyli ważną **zależność pomiędzy mocą promieniowania gwiazdy a jej widmem i temperaturą powierzchniową** . Stworzyli diagram, przypisując gwiazdy do 7 klas **OBAFGKM (Oh Be A Fine Girl and Kiss Me**)

Z opracowanego przez nich wykresu wynika że gwiazdy grupują się zasadniczo w określonych miejscach.

- Podstawowa grupa tworzy ciąg od lewego górnego rogu do prawego dolnego. Grupę tę nazwano początkowo grupą karłów, obecnie nosi nazwę **Ciągu Głównego**
- Na prawo u góry widzimy grupę olbrzymów

Klasa widmowa powiązana jest bezpośrednio z temperaturą – temperatura determinuje możliwość wystąpienia określonych pasm absorpcyjnych.

Czasami na osi poziomej zamiast temperatury umieszczany jest wskaźnik barwy. Wskaźnik barwy gwiazdy to miara jasności gwiazdy w jednym filtrze w porównaniu do jasności w drugim filtrze. Najbardziej rozpowszechnionym jest system wskaźnika barwy B-V, który jest różnicą jasności gwiazdy w filtrze B (niebieskim) i jasności w filtrze V (wizualnym – zielono-żółtym). Wskaźnik barwy jest ściśle związany z temperaturą



Ryc. 147a. Wykres Hertzsprunga–Russella

Eugeniusz Rybka "Astronomia ogólna"

Absolutna wielkość gwiazdowa jest to jasność obserwowana, jaką miałaby gwiazda obserwowana z odległości 10 parseków. Jest ściśle związana z mocą promieniowania gwiazdy. Słońce ma absolutną wielkość gwiazdową 4,79M.

KLASYFIKACJA GWIAZD DIAGRAM HERTZSPRUNGA-RUSSELA

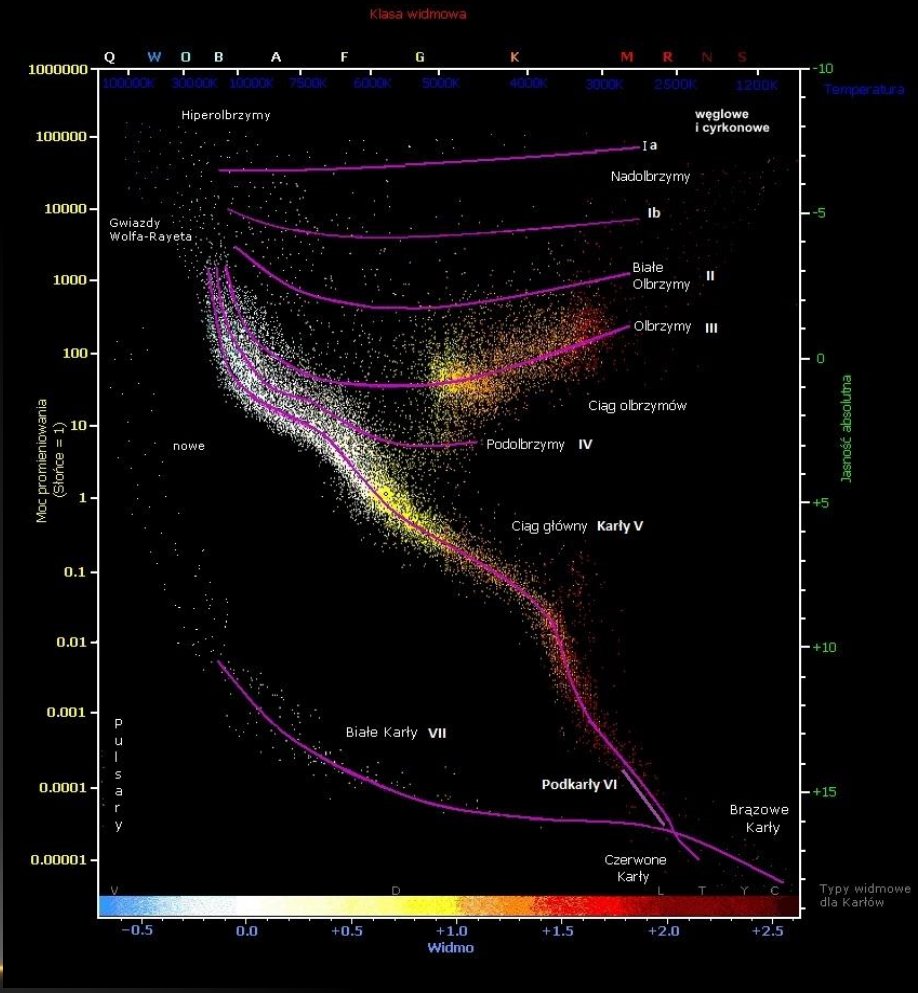
Przy dalszych, bardziej szczegółowych badaniach okazało się że ciąg główny i grupa olbrzymów nie są jedynymi grupami na diagramie.

Wykryto kilka innych grup, np. grupę nadolbrzymów, położonych w wykresie nad olbrzymami, czerwonych olbrzymów i nadolbrzymów, zaznaczonych na wykresie nieco poniżej olbrzymów.

Niezmiernie interesująca okazała się grupa gwiazd o wysokiej temperaturze i małym absolutnym blasku, nosząca nazwę białych karłów.

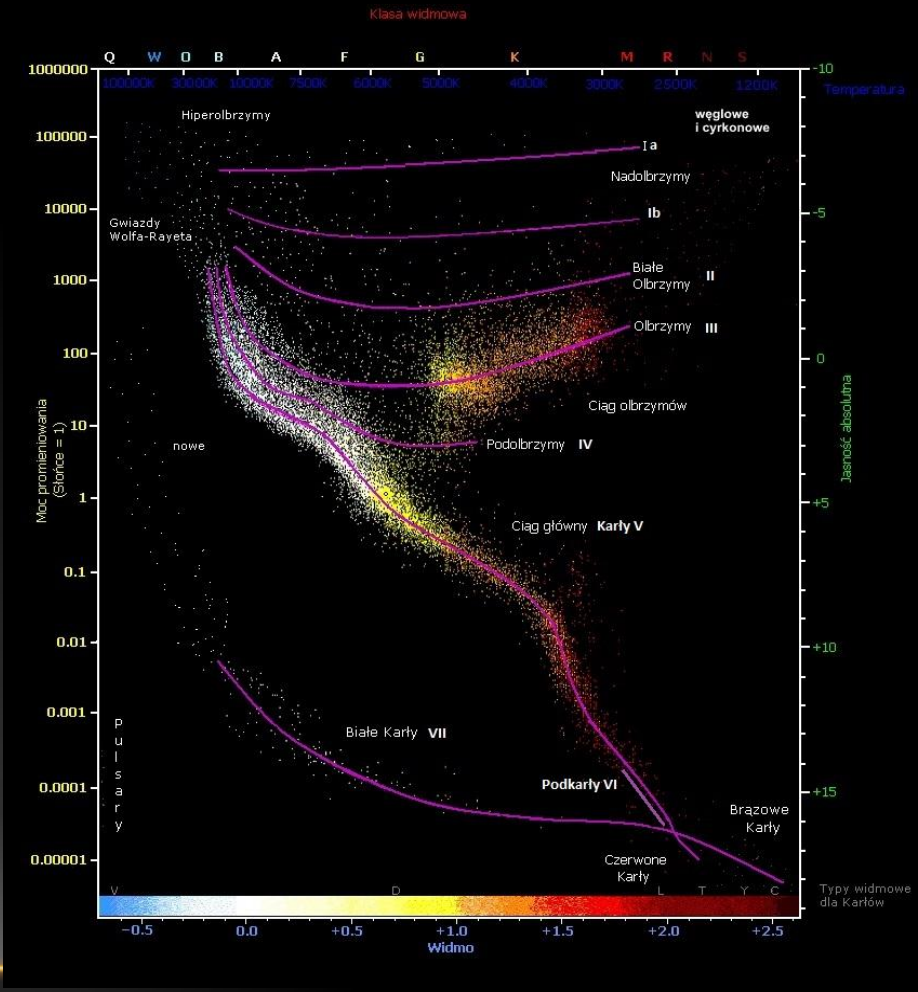
Oryginalną klasyfikację twórców diagramu z czasem rozszerzono o następujące klasy

- **W** – gwiazdy Wolfa-Rayeta o temperaturze powierzchni 100 000 K
- **Q** – gwiazd nowych
- **R** i **N** – gwiazd węglowych
- **S** – gwiazd cyrkonowych



KLASYFIKACJA GWIAZD KLASYFIKACJA MORGANA-KEENANA

- Amerykańska uczona Annie Jump Cannon, po przeanalizowaniu i sklasyfikowaniu widm ponad 200 tysięcy gwiazd zmodyfikowała podstawowy system klasyfikacji, dzieląc podstawowe typu widmowe na 10 podtypów oznaczonych cyframi od 0 do 9 umieszczonych za symbolem literowym w kolejności malejącej temperatury. Podstawą klasyfikacji były występujące w widmach gwiazd charakterystyczne linie i pasma (głównie absorpcyjne) oraz ocena ich względnych natężeń.
- W 1930 roku amerykański astronom, William Morgan, zauważył, że gwiazdy o tym samym typie widmowym mogą wyraźnie różnić się wyglądem widma (im gwiazda jaśniejsza tym węższe linie obserwuje się w jej widmie). Okazało się, że występowanie tych różnic pokrywa się z przynależnością gwiazd o tych samych typach widmowych do różnych ciągów na diagramie Hertzsprunga-Russella. Konieczne stało się wprowadzenie drugiego rodzaju klasyfikacji, opartej o klasę jasności gwiazd:
  - klasa jasności I – nadolbrzymy
    - klasa jasności II - jasne olbrzymy
    - klasa jasności III - olbrzymy
    - klasa jasności IV - podolbrzymy
    - klasa jasności V - karły
    - klasa jasności VI - podkarły
    - klasa jasności VII - białe karły
    z czasem dodano klasę 0 – hiperolbrzymy (oznaczana tez jako Ia)

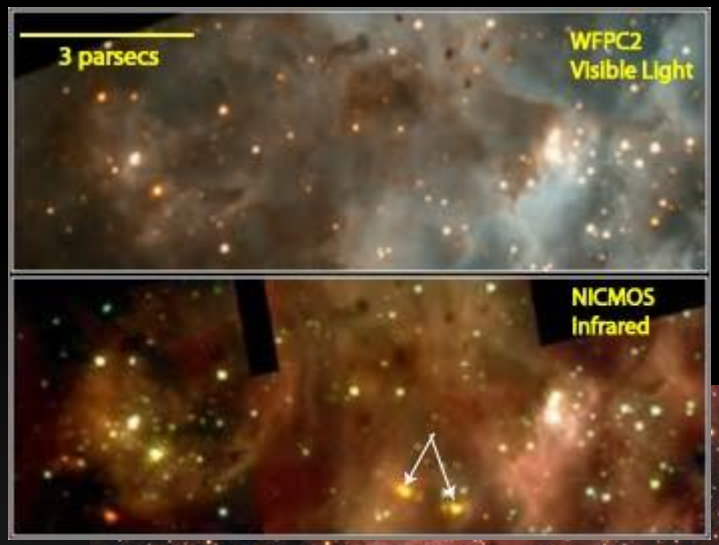


Np. Słońce należące do ciągu głównego, ma w klasyfikacji M-K oznaczenie **G2V**

(**W.W. Morgan, P.C.Keenan i E.Kellman** opracowali w 1943r atlas, stąd klasyfikacja została nazwana od pierwszych liter nazwy twórców atlasu)

JAK POWSTAJĄ GWIAZDY

- Gwiazdy tworzą się w gęstych obłokach molekularnych wewnątrz galaktyk. Chmury pyłu i gazu zasłaniają wczesne etapy powstawania gwiazd dla teleskopów optycznych. Na szczęście najnowsze postępy w dziedzinie radioastronomii i astronomii podczerwieni pozwalają teraz astronomom zajrzeć do wnętrza tych chmur i zdobyć lepsze zrozumienie procesów związanych z narodzinami gwiazd.



