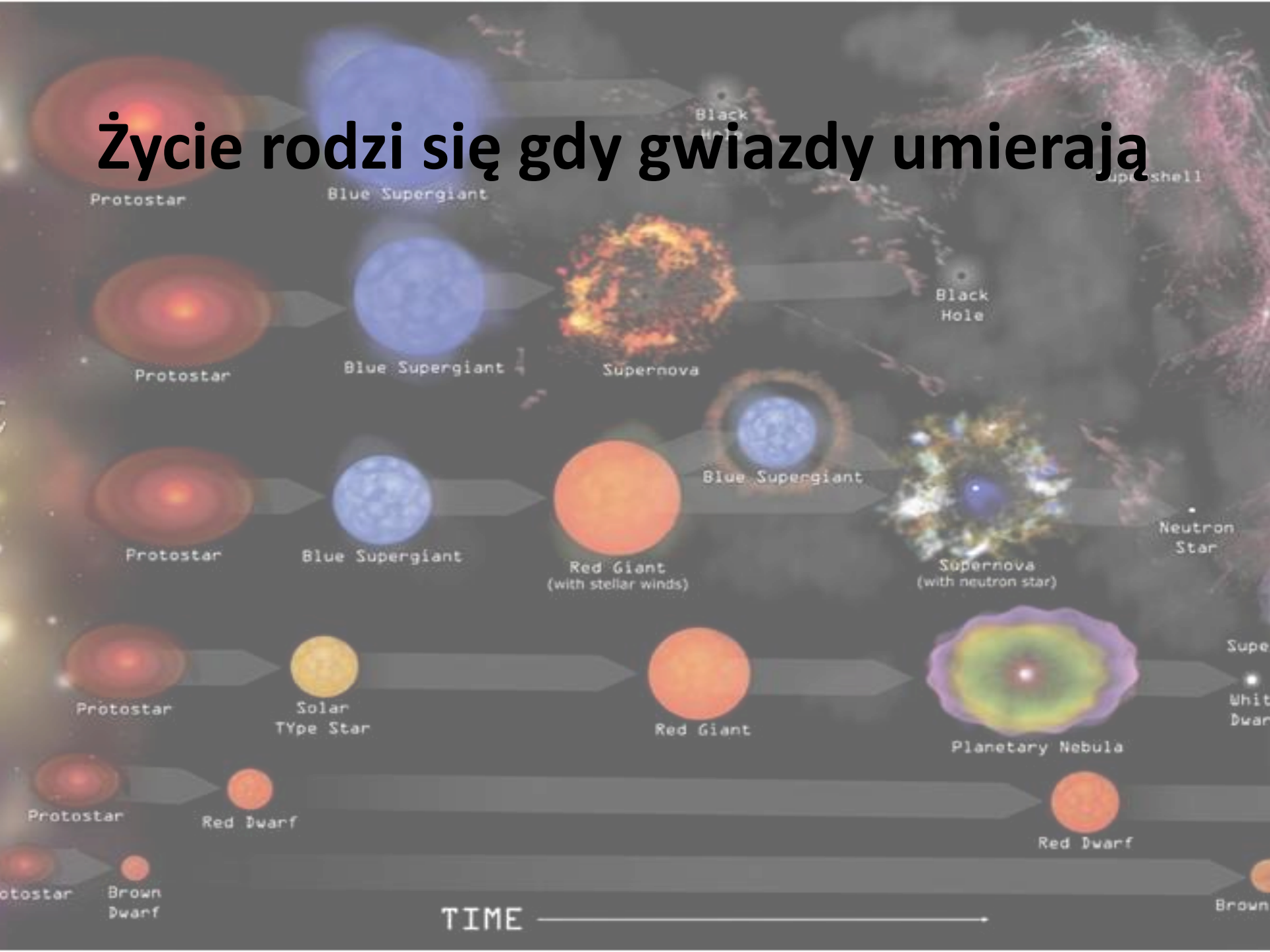
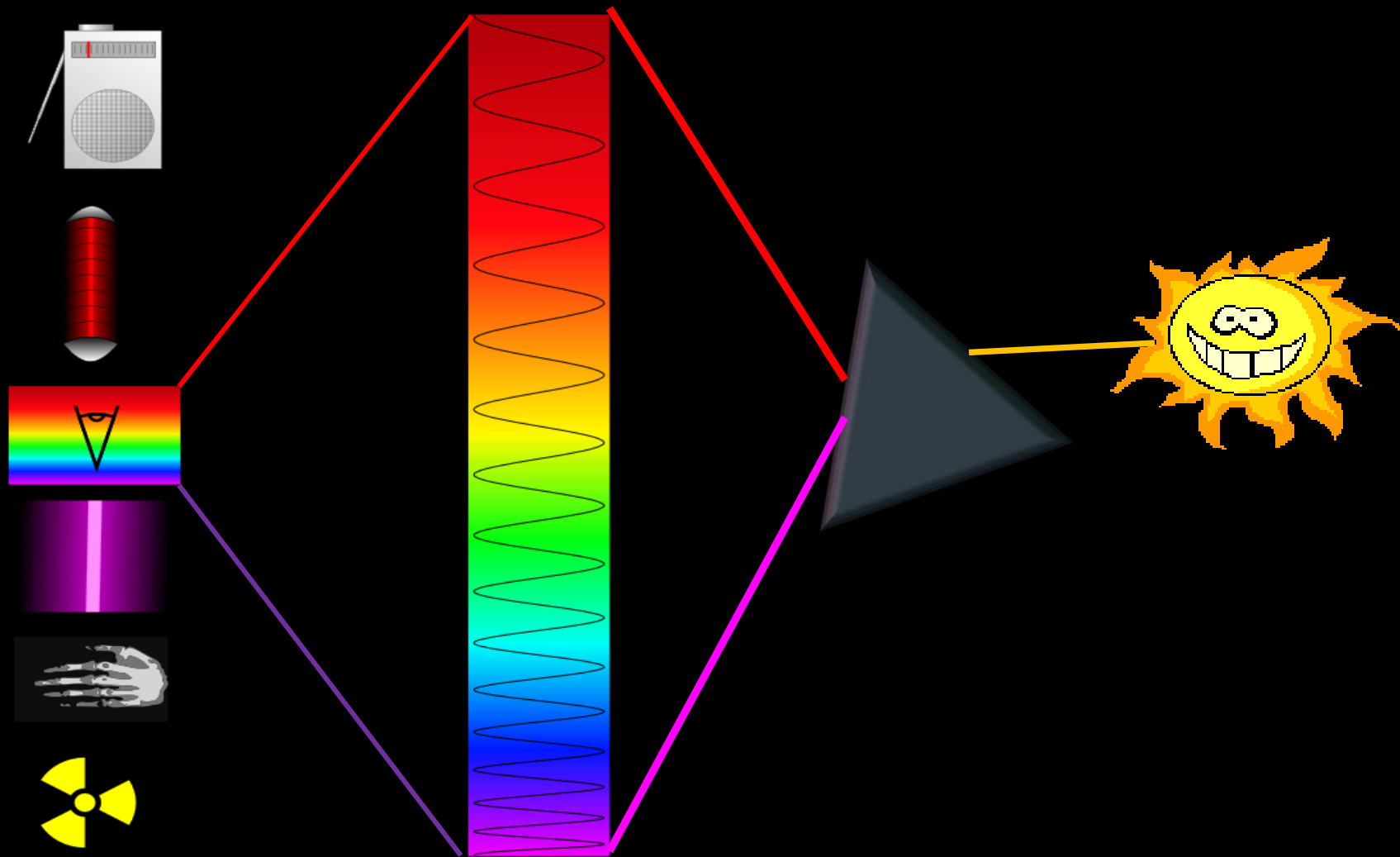