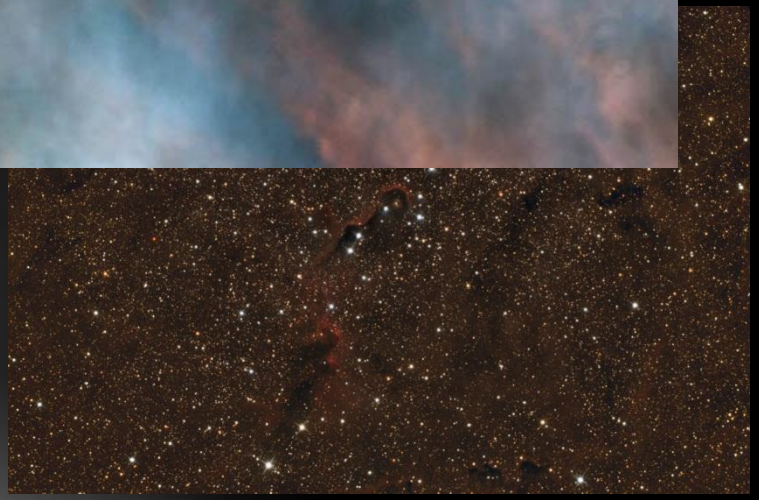
JAK POWSTAJĄ GWIAZDY

- Obłoki molekularne pływają sobie w przestrzeni międzygwiezdnej.
- Pod wpływem jakiegoś impulsu zewnętrznego, np. wybuchu supernowej, kontaktu z inną chmurą molekularną (elektrostatyka wywołana tarciem chmur molekularnych) czy sił związanych z ruchem obrotowym ramion spiralnych galaktyki lub kolizji galaktyk następują lokalne zagęszczenia materii
- Pojawiające się w lekko zagęszczonym obłoku siły grawitacji powodują coraz większą kondensację materii międzygwiezdnej

Na stacji kosmicznej ISS amerykański astronauta Donald R. Pettit wykonał ciekawy, bardzo prosty eksperyment. Do foliowej torebki nasypał soli. Po kilkukrotnym wstrząśnięciu w torebce pojawiły się bryłki połączonych ziarenek soli. Przyczyną tego zjawiska była elektrostatyka. Niewielkie siły elektrostatyczne, które pojawiły się po naelektryzowaniu ziarenek soli, w warunkach nieważkości (mikrograwitacji) spowodowały połączenie drobnych ziarenek w bryłki.
Elektrostatyka, wywołana tarciem obłoków molekularnych, może być jednym z czynników pojawiania się pierwotnych zagęszczeń podczas tworzenia się gwiazd czy planet.

PROTOGWIAZDY

- Ciągłe zagęszczanie chmury pod wpływem grawitacji doprowadza do tego, że chmura staje się nieprzezroczysta, zatrzymując energię cieplną w chmurze. To z kolei powoduje, że zarówno temperatura i ciśnienie rosną
- Energia grawitacyjna ciągle podgrzewa molekuły
- Z chmury powstaje *protogwiazda* .



PROTOGWIAZDY

- Tempo tworzenia protogwiazdy z obłoku molekularnego zależy od masy obłoku. Bardziej masywne chmury zapadają się (zagęszczają się) szybciej.
- Protogwiazda o masie 15 mas Słońca może zapaść w ciągu 100 000 lat, podczas gdy gwiazdy podobnej do naszego Słońca potrzebują na to około 50 milionów lat.
- Tempo zapadania protogwiazdy o niższej masie może trwać dwa razy dłuższej.
- Z jednego dużego obłoku molekularnego może tworzyć się jednocześnie wiele gwiazd. Czasami powstają całe gromady gwiazd. Najbardziej masywne protogwiazdy mogą zamienić się w gwiazdy, przejść kolejne etapy ewolucji i nawet zakończyć życie gdy te najmniej masywne ciągle są na etapie przed wejściem do ciągu głównego.

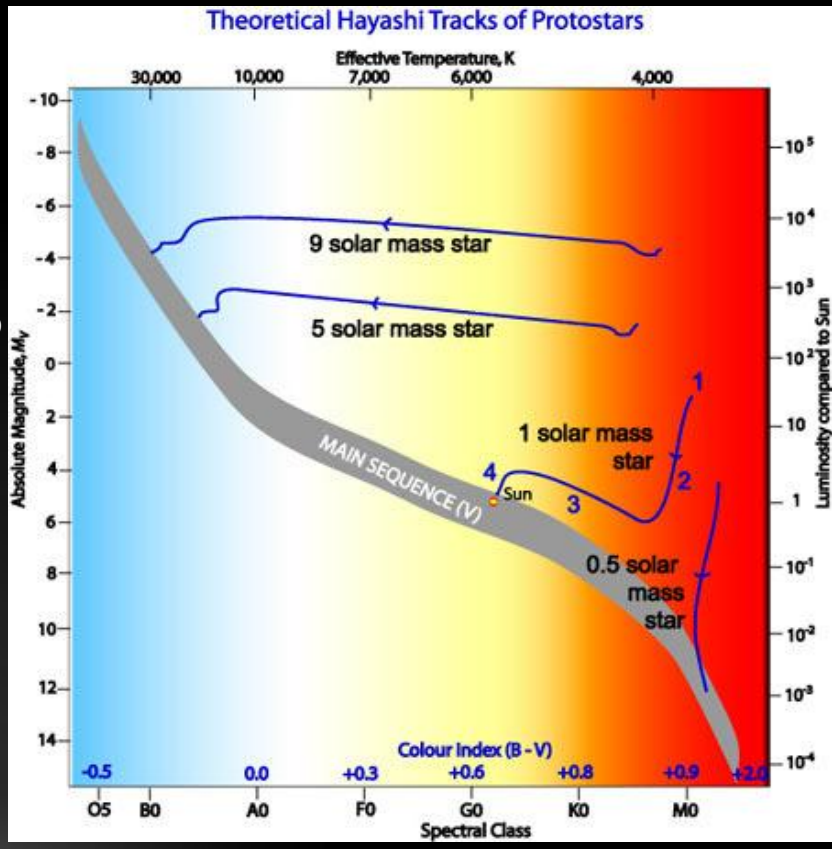
NARODZINY GWIAZDY

W rozgrzanej do temperatury 10 mln stopni protogwiezdzie rozpoczynają się reakcje syntezy wodoru. Rodzi się gwiazda.

Astrofizyk japoński Chushiro Hayashi zaproponował ścieżki protogwiazd do ciągu głównego

Etapy tworzenia na przykładzie gwiazdy o masie 1 x Słońca

- Pkt. 1. Początkowe zagęszczanie chmury powoduje, że materia się nagrzewa i staje się protogwiazdą. Choć jest stosunkowo chłodna to jest bardzo duża, około 20 x średnica Słońca. Jej powierzchnia jest tak wielka, że jego ogólna jasność jest bardzo duża, może 100 × większa niż jasność gwiazdy w ciągu głównym
- odc. 2. Protogwiazda się ciągle zapada, energia grawitacyjna ją podgrzewa. Jej temperatura rośnie jednak ogólna jasność spada ponieważ jej objętość się zmniejsza (odcinek 2 na diagramie H-R)
- odc. 3. Gdy temperatura jądra osiągnie 10.000.000 K, siły kulombowskie odpychania między zjonizowanymi jądrami wodoru (protony) zostają pokonane i rozpoczyna się synteza jądrowa. Protony łączą się tworząc jądra helu, następuje uwalnianie ogromnej energii. Rodzi się gwiazda. Ciśnienie promieniowania rośnie ale nie jest wystarczające do pokonania sił grawitacji, gwiazda ciągle się zapada, temperatura rośnie. Gwiazda porusza się lekko w górę i na lewo na diagramie HR. Trwa to ponad 10 milionów lat.
- odc. 4. Ciągły wzrost temperatury jądra powoduje że tempo fuzji (reakcji termojądrowej) w jądrze wzrasta. Ciśnienie promieniowania w końcu równoważy siły grawitacji. Gwiazda osiąga stan równowagi hydrostatycznej i osiada na ciągu głównym.



W ciągu głównym każda gwiazda przebywa tak długo jak wystarczy jej wodoru jako paliwa.
Typ widmowy nowej gwiazdy, jej temperatura powierzchni i jasność zależą od masy materii z której gwiazda powstała

DŁUGOŚĆ ŻYCIA GWIAZD

- Gwiazdy ciągu głównego mają różną masę.
- Wydawać by się mogło, że bardziej masywna gwiazda ma więcej paliwa więc może spędzić więcej czasu w ciągu głównym.
- Tak nie będzie - jest zupełnie odwrotnie.
- Bardziej masywne gwiazdy mają silniejszą siłę grawitacyjną więc do zapewnienia równowagi termostatycznej konieczna jest wyższe cisnienie i wyższa temperatura .
- Wyższe temperatury oznaczają, że reakcje jądrowe występują w znacznie większym tempie. W ten sposób bardziej masywne gwiazdy wykorzystują swoje paliwo znacznie szybciej niż gwiazdy o mniejszej masie.

CZAS PRZEBYWANIA GWIAZDY W CIĄGU GŁÓWNYM ORAZ JASNOŚĆ, TEMPERATURA POWIERZCHNI I PROMIEŃ W ZALEŻNOŚCI OD MASY GWIAZDY

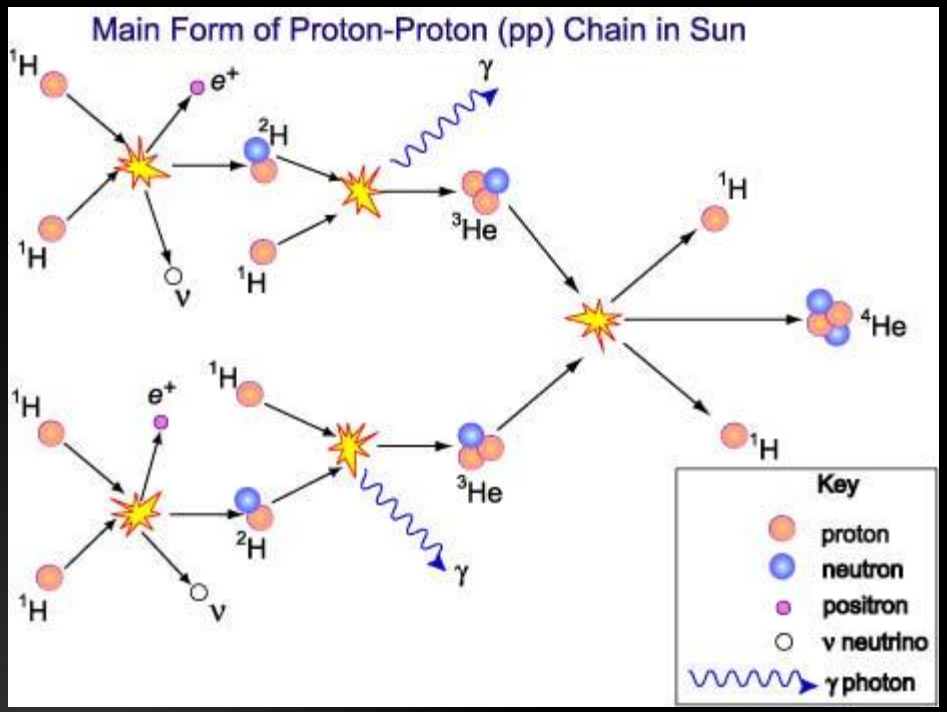
Masa / $M_{słońca}$	Jasność/ $L_{Słońca}$	Temperatura powierzchni (K)	Promień / $R_{Słońca}$	Ciąg główny Trwałość (lata)
0,10	3×10^{-3}	2.900	0,16	2×10^{12}
0,50	0,03	3.800	0,6	2×10^{11}
0,75	0,3	5.000	0,8	3×10^{10}
1,0	1	6.000	1,0	1×10^{10}
1,5	5	7.000	1,4	2×10^{9}
3	60	11.000	2,5	2×10^{8}
5	600	17.000	3,8	7×10^{7}
10	10.000	22.000	5,6	2×10^{7}
15	17.000	28.000	6,8	1×10^{7}
25	80.000	35.000	8,7	7×10^{6}
60	790.000	44.500	15	$3,4 \times 10^{6}$

- Nie każda protogwiazda wejdzie do ciągu głównego i tym samym zostanie gwiazdą.
- Protogwiazda o masie mniejszej niż 0,08 masy Słońca nie osiągnie temperatury pozwalającej na rozpoczęcie reakcji termojądrowej. Taki obiekt skończy swoje życie jako Brązowy Karzeł.
- Określa się je czasem (potocznie) mianem niewypałów, nieudanych gwiazd bądź superplanet.
- Pierwszego brązowego karła, Gliese 229B, zidentyfikowano w 1995 roku.
- Szacuje się, że w naszej Galaktyce istnieje dwukrotnie więcej brązowych karłów niż zwykłych gwiazd, ale ich łącza masa stanowi do 15% masy Galaktyki

- Niektórzy uczeni uważają, że na miano brązowego karła zasługują wszystkie obiekty, które formują się podobnie jak gwiazdy, bezpośrednio z zapadającej się chmury pyłu i gazu, a nie na skutek kolizji mniejszych ciał. Takie zjawiska mogą też zachodzić w dyskach protoplanetarnych i niewykluczone, że w ten sposób powstały np. Jowisz i Saturn. Ta definicja ma więc poważną wadę – na jej podstawie można by uznać wszystkie gazowe olbrzymy za mało masywne brązowe karły.
- Obecnie przyjęta robocza definicja stwierdza, że każde ciało nie będące gwiazdą, o rzeczywistej masie powyżej 13 mas Jowisza (przy zawartości metali takiej jak w przypadku Słońca), jest brązowym karłem.

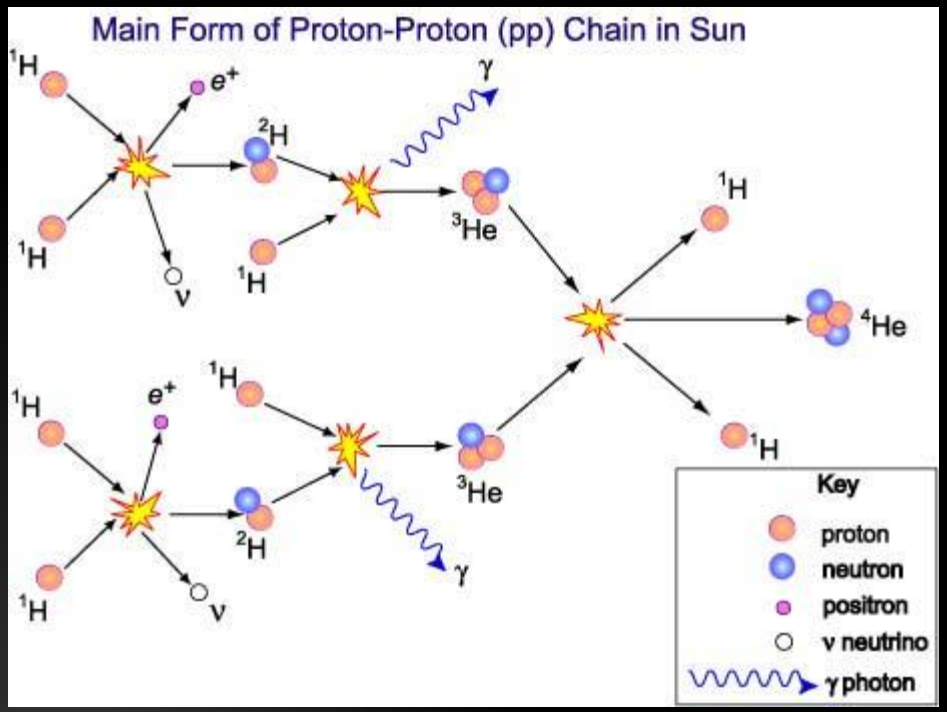
REAKCJE TERMOJĄDROWE

- Główny proces odpowiedzialny za wytwarzanie energii w większości gwiazd ciągu głównego jest łańcuch proton-proton (pp).
- Efekt procesu - z czterech jąder wodoru powstaje jedno jądro helu.
- Jest dominującym procesem w naszym Słońcu i wszystkich gwiazd o masie mniejszej niż 1,5 mas Słońca.
- Stanowi on 85% energii termojądrowej wytwarzanej w Słońcu.



REAKCJE TERMOJĄDROWE

- W wyniku reakcji syntezy oprócz wysokoenergetycznych fotonów gamma powstają neutrina i pozytony.
- Chociaż łańcuch pp obejmuje fuzję jąder wodoru, jądra gwiazd nadal zawierają elektrony.
- Gdy pozyton powstały w wyniku reakcji syntezy zderza się z elektronem, następuje anihilacja - zdarzenie, w którym oba się unicestwiają, uwalniając jeszcze więcej wysokiej energii fotonów gamma.

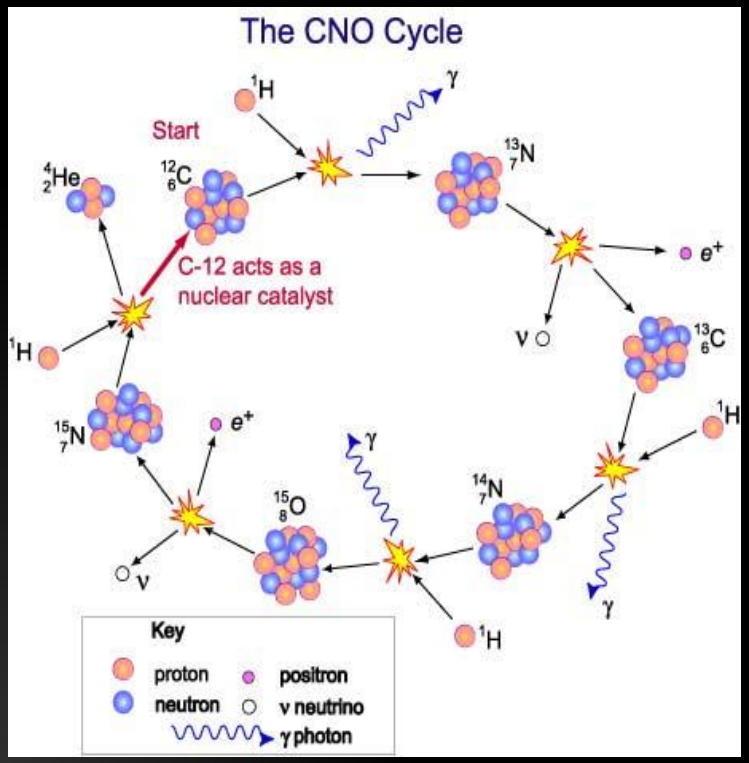


REAKCJE TERMOJĄDROWE

- Aby mogły zachodzić reakcje syntezy termojądrowej cząstki muszą zbliżyć się na tyle by mogły działać siły jądrowe.
- Dwa dodatnio naładowane jądra wodoru (protony) odpychają się zgodnie z prawem Kulomba. Do pokonania bariery potencjału potrzeba energii około 1,4 MeV.
- Zderzające się protony mają zazwyczaj energię mniejszą od energii potrzebnej do pokonania bariery potencjału elektrycznego. We wnętrzu Słońca gdzie panuje temperatura około 15 mln K średnia energia kinetyczna cząsteczek wynosi około 1 keV. ale istnieje prawdopodobieństwo, że zderzające się protony przenikają przez nią w wyniku zjawiska kwantowego zwanego tunelowaniem (Gamow).
- Dzięki temu pomimo za małej energii niektóre cząstki mogą pokonywać barierę i inicjować reakcję. Jest to dodatkowo wydajny mechanizm regulowania reakcji.
- Zjawisko tunelowania pozwala w ogóle na "zaświecenie" gwiazdy. Bez niego protogwiazda nie rozwinęła by się w gwiazdę.

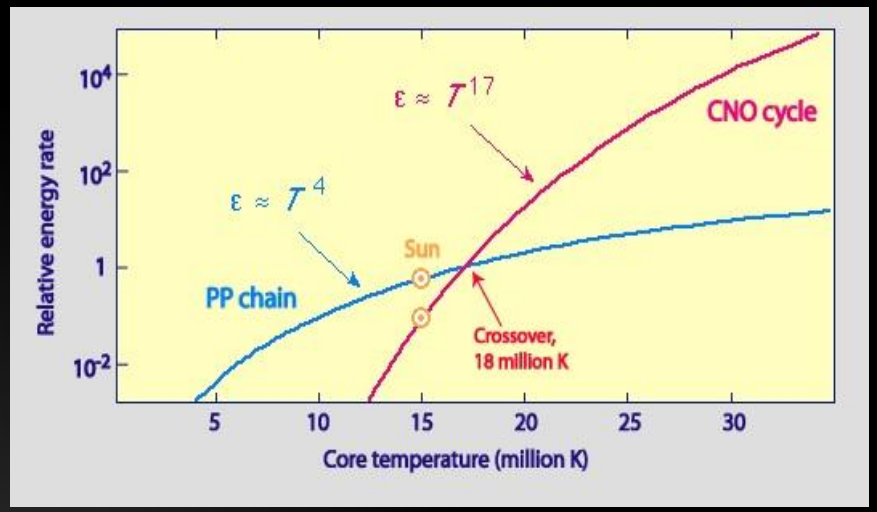
REAKCJE TERMOJĄDROWE

- Gwiazdy o masie około 1,5 masy Słońca lub więcej produkują większość energii przez inną postać fuzji wodoru, cykl węglowo-azotowo-tlenowy - CNO.
- Jak sama nazwa wskazuje, jest to proces cykliczny.
- Jądro węgla w tej reakcji pracuje jako katalizator.
- Jądro węgla w końcu cyklu pozostaje nie zmienione.



REAKCJE TERMOJĄDROWE

- *Dlaczego cykl CNO dominują gwiazdach o wyższej masie?*
- Odpowiedź związana jest z temperaturą. Pierwszy etap łańcucha p-p obejmuje połączenie dwóch protonów natomiast w cyklu CNO, proton ma fuzję z jądrem węgla C12.
- Węgiel ma sześć protonów, siły kulombowskie odpychania są większe. Wymagana jest większa energia kinetyczna do pokonania silniejszego odpychania. Oznacza to, że muszą mieć wyższą temperaturę do zainicjowania syntezy CNO.
- Gwiazdy o wyższych masach jądra mają silniejszą grawitację, co prowadzi do wyższych temperatur jądra.