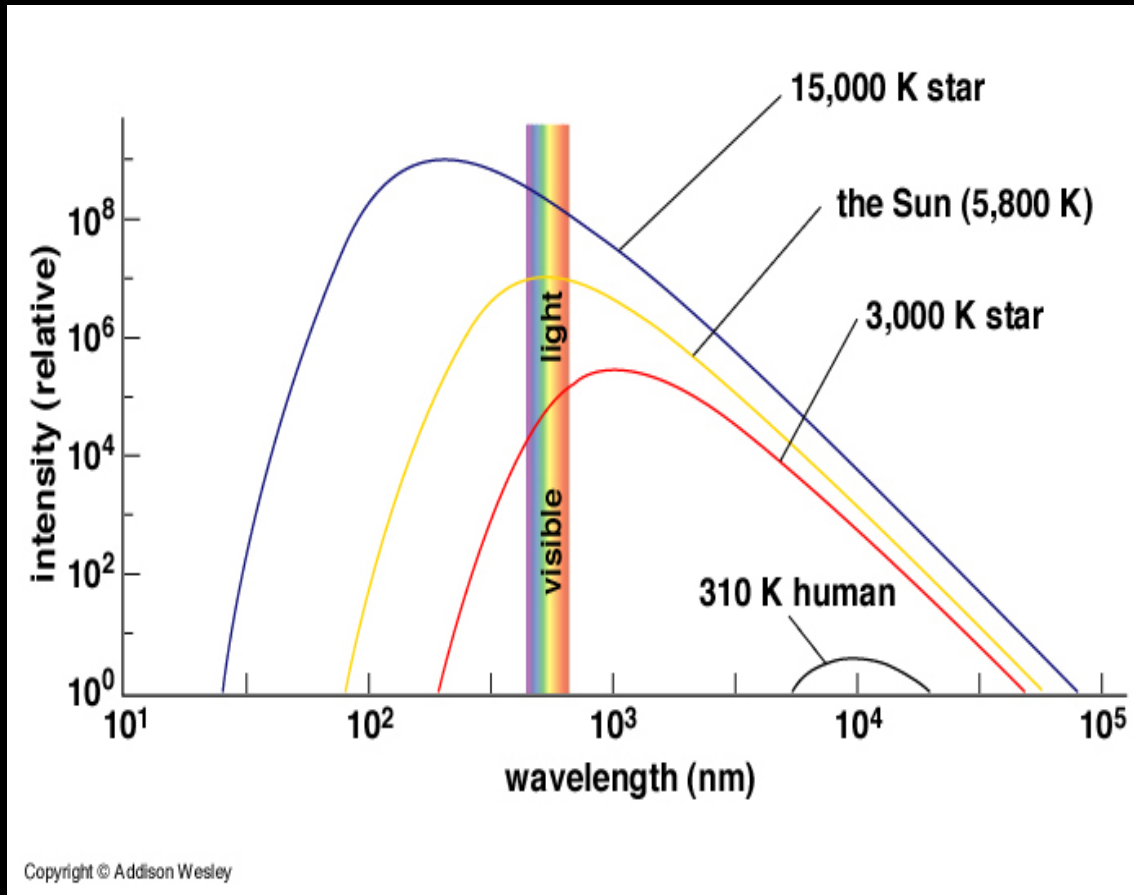
Życie rodzi się gdy gwiazdy umierają



Promieniowanie elektromagnetyczne



Ciało doskonale czarne (promiennik zupełny)