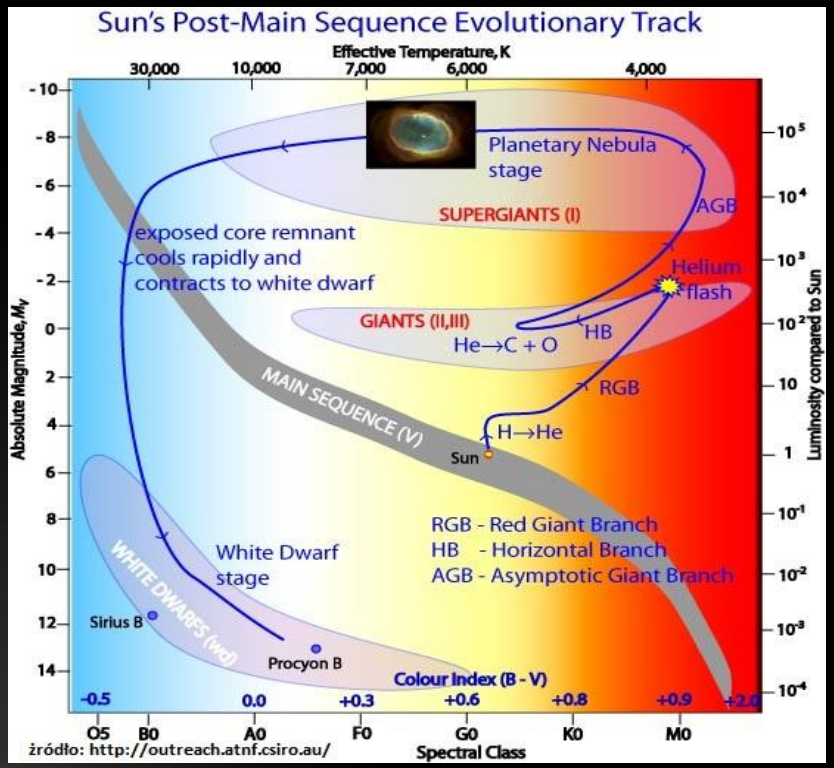


KOLEJNY ETAP EWOLUCJI

- *Co się dzieje, gdy gwiazda w ciągu głównym wypali cały wodór w jądrze ?*
- Zaczyna się kolejny etap ewolucji. Życie gwiazdy po wyjściu z ciągu głównego zależy od jej masy.
- Zaczniemy od spojrzenia na to, co dzieje się z gwiazdą o wielkości naszego Słońca.

CZERWONY OLBRZYM

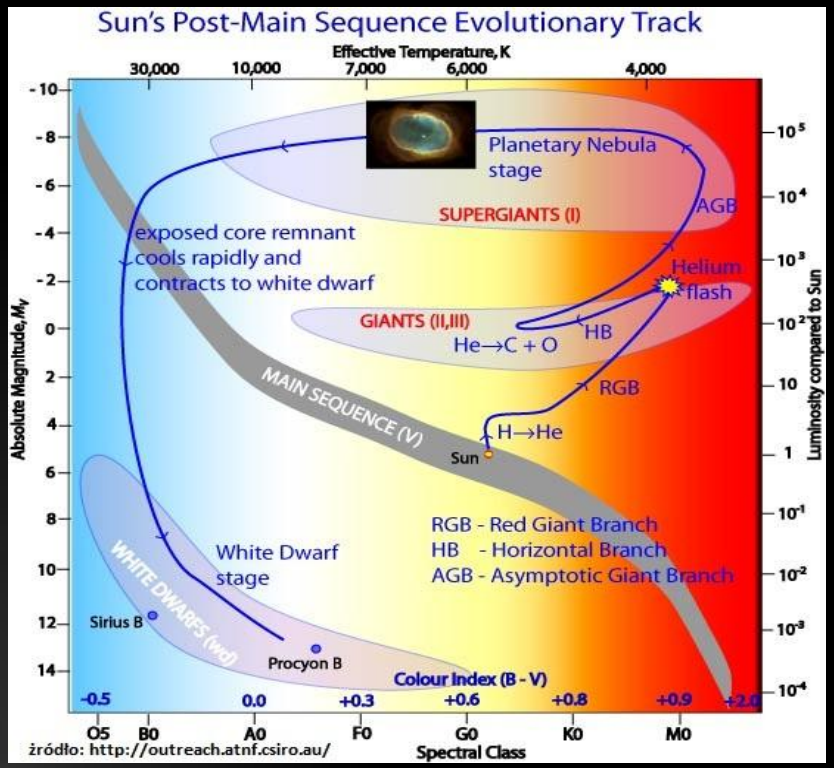
- Gdy wyczerpie się paliwo wodorowe w jądrze, reakcje w jądrze się zatrzymują. Ciśnienie promieniowania w jądrze maleje i rozpoczyna się jego kurczenie z powodu grawitacji.
- Rośnie temperatura jądra i za tym rośnie temperatura powłoki jądra.
- Podwyższona temperatura powłoki powoduje rozpoczęcie reakcji syntezy w powłoce jądra.
- Wyższa temperatura prowadzi do podwyższenia szybkości reakcji. Szybsza reakcja zwiększa jasność gwiazdy do 10 razy.
- Zewnętrzne warstwy gwiazdy się rozszerzają. Ze względu na ekspansję zewnętrznych warstw energia wytworzona w otoczce jądra jest rozłożona na znacznie większą powierzchnię a to z kolei powoduje obniżenie temperatury powierzchni i przesunięcie koloru gwiazdy w kierunku czerwonym.
- Gwiazda wchodzi w gałąź czerwonych olbrzymów diagramu H-R. (odcinek RGB)
- Hel który ciągle powstaje w otoczce jądra powiększa jądro. Zwiększające się siły grawitacji w jądrze powodują ciągłe zwiększanie jego temperatury.
- Ciągły wzrost temperatury jądra powoduję przyspieszanie reakcji w powłoce jądra a to z kolei powoduje powolne, ciągłe zwiększanie jasności i rozmiarów gwiazdy.



Odcinek RGB Red Giants Branch (gałąź czerwonych olbrzumów)

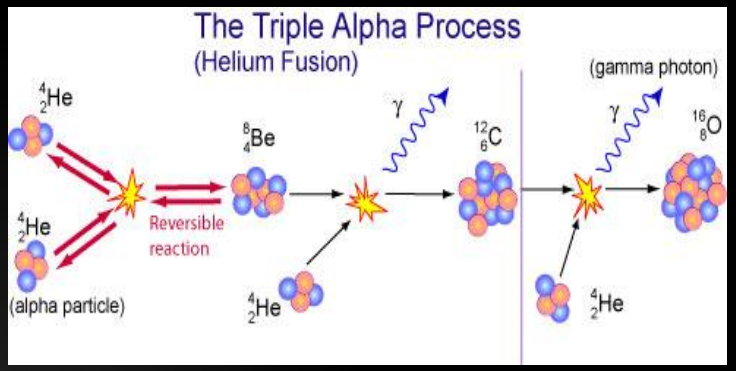
BŁYSK HELOWY

- Gdy masa jądra helowego wzrośnie do ok.0.5 mas Słońca, temperatura w jego wnętrzu osiąga ok.100 mln. K, co wystarcza do zapoczątkowania reakcji spalania helu. Zapalenie reakcji spalania helu jest dość gwałtowne (błysk helowy).
- Następuje okres spalania helu w jądrze i wodoru w otoczce jądra
- Temperatura powierzchni gwiazdy rośnie ale jednocześnie rozmiary gwiazdy maleją w taki sposób że gwiazda ma w przybliżeniu stałą jasność. Gwiazda przesuwa się w lewo wzdłuż *poziomej gałęzi* na diagramie HR (odcinek HB Horizontal Branch – gałąź horyzontalna)
- Paliwa helowego wystarczy na około 100mln lat



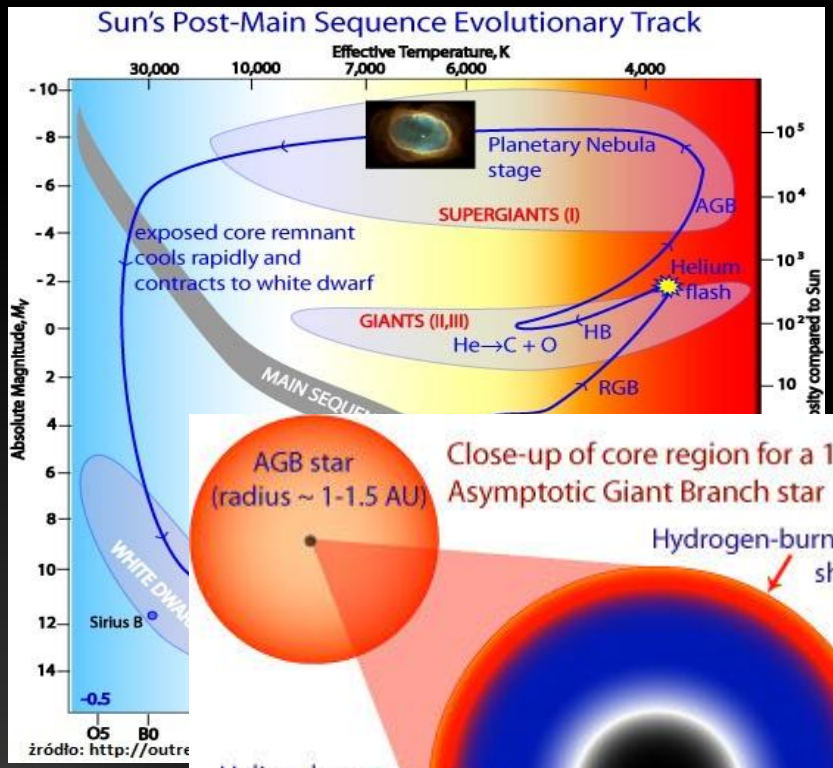
SPALANIE HELU

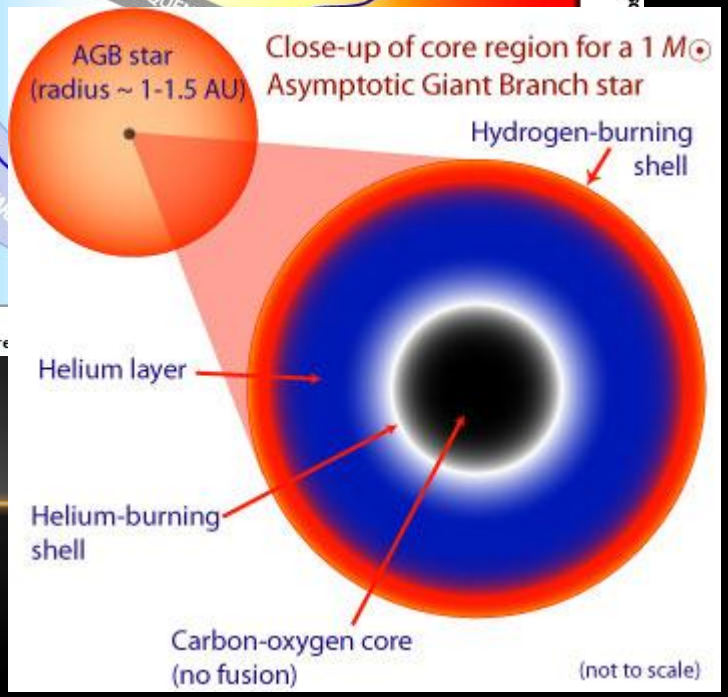
- Reakcja spalania helu nosi nazwę triple alpha process



CZERWONY NADOLBRZYM

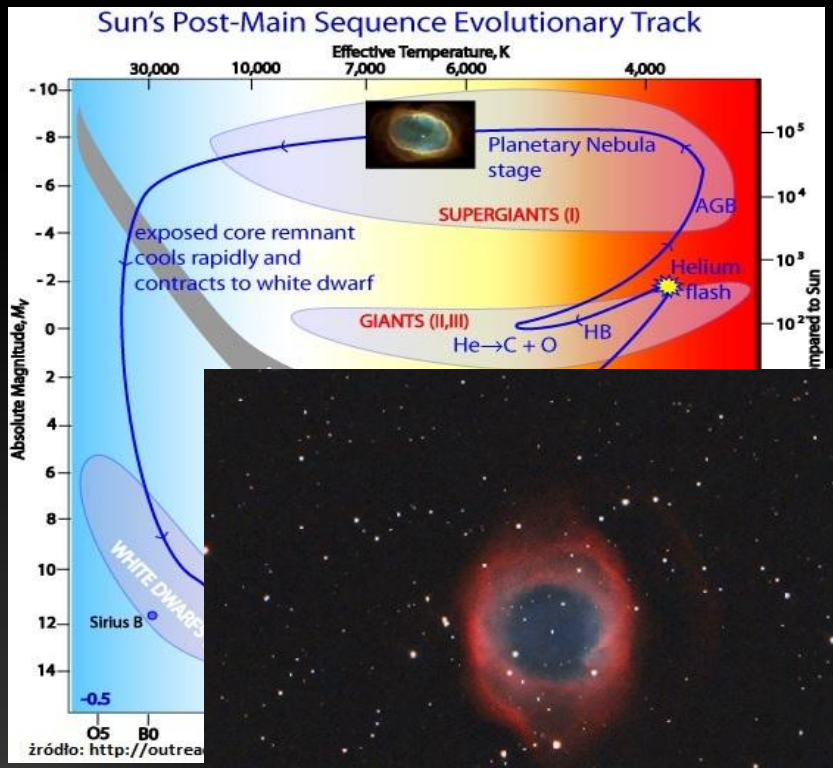
- Wraz ze zmniejszaniem się ilości helu w jądrze tempo syntezy helu w węgiel i tlen maleje i w końcu się zatrzymuje.
- Ciśnienie promieniowania w węglowo – tlenowym jądrze maleje i pod wpływem sił grawitacji jądro zaczyna się kurczyć.
- Temperatura jądra rośnie.
- Rozpoczyna się reakcja spalania helu w otoczce jądra.
- Nad otoczką helową znajduje się otoczka wodorowa w której zachodzą reakcje spalania wodoru.
- Gwiazda znowu powraca do obszaru na diagramie H-R zajmującego przez czerwone olbrzymy, z tym, że na tzw. gałąź asymptotyczną (odcinek AGB – Asymptotic Giant Branch).
- Gwiazda staje się czerwonym nadolbrzymem. Jej średnica może osiągnąć rozmiary orbity Marsa (ok. 1.5 JA).
- Na etapie AGB gwiazda traci znaczne ilości materii w formie wiatru gwiazdowego.





MGŁAWICA PLANETARNA

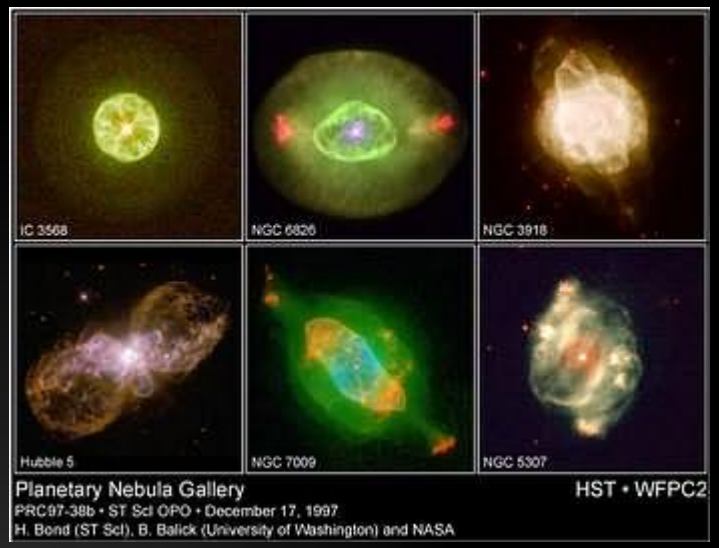
- Z czasem kończy się paliwo helowe w otoczce jądra
- Gwiazda zaczyna się kurczyć.
- Rośnie temperatura powierzchniowa i gwiazda przesuwa się na diagramie H-R w lewo
- Kiedy temperatura powierzchniowa staje się dostatecznie wysoka, jej **promieniowanie zaczyna jonizować materię** wyrzuconą w ostatnim stadium pobytu na gałęzi asymptotycznej.
- **Materia ta wtedy staje się widoczna w postaci mgławicy planetarnej**. Etap ewolucji, w której widoczna jest ta otoczka jest krótki (kilka do kilkunastu tysięcy lat).



Gwiazdy bardziej masywne osiągnęłyby temperaturę jądra pozwalającą na zapłon węgla ale gwiazda wielkości Słońca niestety po wypaleniu wodoru i helu powoli zbliża się do końca swojego życia.

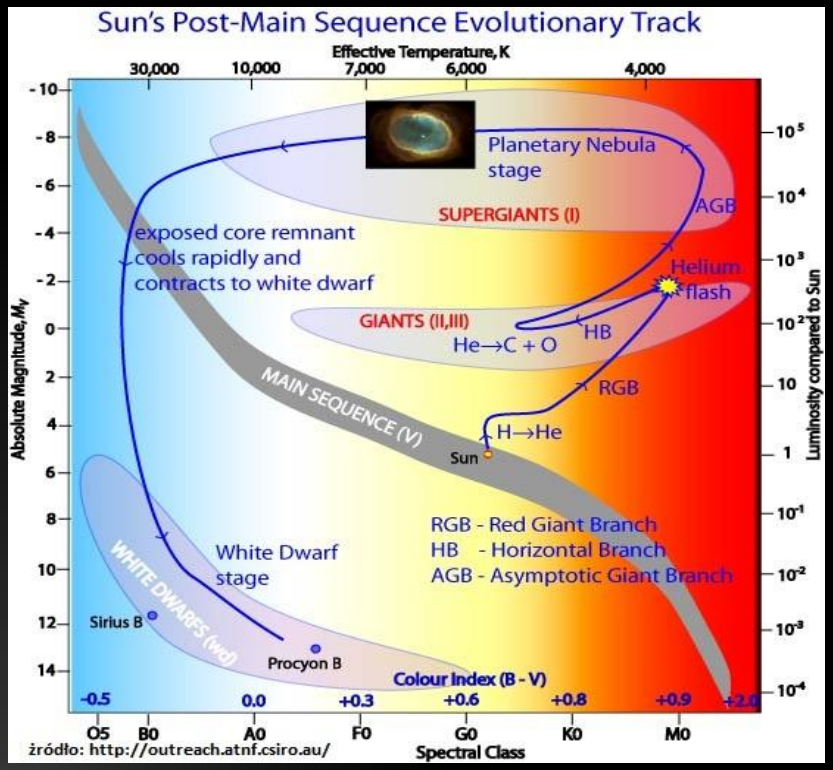
MGŁAWICA PLANETARNA

- Silne pola magnetyczne jąder gwiazd mogą mieć wpływ na kształt mgławic.
- Kolor mgławic ujawnia informacje na temat ich składu. Charakterystyczny niebiesko-zielony kolor pochodzi z podwójnie zjonizowanych emisji tlenu, OIII.
- Tlen, węgiel i inne elementy wyrzucone z otoczką w czasie AGB zasila materię międzygwiazdową (ISM) dla następnej generacji gwiazd.
- Jakaś część z węgla i tlenu w naszym organizmie może pochodzić z takich mgławic, reszta prawdopodobnie pochodzi z supernowych.



BIAŁY KARZEŁ

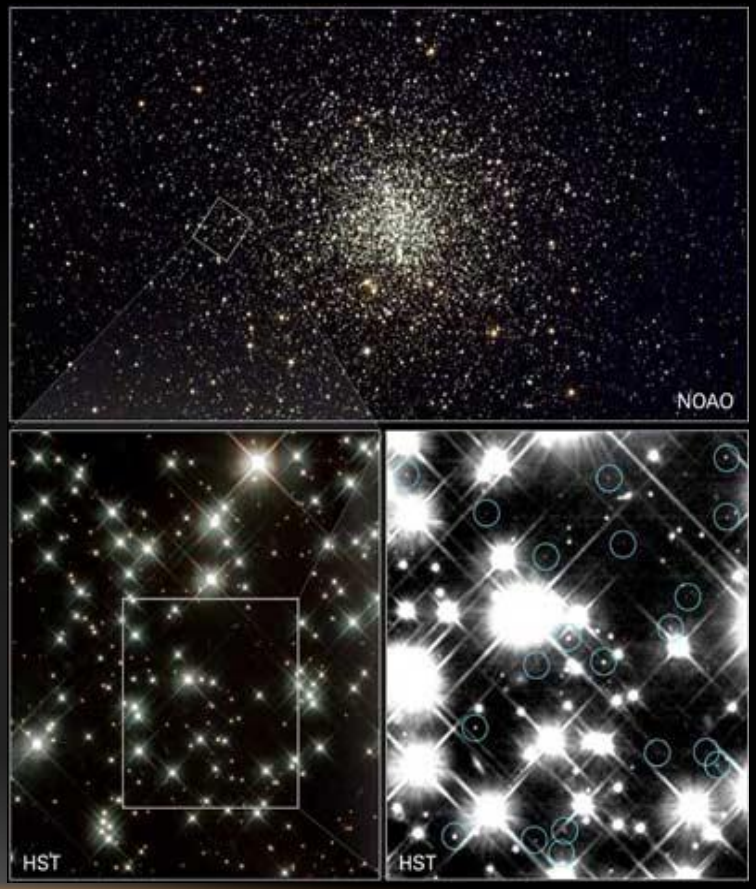
- Gwiazda po odrzuceniu zjonizowanej powłoki i utworzeniu mgławicy planetarnej to w zasadzie bardzo gorąca, gęsta kula z węgla i tlenu z powłoką wodorowo- helową
- Gwiazda szybko wypala resztki paliwa jakie pozostało w powłoce jądra. Początkowo, posiadając temperaturę około 30.000 K gwiazda może być 100 000 razy jaśniejsza od naszego Słońca jednak na skutek kurczenia się w ciągu setek lat traci 90% swojego blasku.
- Paliwo w jądrze jest już wykorzystane więc fuzja już się nie odbywa no i ciśnienie promieniowania nie zatrzymuje sił grawitacji, gwiazda się kurczy)
- Staje się gorącym białym karłem, który zaczyna powoli stygnąć.



BIAŁY KARZEŁ

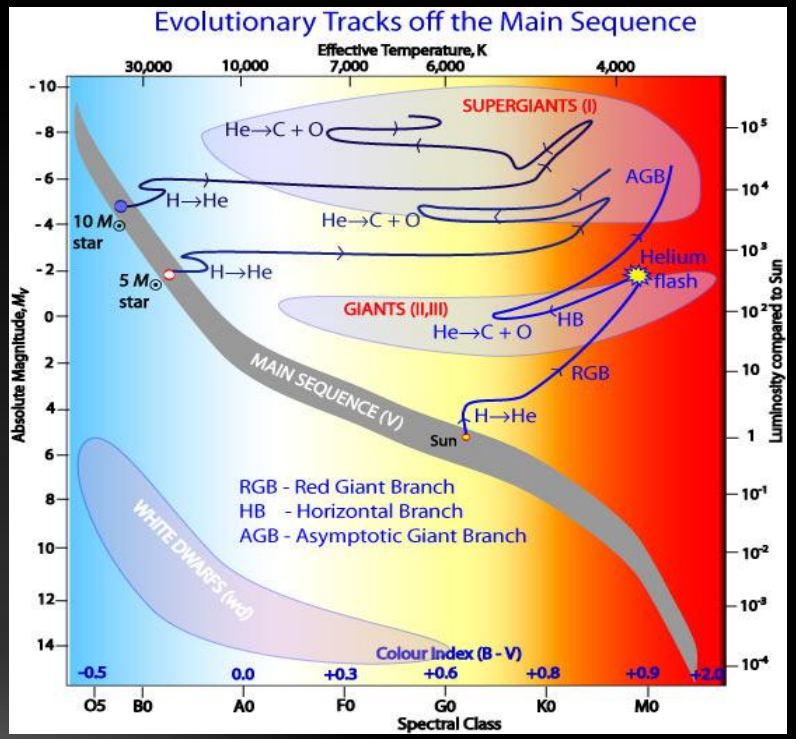
Białe karły mają niezwykłe właściwości.