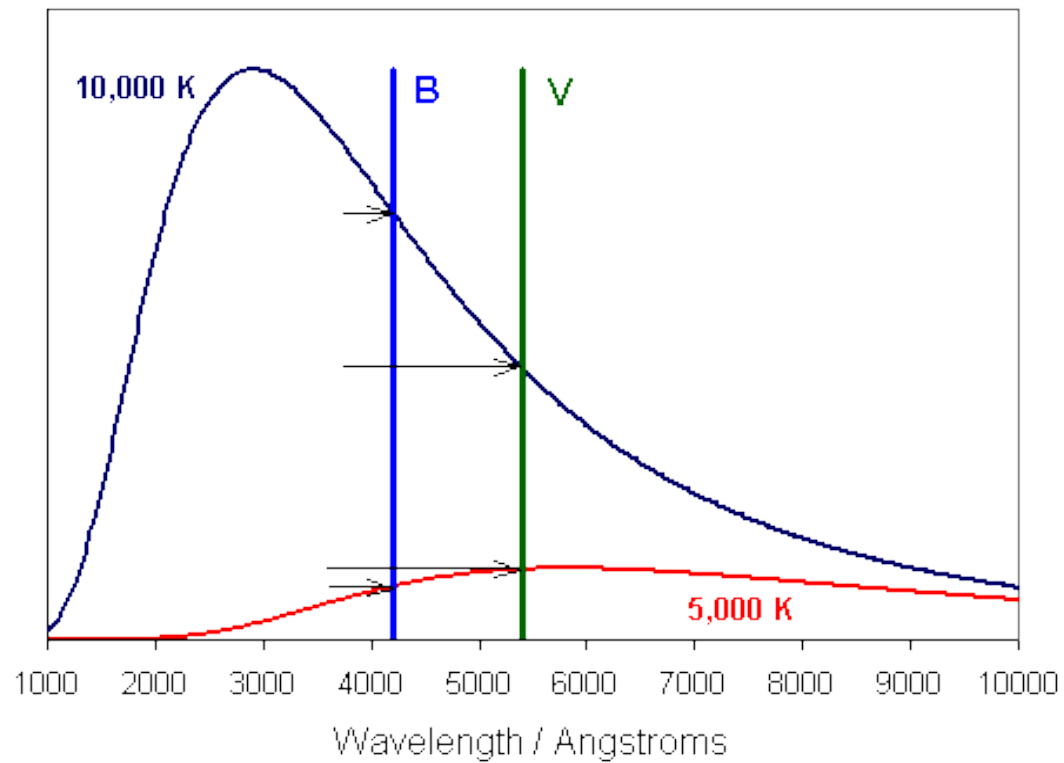
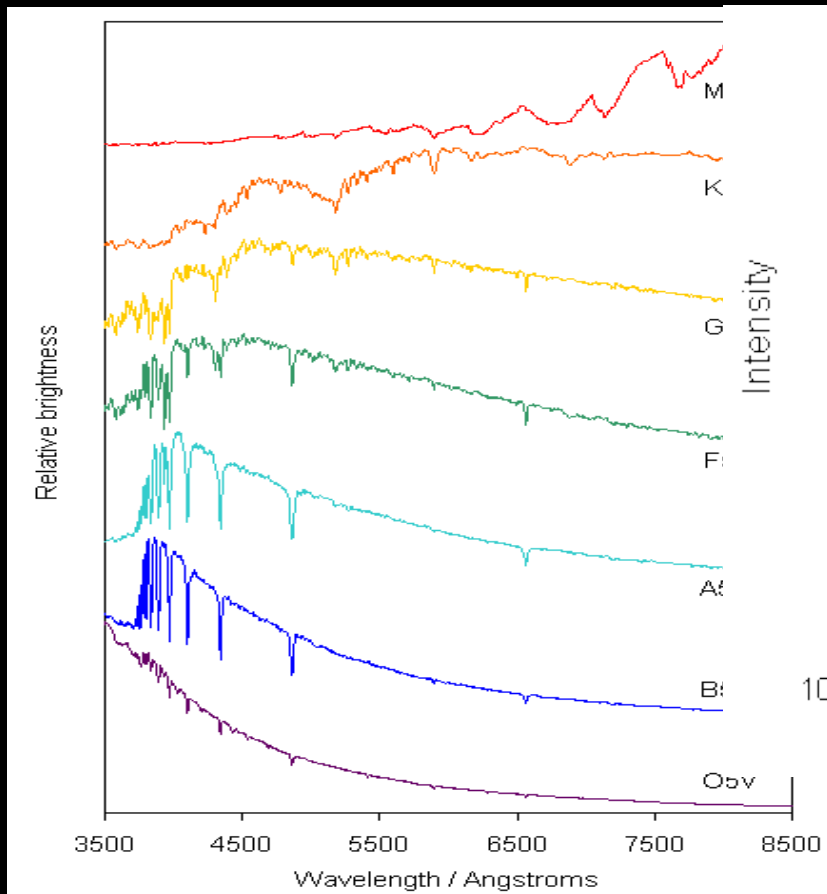


Tak świeci ciało znajdujące się w równowadze termodynamicznej

Gwiazdy gorące są niebieskie, a chłodne – czerwone

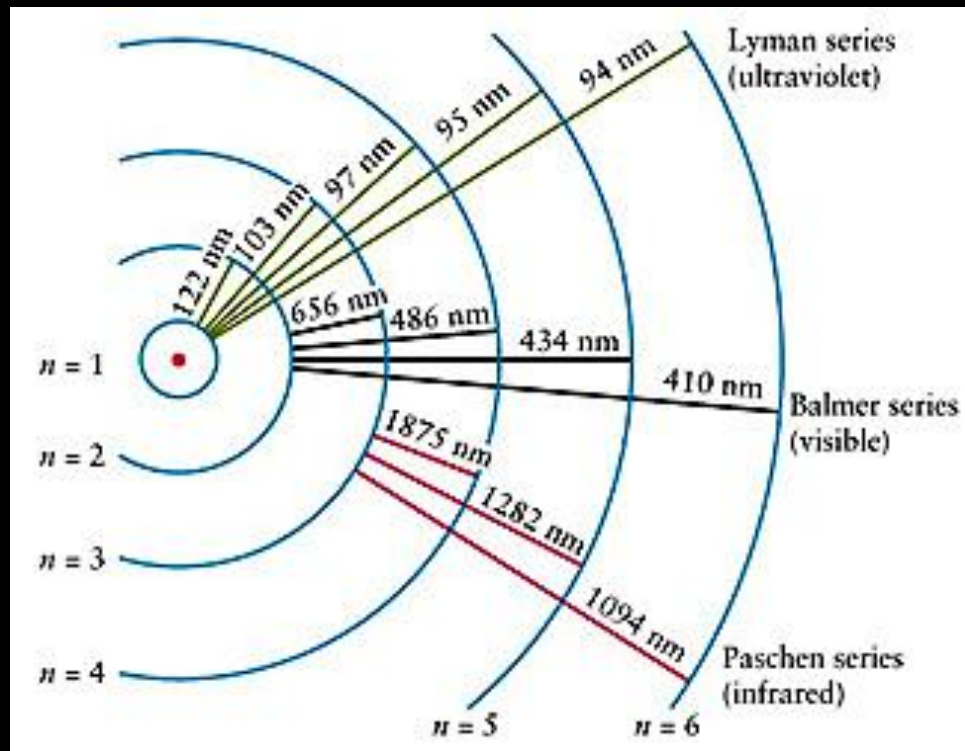
Aby zmierzyć temperaturę definiuje się tzw. wskaźniki barwy

Wskaźnik barwy



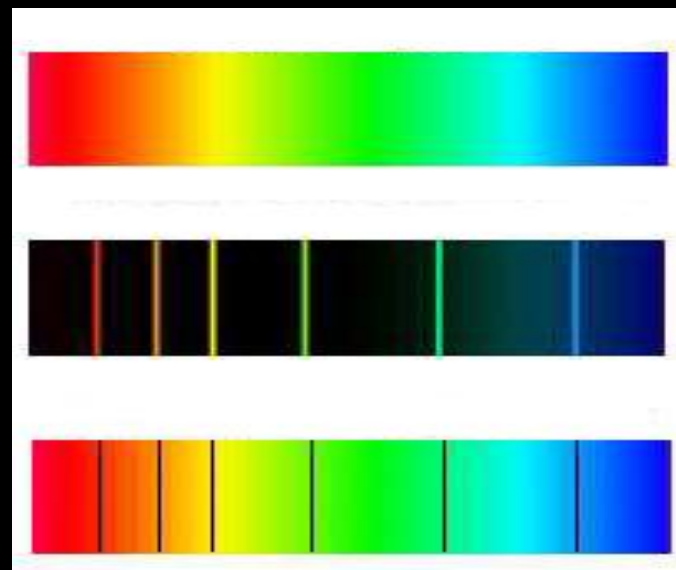
Barwę gwiazdy określa się na podstawie pomiaru natężenia widma ciągłego w wybranych zakresach długości fali