- Po pierwsze, są one bardzo małe, ale bardziej masywne białe karły są mniejsze niż te mniej masywne. Wynika to z tego że bardziej masywne gwiezdne jądra mają silniejszą siłę grawitacji i kurczą się bardziej
- Biały karzeł o masie 0,5 słonecznej ma promień 1,9 × promienia Ziemi,
- Biały karzeł o masie Słońca ma promień 1,5 x promień Ziemi
- Biały karzeł o masie 1,3 słonecznej ma promień 1,4 promienia Ziemi.
- Cięższych białych karłów nie ma. Jądro o masie większej niż 1.4 masy Słońca zapada się głębiej tworząc gwiazdę neutronową lub czarną dziurę (limit Chandrasekhara)
- Biały karzeł składa się z atomów i jonów tlenu i węgla zmieszanych z morzu zdegenerowanych elektronów. To ciśnienie zdegenerowanych elektronów uniemożliwia dalsze zapadanie.
- **Biały karzeł o masie zbliżonej do masy Słońca jest niewiele większy od Ziemi**. Ma bardzo dużą gęstość: 10^{9} kg m^{-3}
- **Gęstość jest milion razy większa od wody**.



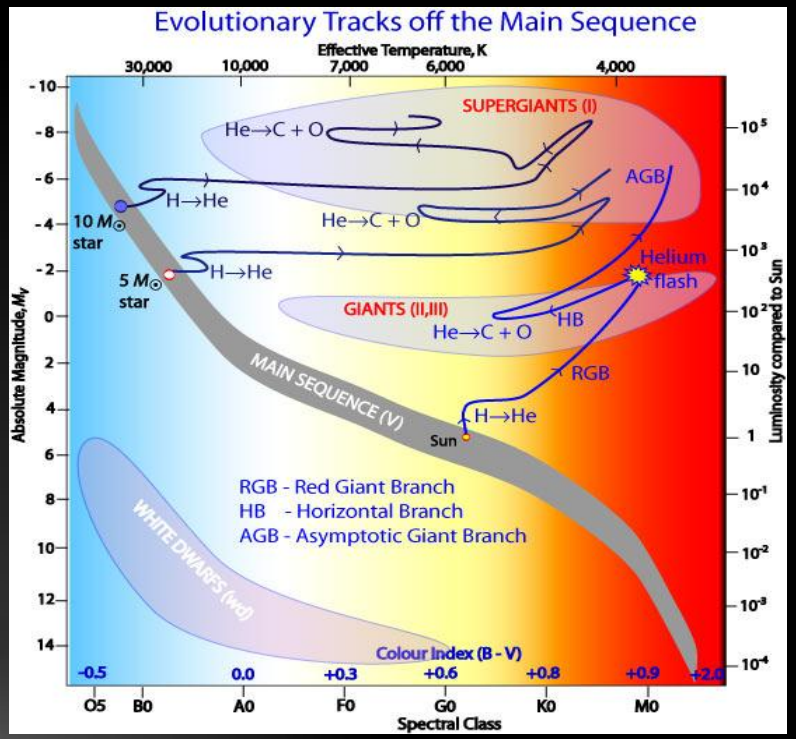
EWOLUCJA GWIAZD MASYWNIEJSZYCH OD SŁOŃCA

- Ewolucja bardzo masywnych gwiazd w ciągu głównym jest skomplikowanym procesem i nie jest jeszcze w pełni poznana. Takie gwiazdy są rzadkie, żyją krótko w porównaniu do gwiazd niższej masy.
- Nadolbrzymy np. Betelgeuse, Deneb, Rigel i Antares są jednymi z najbardziej znanych gwiazd naszego nieba, bardzo odległe ale widoczne ze względu na ich dużą jasność absolutną.
- Wysoka masa gwiazd powoduje szybkie spalanie wodoru. Takie gwiazdy w ciągu głównym pozostają przez miliony, a nie miliardy lat.
- Kiedy to paliwo wodorowe w jądrze jest wykorzystywane gwiazda wychodzi z ciągu głównego.
- Jądro się kurczy i nagrzewa. Następstwem wysokiej temperatury jądra jest spalanie helu w jądrze. W przeciwieństwie gwiazd niższej masy, fuzja helu (proces triple-alpha) zaczyna się stopniowo, a nie formie błysku helowego.



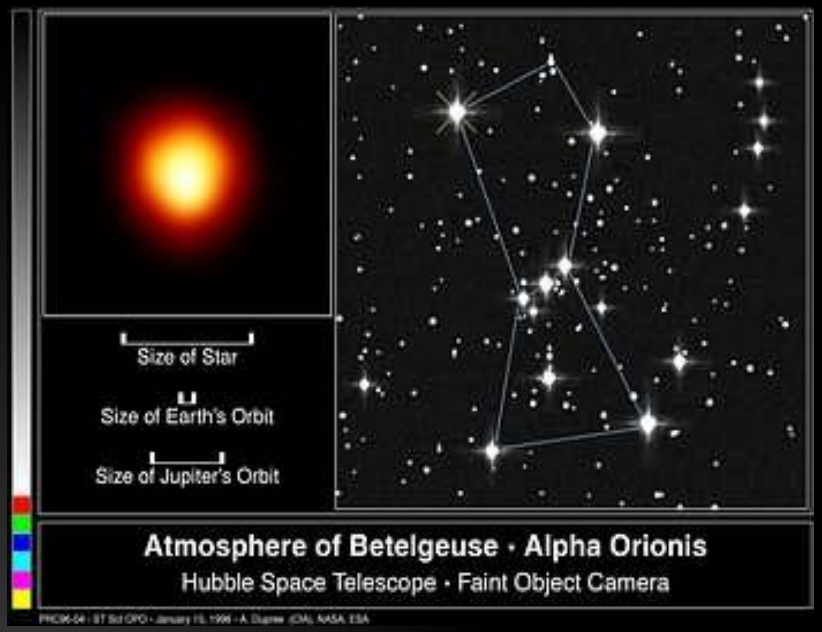
NADOLBRZYMY

- Temperatura powierzchni gwiazdy spada a jej powłoka się rozszerza. Spadek temperatury równoważy zwiększoną objętość, całkowita moc promieniowania pozostaje w przybliżeniu stała.
- Gwiazda porusza się poziomo w regionie nadolbrzyma na diagramie HR, jak pokazano na rysunku.
- Energia wyzwolona przez syntezę helu w węgiel w jądrze podnosi temperaturę jądra i otoczki jądra. W otoczce jądra trwa reakcja syntezy wodoru w hel.



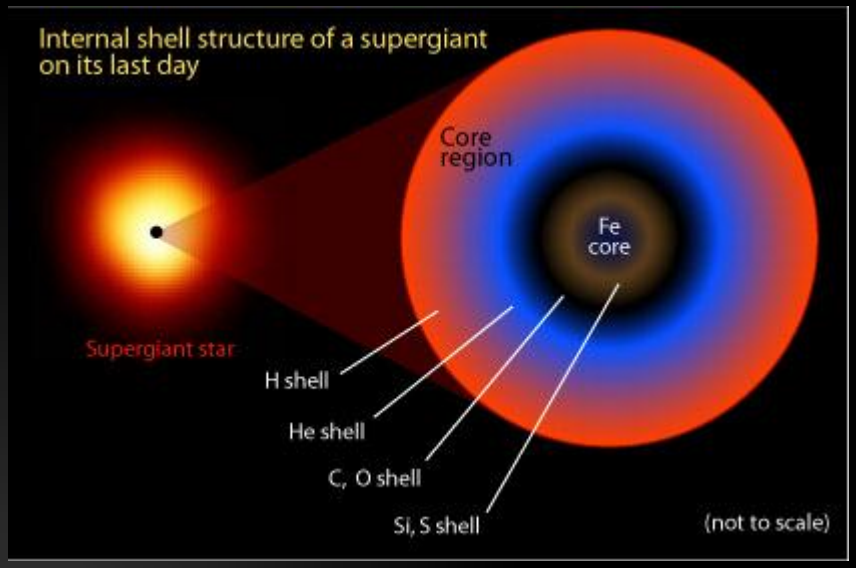
NADOLBRZYMY

- Rozmiar nadolbrzymów jest ogromny. Betelgeuse, o masie od 13 do 17 mas Słońca, jest tak duża, że jej powłoka rozciągnęła by się poza orbitę Jowisza (gdyby była w miejscu naszego Słońca)
- Jej rozmiary kątowe są tak duże że może być fotografowana bezpośrednio przez HST (do pomiarów rozmiarów kątowych gwiazd zwykle stosuje się metody interferometryczne).



NADOLBRZYMY

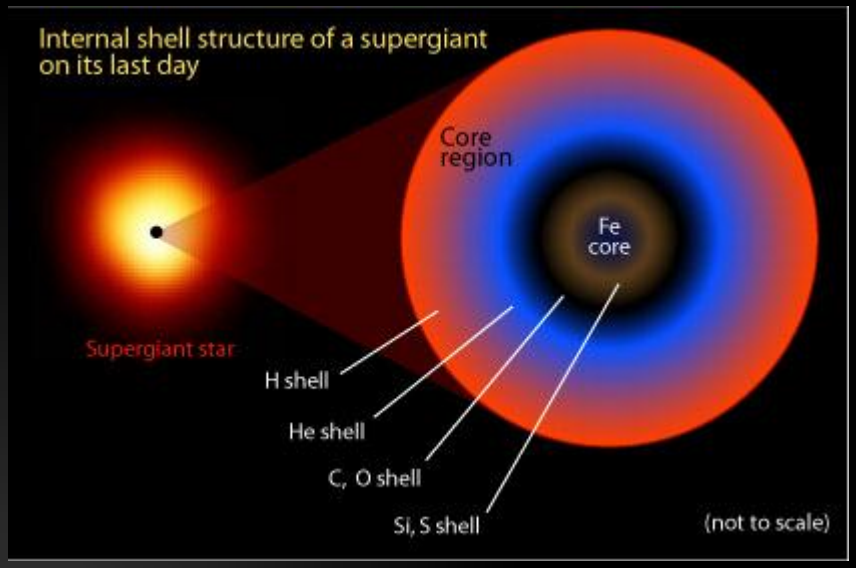
- W gwiazdach o masie 5 mas Słońca lub wyższej, po spaleniu helu w jądrze, grawitacja jest tak duża że jest w stanie wytworzyć temperaturę 300 mln K (3×10^{8} K).
- W takiej temperaturze rozpoczyna się spalanie węgla do tlenu.
- Gwiazda o masie 8 mas Słońca lub więcej po spaleniu tlenu może utrzymać reakcję syntezy do cięższych pierwiastków w jądrze.
- Jądro nabiera strukturę warstwową



NADOLBRZYMY

Kolejne cykle reakcji termojądrowych w jądrach masywnych gwiazd:

- Spalanie wodoru - ciąg główny, miliony lat
- Spalanie helu do węgla i tlenu (triple alpha process) - dziesiątki tysięcy lat
- Spalanie węgla do tlenu - setki lat
- Spalanie tlenu do krzemu - kilka lat/miesięcy
- Spalanie krzemu do żelaza - kilka tygodni/dni
- żelazo nie jest paliwem termojądrowym - cykl **musi** się zakończyć : dochodzi do *kolapsu*



Podane długości spalania poszczególnych rodzajów paliw zależą od masy gwiazdy. Im większa masa gwiazdy tym szybciej spala się paliwo. Te czasy należy traktować jako porównanie długości spalania poszczególnych paliw.

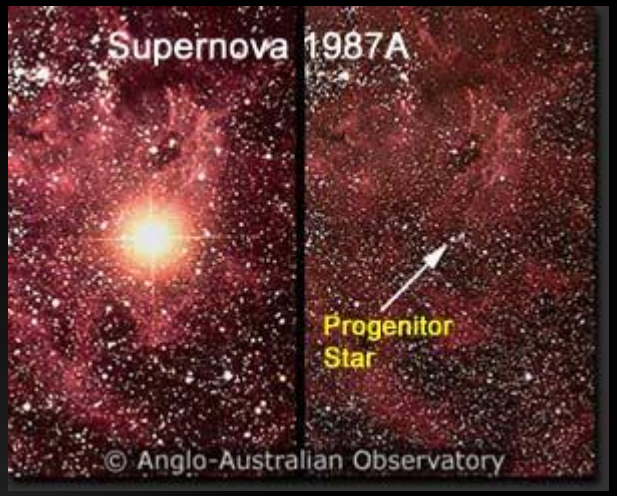
SUPERNOWA

Masywne gwiazdy żyją szybko, umierają młodo i z hukiem.

Zależnie od masy gwiazdy istnienie wiele scenariuszy zakończenia życia.

Na ten temat można stworzyć oddzielny wykład (może na następnym zlocie)

Przedstawię jeden z możliwych scenariuszy wybuchu bardzo masywnej gwiazdy - supernowej typu II.

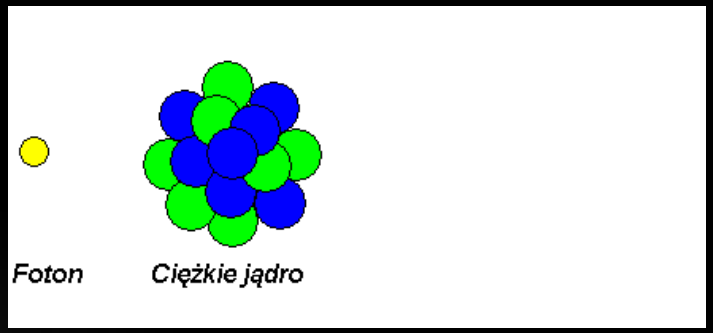


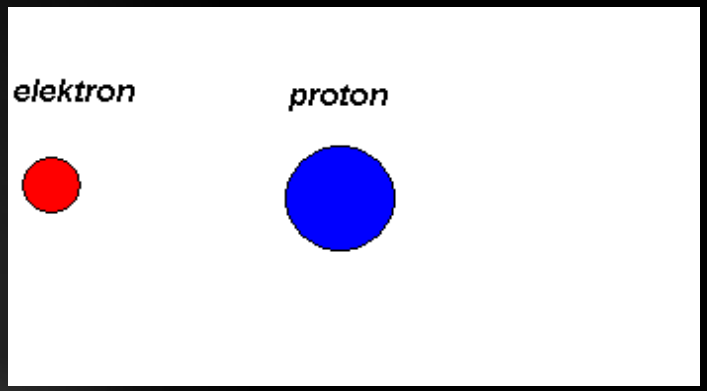
SUPERNOWA

- W ostatnich etapach istnienia nadolbrzyma, po wypaleniu krzemu i zatrzymaniu reakcji termojądrowych w jądrze, zmniejsza się ciśnienie promieniowania – jądro zaczyna się kurczyć. Powoduje to wzrost temperatury jądra (energia grawitacyjna zapadającej się materii zamienia się w energię kinetyczną elektronów i jąder atomów żelaza)
- Gdy temperatura w jądrze gwiazdy dojdzie do 10 mld K (10^{10}K) pod wpływem wysoko energetycznych fotonów gamma żelazo ulega procesowi **fotodezintegracji** (photodisintegration, fotorozpad) zwalniając protony i cząstki alfa (jądra helu). Jądra atomów żelaza po prostu się rozpadają.
- Fotodezintegracja raczej pochłania energię niż ją uwalnia dlatego ciśnienie w jądrze spada.
- Na skutek obniżęnia ciśnienia i bardzo silnej grawitacji żelazowe jądro kurczy się (a raczej się zapada) **z prędkością dziesiątek tysięcy kilometrów na sekundę.**
- W tak wysokich temperaturach, zdegenerowane elektrony nie mogąc złamać zakazu Pauliego, ściskane siłami grawitacji reagują z protonami powstałymi w wyniku fotorozpadu (fotodezintegracji).
- Zachodząca reakcja

$$e^- + p^+ \rightarrow n^0 + \nu_e$$

wychwytuje wszystkie zdegenerowane elektrony w jądrze. Ten proces nosi nazwę **neutronizacja.**





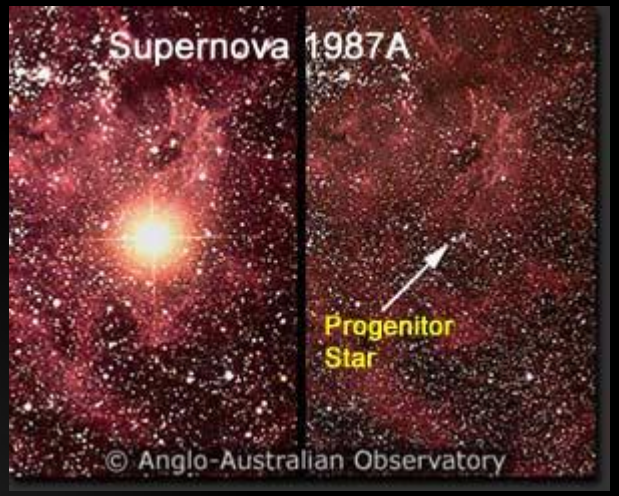
SUPERNOWA

- Znika ciśnienie zdegenerowanych elektronów, zapadanie jądra trwa dalej, temperatura jądra ciągle rośnie.
- **Gdy temperatura dojdzie do 1 biliona K** (10^{12} K) neutrony stają się zdegenerowane.
- Ciśnienie zdegenerowanych neutronów gwałtownie zatrzymuje zapadanie jądra.
- Otaczająca materia wciąż się zapada i uderza w lite, sztywne jądro tworząc ogromną falę uderzeniową.
- Energia 10^{46} J jest uwalniana w ciągu kilku sekund. To jest 50 x więcej niż Słońce wytwarza w ciągu 10 mld lat świecenia w ciągu głównym.
- W wyniku wybuchu gwiazda może stracić od 20 do 80% swojej masy

Na zdjęciu supernowa SN2011dh w galaktyce M51, odkryta 31 maja 2011.
Chociaż galaktyka M51 znajduje się w odległości około 25 mln lat świetlnych od Ziemi to gwiazda przez kilka tygodni była wyraźnie widoczna.

SUPERNOWA

- Większość energii jest uwalniana w postaci neutrin, tylko 1 % to widzialne światło.
- To wystarcza żeby **gwiazda pojaśniała 100 mln razy** przewyższając blaskiem całą galaktykę przez kilka dni do kilku tygodni.
- Obserwatorium Kamiokande II Neutrino Observatory, zakopane głęboko pod góra w Japonii **wykryło 12 neutrin** w lutym 1987r związanych z wybuchem supernowej typu II SN1987A w Wielkim Obłoku Magellana. To były pierwsze zarejestrowanie przez ziemskie obserwatoria neutrina, pochodzące z kosmosu ze źródła innego niż Słońce.
- Była to niezwykła supernowa bo pierwszy raz od 1604 roku widoczna gołym okiem (osiągnęła jasność 3 MAG)



FABRYKA PIERWIASTKÓW

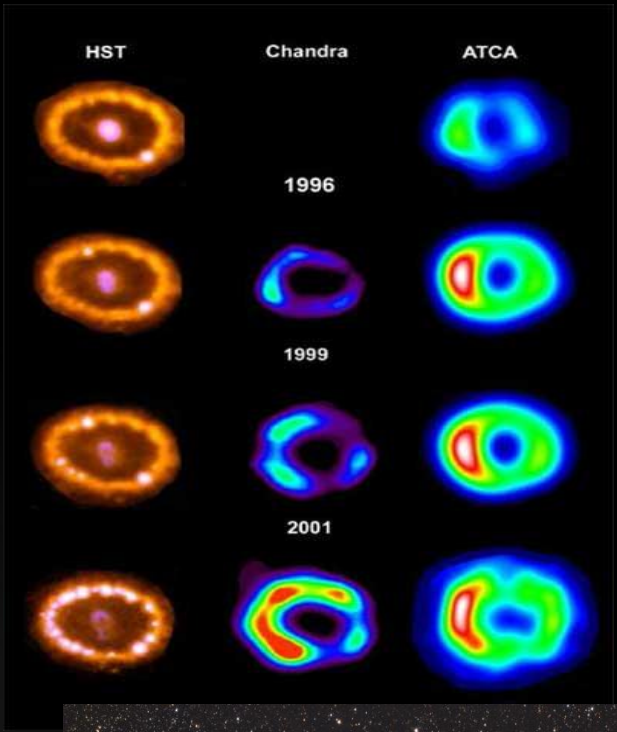
- Podczas końcowego zniszczenia gwiazdy w wybuchu supernowej, z jąder żelaza jest uwalniany wysoki strumień neutronów.
- Te neutrony mogą zostać przechwycone przez wiele ciężkich jąder do produkcji innych jąder w reakcji jądrowej zwanej **r-proces (rapid neutron captures process – szybki wychwyt neutronów).**
- Proces powstawania jąder o większej liczbie atomowej w reakcji r polega zazwyczaj na:

  Szybkim wychwycie przez jądro wielu neutronów i powstaniu niestabilnego nuklidu bogatego w neutrony.

  Serii spontanicznych rozpadów β^- prowadzących do powstania stabilnego nuklidu (jądra atomowego).
- W procesie r, jądro przyłącza kolejne neutrony aż do osiągnięcia stanu marginalnej stabilności, w którym energia wiązania kolejnego neutronu byłaby równa zeru.
- W ten sposób **powstają ciężkie pierwiastki takie jak ołów, złoto aż do uranu**.
- Destrukcyjne wydarzenie jakim jest wybuch supernowej nie tylko tworzy nowe pierwiastki ale zapewnia mechanizm skutecznego ich rozpraszania w przestrzeni.
- Wszystkie pierwiastki cięższe od żelaza powstały **w ostatnich sekundach życia masywnej gwiazdy**

POZOSTAŁOŚCI PO SUPERNOWEJ

- Materiał wyrzucony z supernowej zawiera wodór, hel i wiele innych pierwiastków wytworzonych w gwieździe. Masywne gwiazdy odrzucają ich w dużych ilościach jeszcze przed ostatecznym wybuchem.
- Ten wcześniej wyrzucony materiał wraz z ISM (materią międzygwiazdową) następnie uderzony przez falę uderzeniową ostatecznego wybuchu i materiału wyrzucanego podczas wybuchu tworzy pozostałość po supernowej (SNR - supernova remnand).
- Końcowy wybuch rozpędza materię do prędkości wielu milionów km/h. Kiedy ten materiał trafi na wcześniejszą chmurę to kompresuje ją i nagrzewa do 1 mln K w wyniku zmiany energii kinetycznej. W tej temperaturze SNR promieniuje w wielu zakresach.
- Materia powstała w wybuchu zasila ISM powodując że kolejne generacje gwiazd mają więcej metali niż pierwotne gwiazdy.



Na górnym obrazku widać ekspansję pozostałości SNR z SN 1987A w świetle widzialnym (HST), zakresie rentgenowskim (Chandra) i zakresach radiowych (ATCA). (Nie ma zdjęcia z teleskopu Chandra z roku 1996 bo tego teleskopu jeszcze nie było).

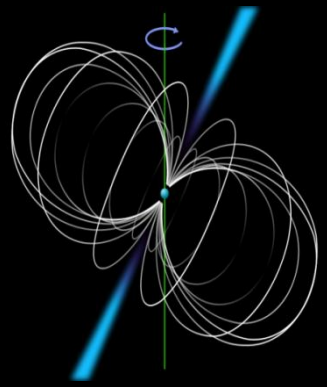
Najbardziej znane przykłady takiej pozostałości to Veil i Krab.