Linie widmowe

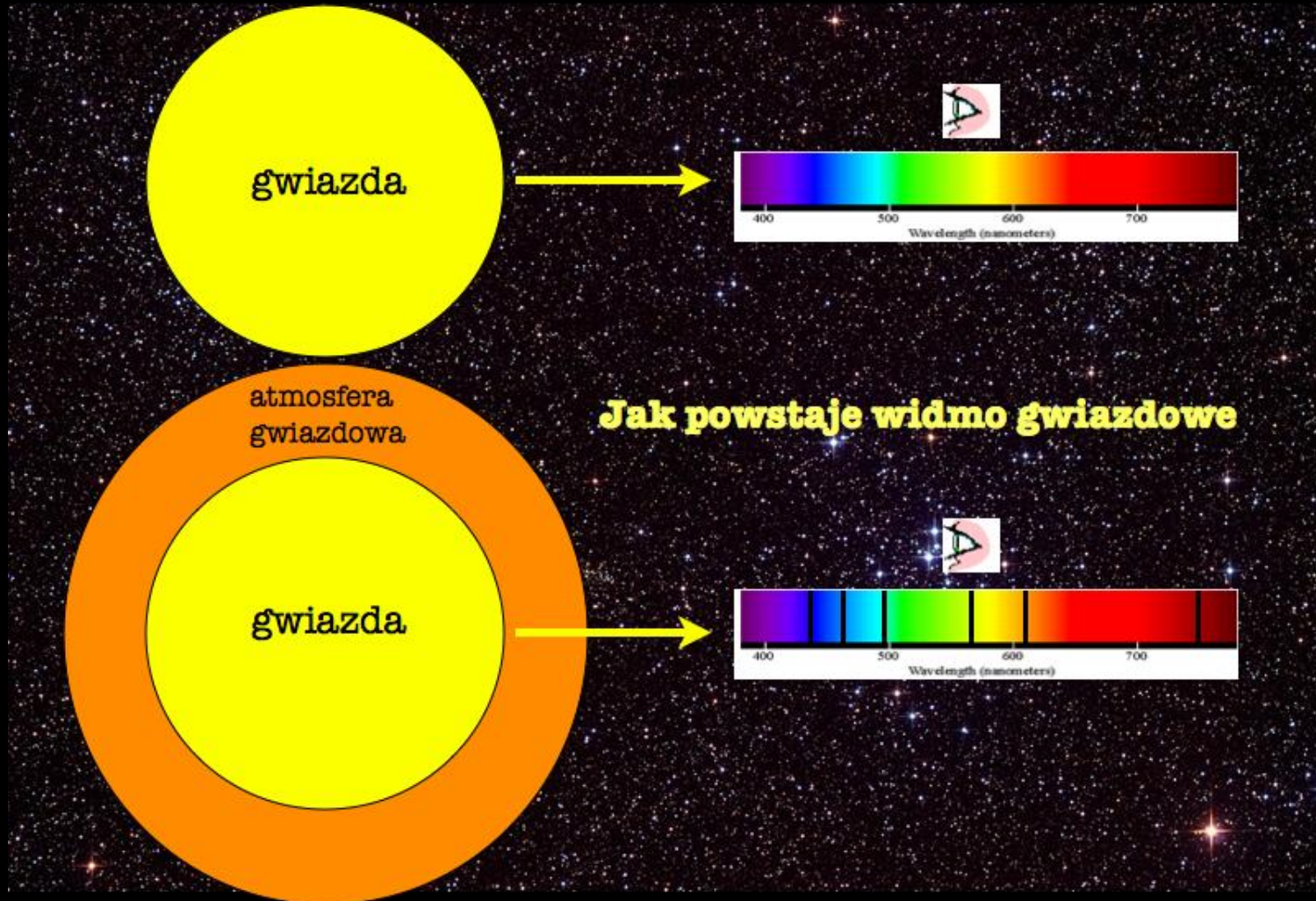


Elektron przechodzi na wyższy poziom – musi dostać energię (absorpcja kwantu, zderzenie z inną cząstką)

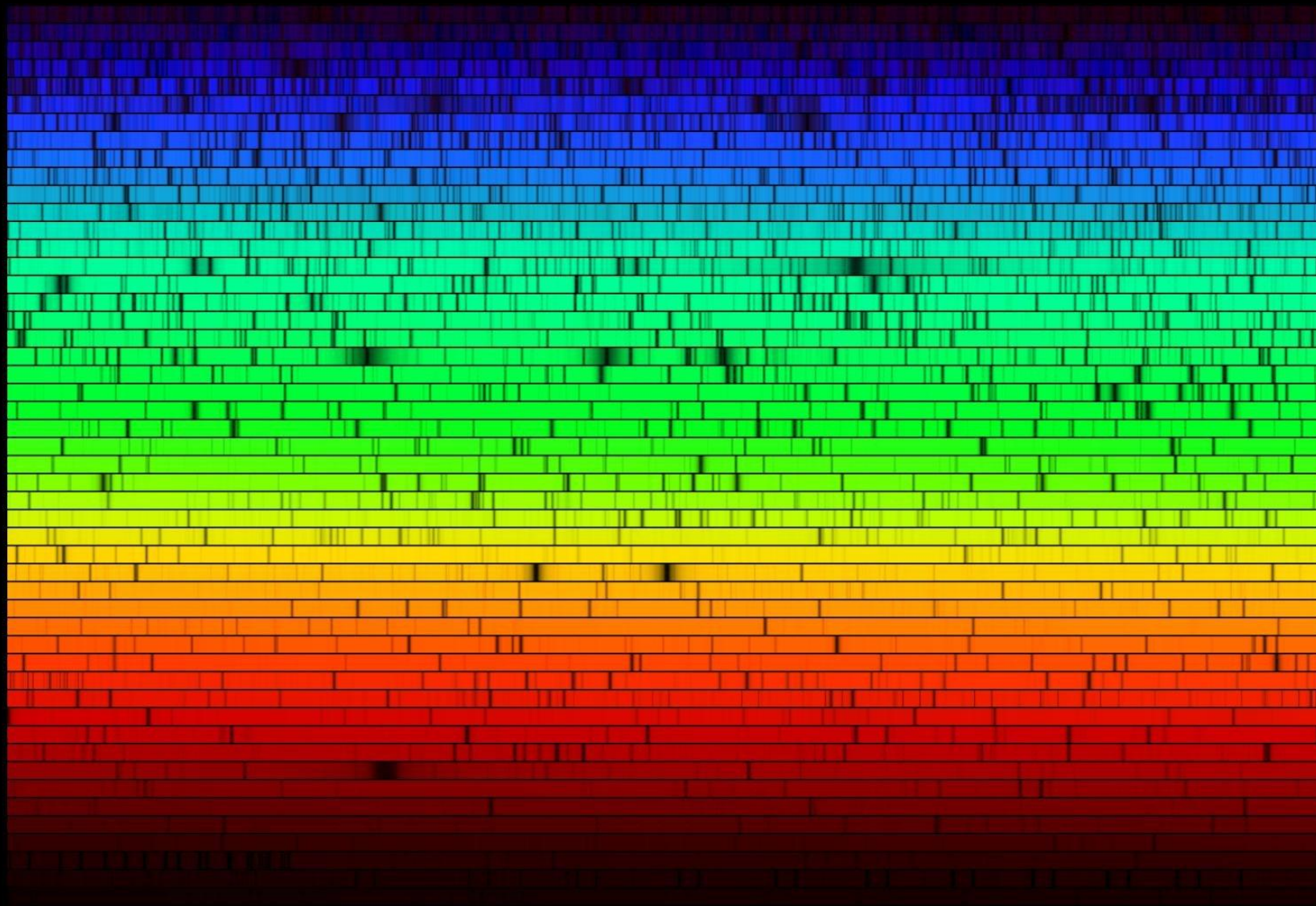
Przy przechodzeniu na niższy poziom – oddaje energię (emisja kwantu)



Jak powstaje obserwowane widmo?



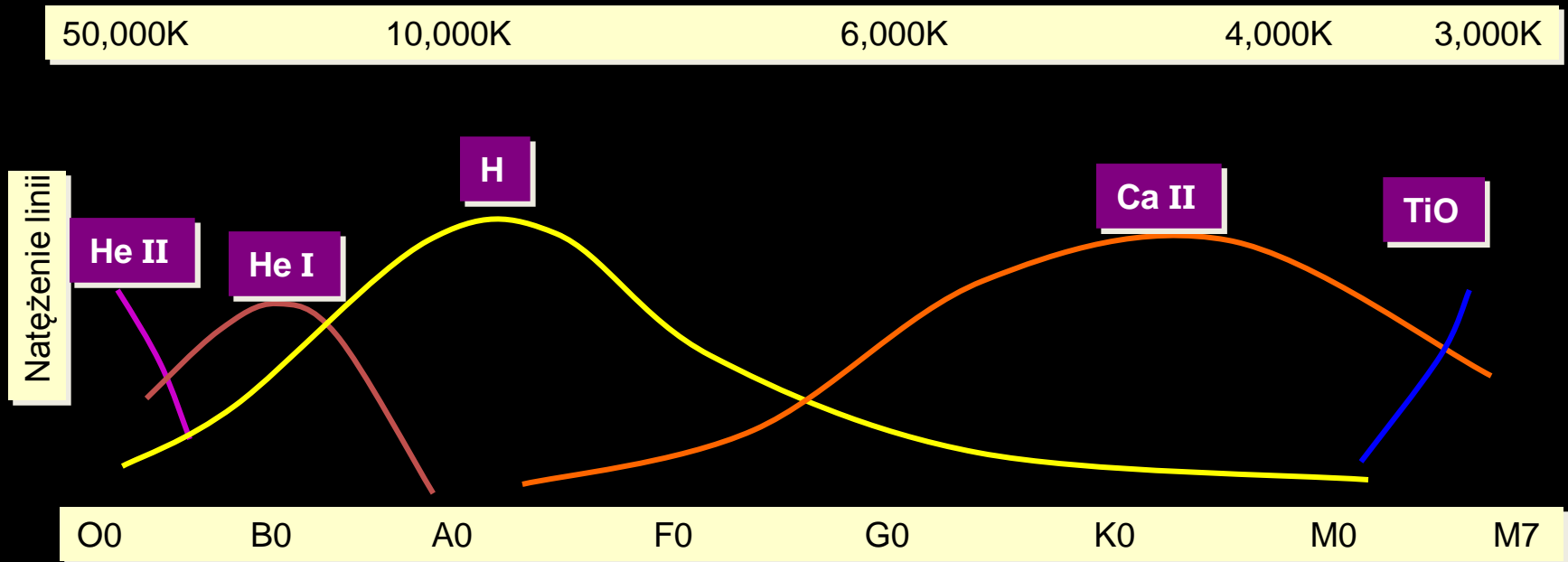
Widmo słoneczne



Klasyfikacja widm gwiazd

Dane przejście energetyczne w atomie możliwe jest tylko w odpowiedniej temperaturze.