GWIAZDY NEUTRONOWE

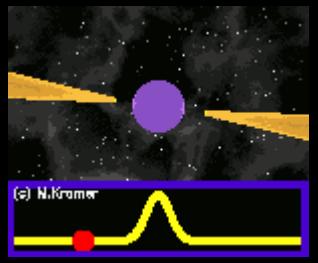
- Jak potoczą się losy pozostałego jądra zależy od jego masy.
- Fotodezintegracja żelaza spowodowała że w jądrze jest masa neutronów. Neutrony w jądrze są w formie zdegenerowanej materii. Zapadanie (kolaps) jądra został zatrzymany przez ciśnienie degeneracji neutronów.
- Jeżeli masa jądra jest mniejsza niż 3 masy Słońca to w wyniku powstanie gwiazda neutronowa.
- Gwiazdy neutronowe są zbudowane ze zdegenerowanej materii neutronowej o gęstości 10^{17} kg/m3. Naparstek tego materiału ma masę 1 miliard ton.
- Masa takiej gwiazdy może wynosić od 1,4 x masa Słońca (limit Chandrasekhara) do 3 mas Słońca. (Niektóre modele przewidują tu górną granicę 5 mas Słońca.)
- Średnica takiej gwiazdy wynosi około 10 -15km. Ze względu na zasadę zachowania momentu pędu taka gwiazda wiruje z prędkością kilkuset razy na sekundę.

PULSAR

- Tylko jeden rodzaj gwiazd neutronowych został zaobserwowany. Są to pulsary.
- Nazwa pulsar pochodzi od pulsującego źródła radiowego.
- Szybki obrót silnego, prawdopodobnie dipolowego pola magnetycznego powoduje powstanie wokół gwiazdy neutronowej intensywnego pola magnetycznego i magnetosfery. Ze względu na szybki obrót gwiazdy, stosunkowo niedaleko od jej powierzchni istnieje obszar ograniczający, tzw. "cylinder światła", w którym liniowa prędkość linii pola magnetycznego wirującego razem z gwiazdą osiąga prędkość światła, co przy okresie obrotu rzędu 0,01 sekundy jest możliwe już w odległości około 500 kilometrów od skorupy. Linie pola nie mogą zmieniać swego położenia z prędkością większą od prędkości światła, co oznacza, że nie mogą rozciągać się na odległość większą niż promień cylindra, ulegając ściśnięciu na granicy tego obszaru.



- Cząstki poruszające się wewnątrz magnetosfery są przyspieszane do prędkości relatywistycznych i wysyłają promieniowanie wewnątrz wąskiego stożka wzdłuż kierunku linii. Energia ta może być wypromieniowywana w całym zakresie widmowym - od promieniowania gamma do promieniowania radiowego. Model taki, nazywany modelem "latarni morskiej", jest powszechnie przyjętym opisem mechanizmu emisji promieniowania elektromagnetycznego pulsarów.



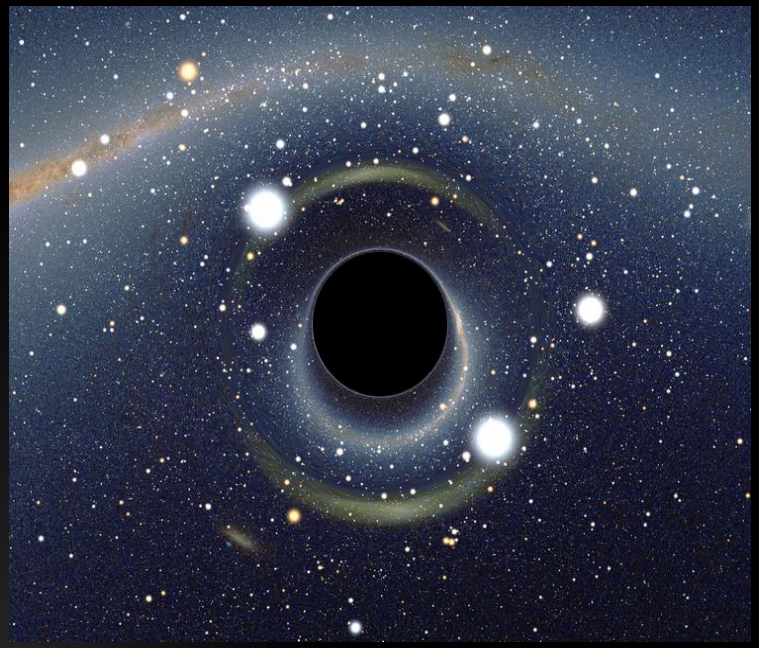
- Os obrotu pulsara nie jest wyrównana z biegunami magnetycznymi. Przy obrocie pulsara jedna z wiązek promieniowania może przeciąć kierunek Ziemi.
- Kilka pulsarów zostało zaobserwowanych w świetle widzialnym, gamma i zakresach rentgenowskich ale zdecydowana większość z pośród 1700 znanych pulsarów zostało odkrytych przez radioteleskopy.
- Najbardziej znany pulsar leży w mgławicy Krab i jest "widoczny" w zakresie widzialnym. Powstał z supernowej obserwowanej w 1054roku.

CZARNA DZIURA

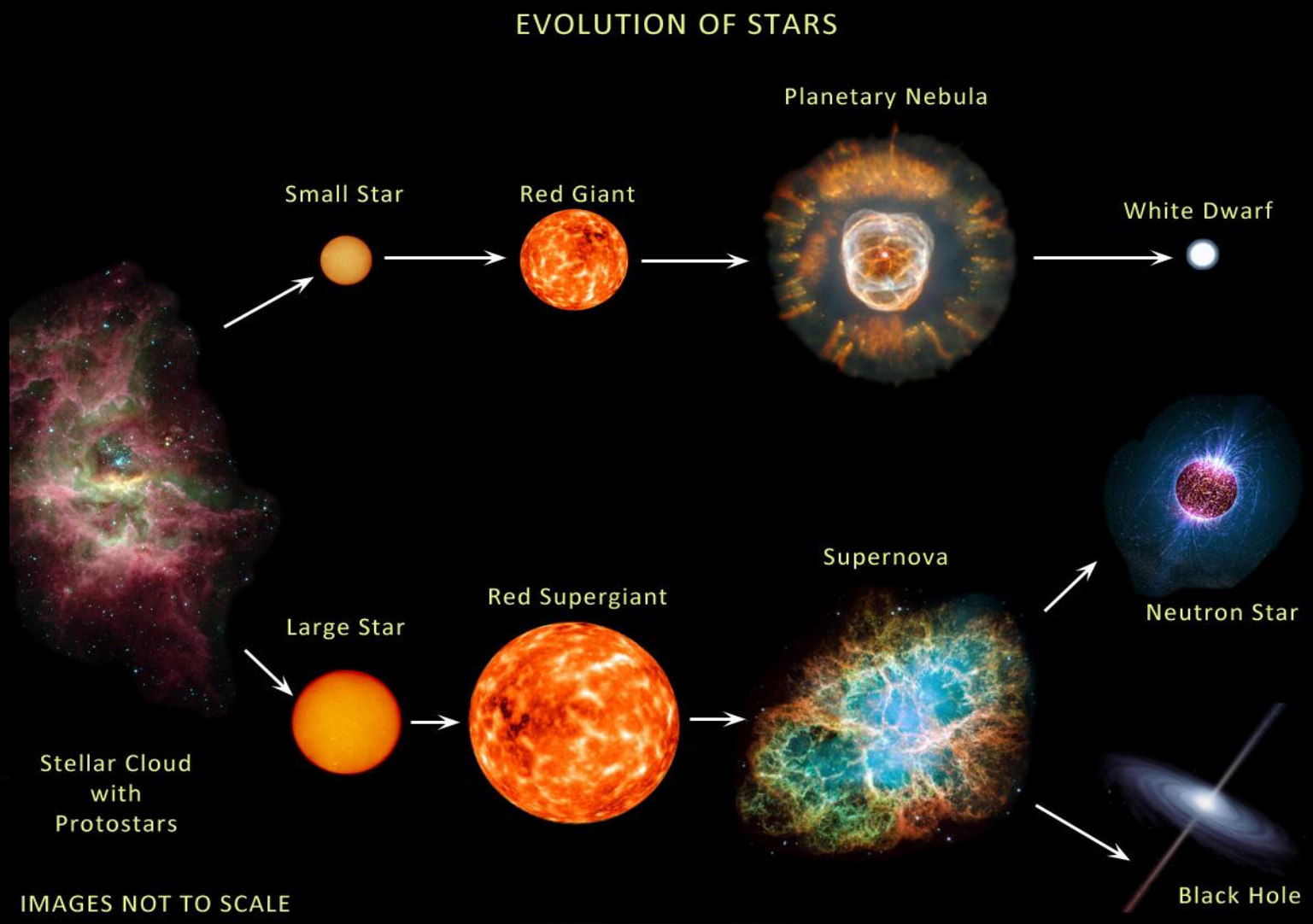
- Do tej pory mówiliśmy co się dzieje ze szczątkami gwiazdy o masie (tych szczątków) mniejszej niż 3 masy Słońca.
- Jeżeli masa pozostałego jądra jest mniejsza niż 1.4 mas Słońca to pozostaje Biały Karzeł. Z czasem stygnie i pozostaje czarny Karzeł.
- Jeżeli masa pozostałego jądra jest większa niż 1.4 mas Słońca ale mniejsza niż 3 masy Słońca to pozostaje Gwiazda Neutronowa.
- Jeżeli masa pozostałego jądra przekracza 3 masy Słońca siła grawitacji jest tak wielka, że ciśnienie degeneracji neutronów może zostać złamane. Jądro się dalej zapada aż zostanie skoncentrowane w punkcie - osobliwości.
- Ta osobliwość to Czarna Dziura.

CZARNA DZIURA

- Czarne dziury są bardziej egzotyczne niż gwiazdy neutronowe.
- Cała masa skupiona jest w jednym punkcie.
- Mają bardzo wysokie pole grawitacyjne.
- Są tak określane bo po przekroczeniu regionu zwanego horyzontem zdarzeń nawet światło nie może z nich uciec.
- Na horyzoncie zdarzeń prędkość ucieczki jest równa prędkości światła.



UPROSZCZONY SCHEMAT EWOLUCJI DWÓCH RODZAJÓW GWIAZD O KTÓRYCH OPOWIADAŁEM



EWOLUCJA GWIAZD O MAŁEJ MASIE

- Gwiazdy o małej masie Czerwone Karły (< 0,4 masy Słońca) konsumują wodór w jądrze znacznie wolniej.
- Czas przebywania w ciągu głównym może trwać dziesiątki a nawet setki miliardów lat.
- Gdy zużyją swój wodór jądrze, kurczenie się jądra pod wpływem grawitacji powoduje że jądro się nagrzewa.
- Gwiazdy te nie osiągną jednak wystarczającej temperatury do zapłonu reakcji syntezy helu w węgiel.
- Na krótki okres spalania wodoru w powłoce jądra następuje wzrost jej jasności. Staje się hipotetycznym Błękitnym Karłem (żaden Błękitny Karzeł nie mógł jeszcze powstać)
- Ostatecznie staje się Białym Karłem helowym i powoli stygnie. (zwykłe Białe karły są węglowe lub węglowo-tlenowe)

Źródła:

- http://outreach.atnf.csiro.au/education/senior/astrophysics/stellarevolution_hrintro.html
- http://essayweb.net/astronomy/blackhole.shtml
- http://aspire.cosmic-ray.org/labs/star_life/hr_interactive.html
- Eugeniusz Rybka "Astronomia Ogólna"
- Wikipedia

Dziękuję za uwagę ☺