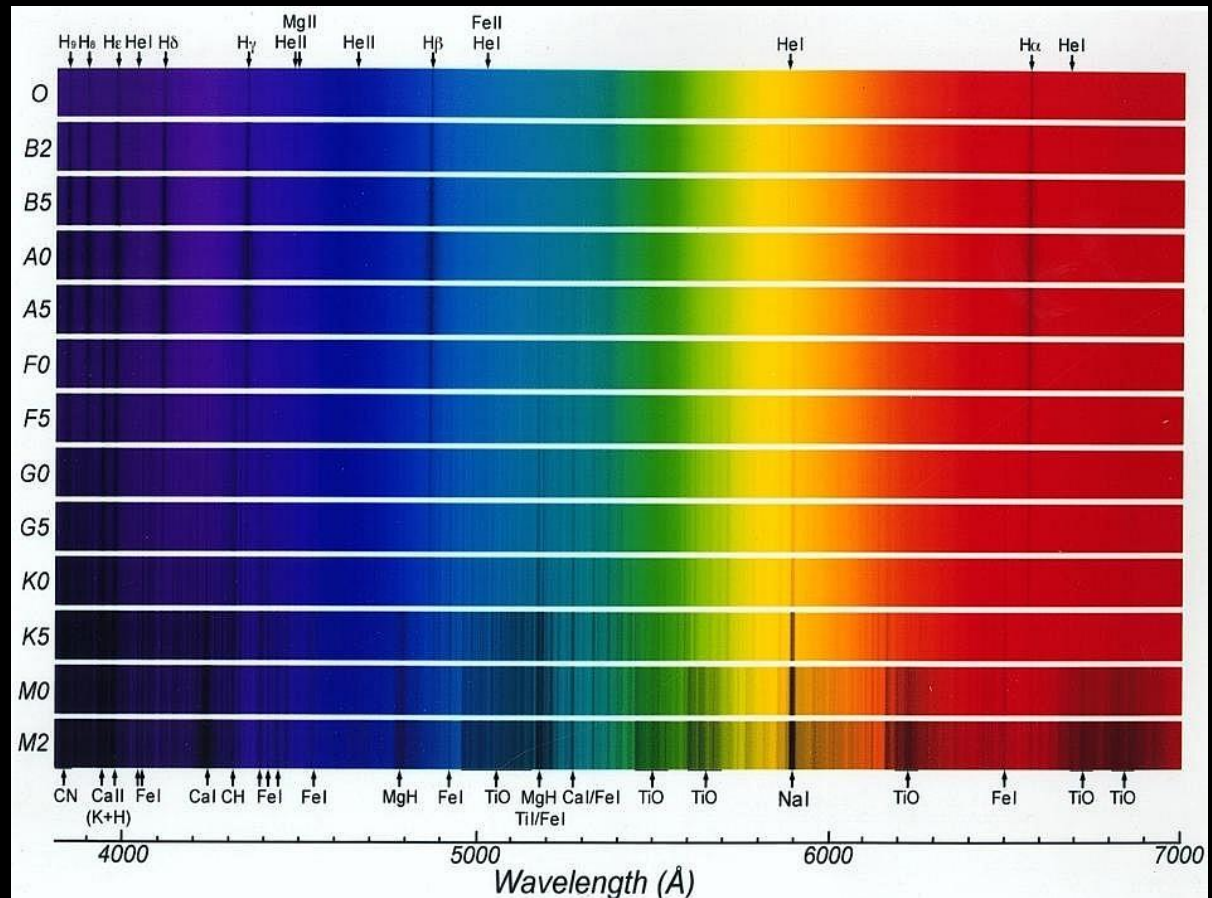
Obecność pewnych linii w widmie gwiazdy, to „temperaturowy odcisk palca”.



Zmiany względnych natężeń linii wybranych pierwiastków w zależności od temperatury powierzchniowej gwiazdy

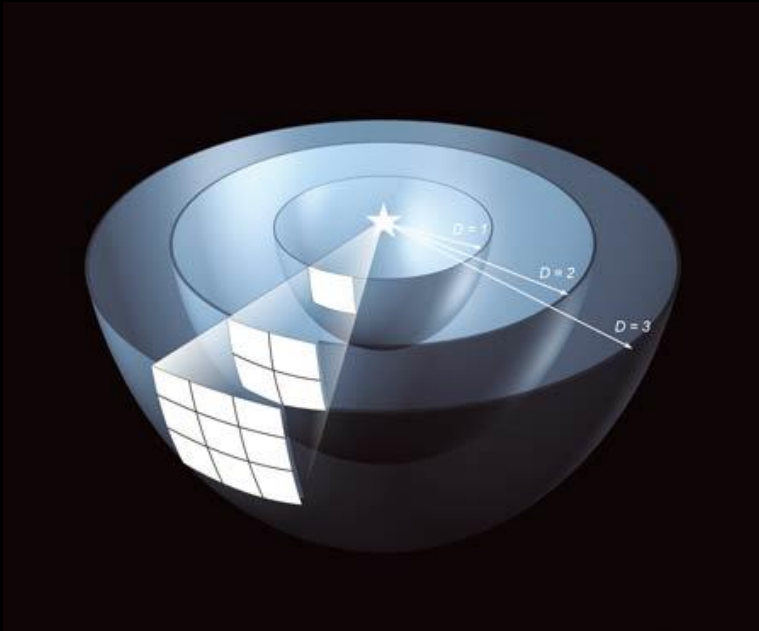
Klasyfikacja widm gwiazd

1872 – klasyfikacja
Harvardzka
typy O B A F G K M
(podtypy 0 – 9)



OH, BE A FINE GIRL, KISS ME

Moc promieniowania



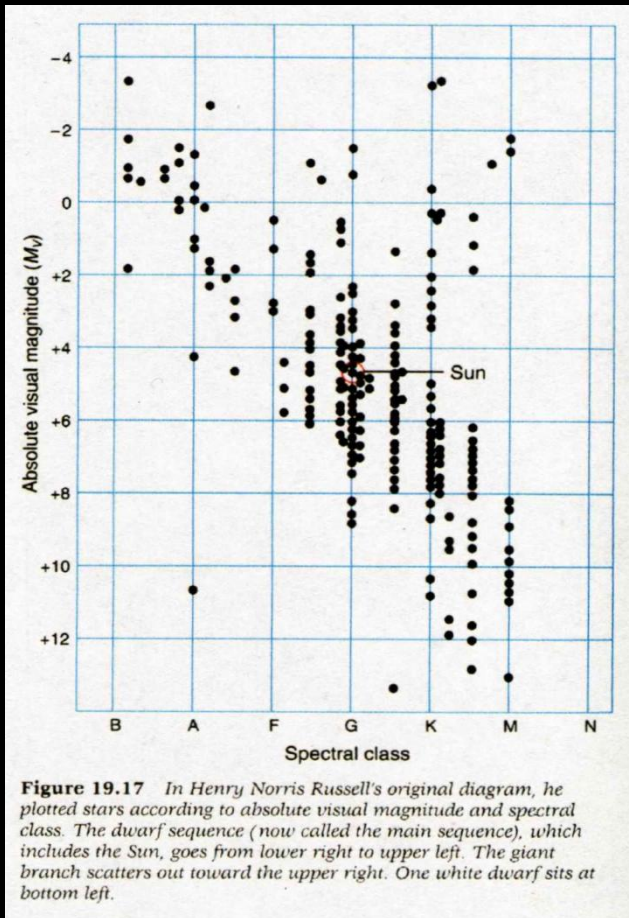
Gwiazda produkuje w ciągu sekundy pewną ilość energii – jest elektrownią termojądrową o określonej mocy

Ta energia jest wypromieniowana przez całą powierzchnię gwiazdy

Moc promieniowania gwiazdy: $L=4\pi R^2\sigma T^4$



Diagram H-R



Przedstawiony w 1911 roku przez E. Hertzsprunga
Udoskonalony w 1913 roku przez H.N. Russella

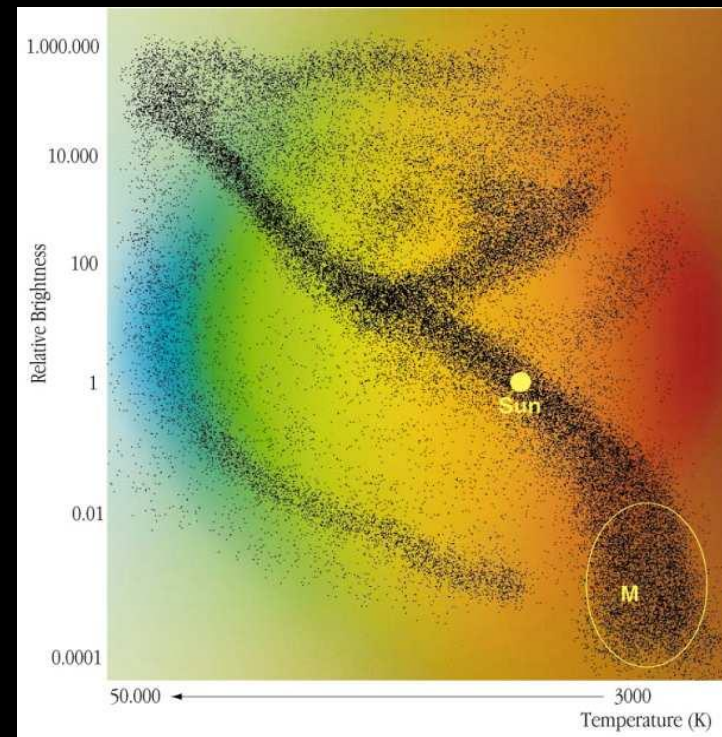
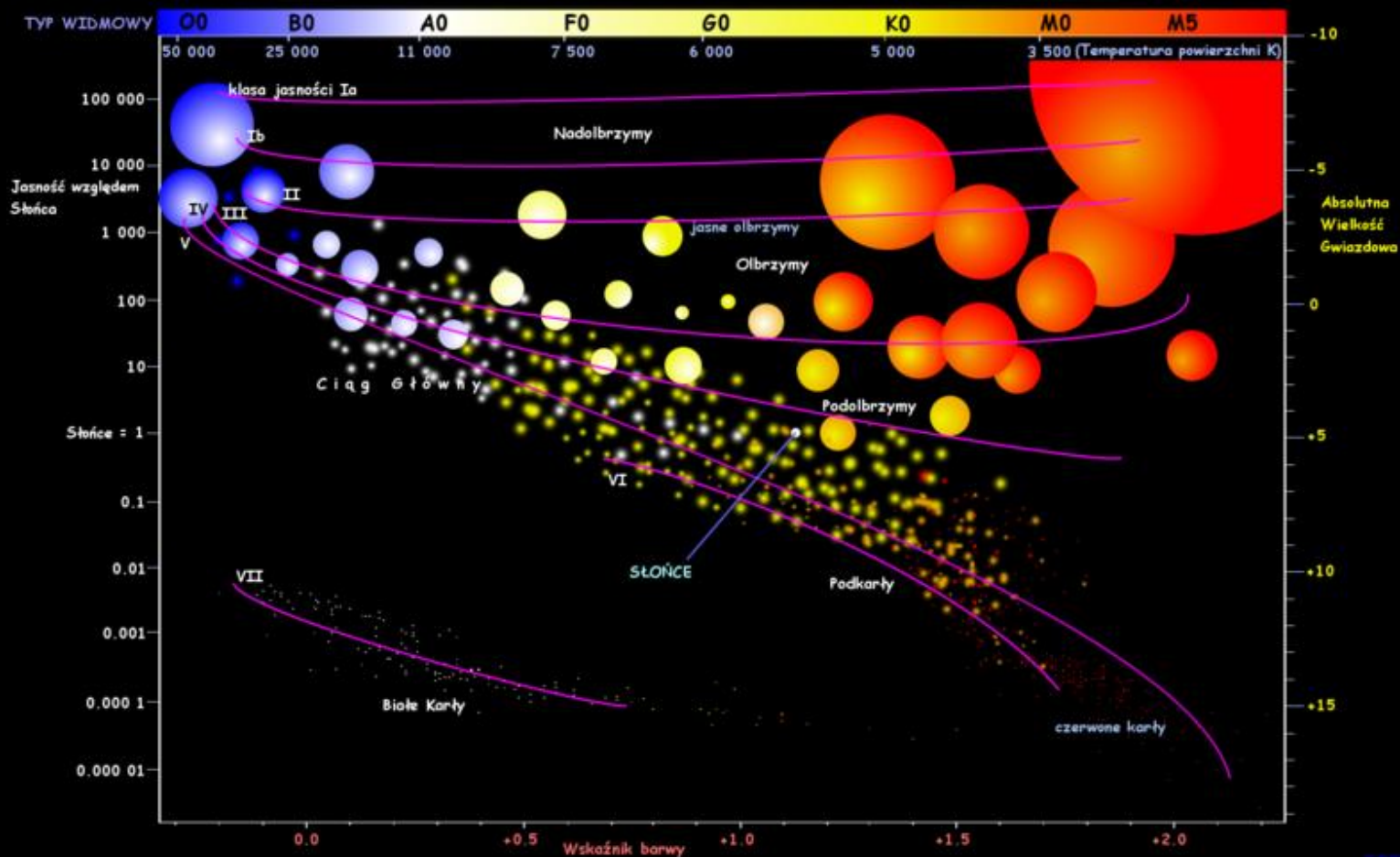


Diagram H-R



Charakterystyczny rozkład gwiazd na diagramie H-R tłumaczy teoria ewolucji gwiazd

Materia międzygwiazdowa



Składa się z gazu i pyłu

**Typowa gęstość to kilka (!)
atomów na cm^3**

**Zasilana przez gwiazdy
(np. wiatr gwiazdowy,
wybuchy supernowych)**

**W odpowiednio gęstym i
masywnym obłoku materii
międzygwiazdowej
powstają nowe gwiazdy**

Materia międzygwiazdowa

Carina Nebula



Hubble
Heritage

Narodziny gwiazd – model



Aby w obłoku rozpoczęły się procesy gwiazdotwórcze potrzebna jest jego odpowiednia masa.

Jednak obłok nie może zacząć zapadania samoistnie.

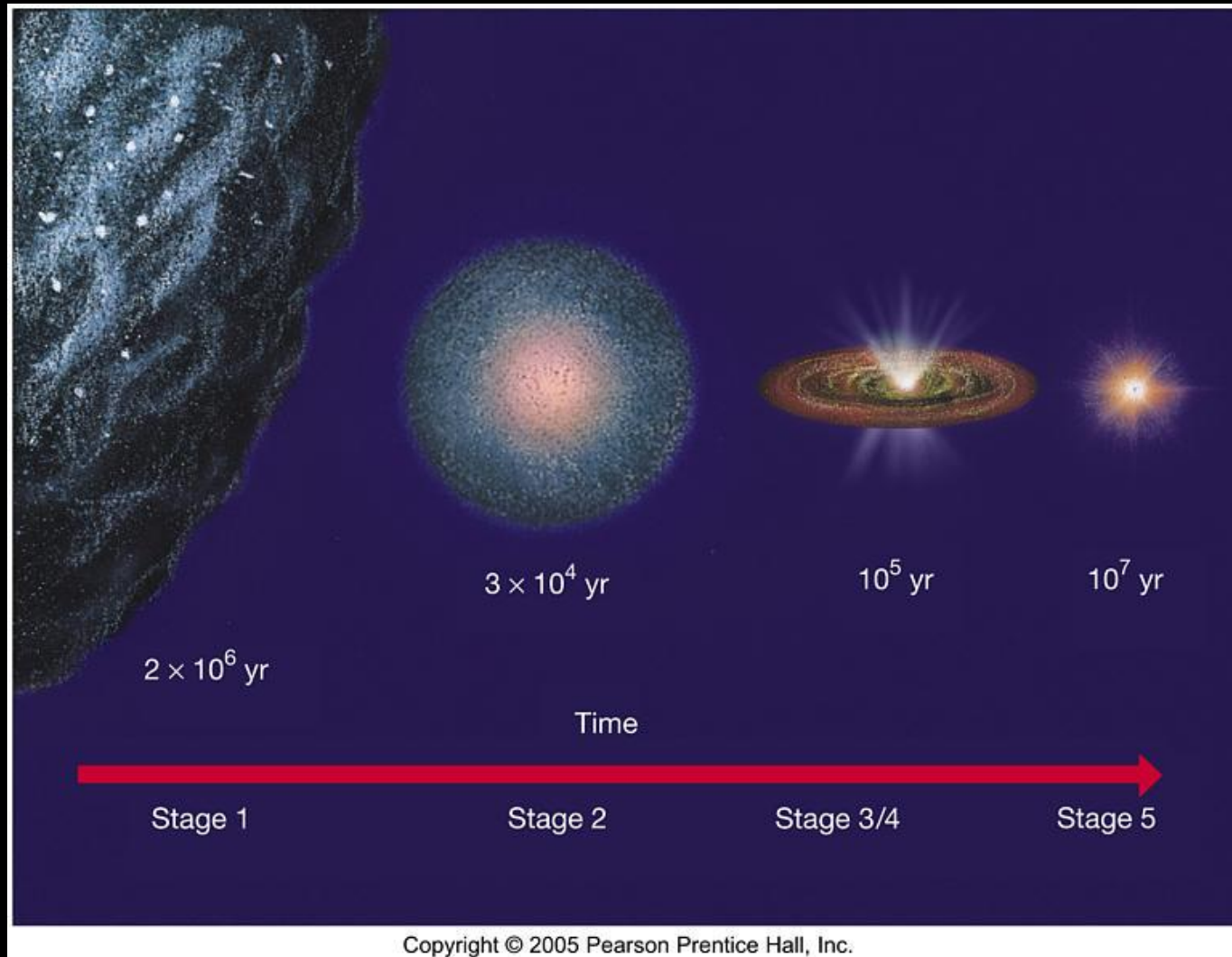
Potrzebne jest jakieś zaburzenie. Może to być np. fala związana z wybuchem supernowej. Inny rodzaj zaburzenia jest związany z rotacją galaktyki (np. gwiazdy powstające w ramionach spiralnych)



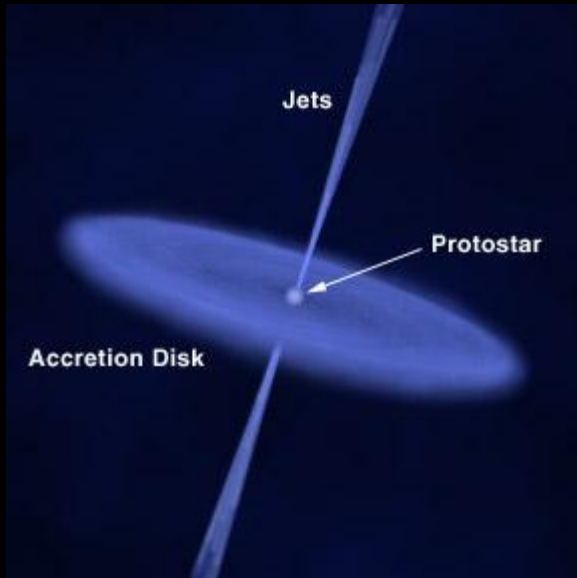
Narodziny gwiazd – obserwacje



Narodziny gwiazd – model



Narodziny gwiazd – obserwacje



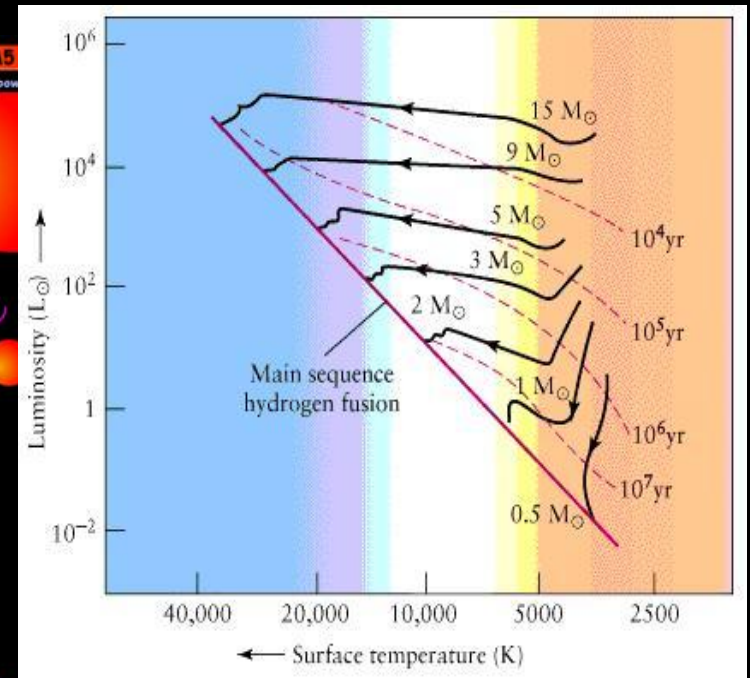
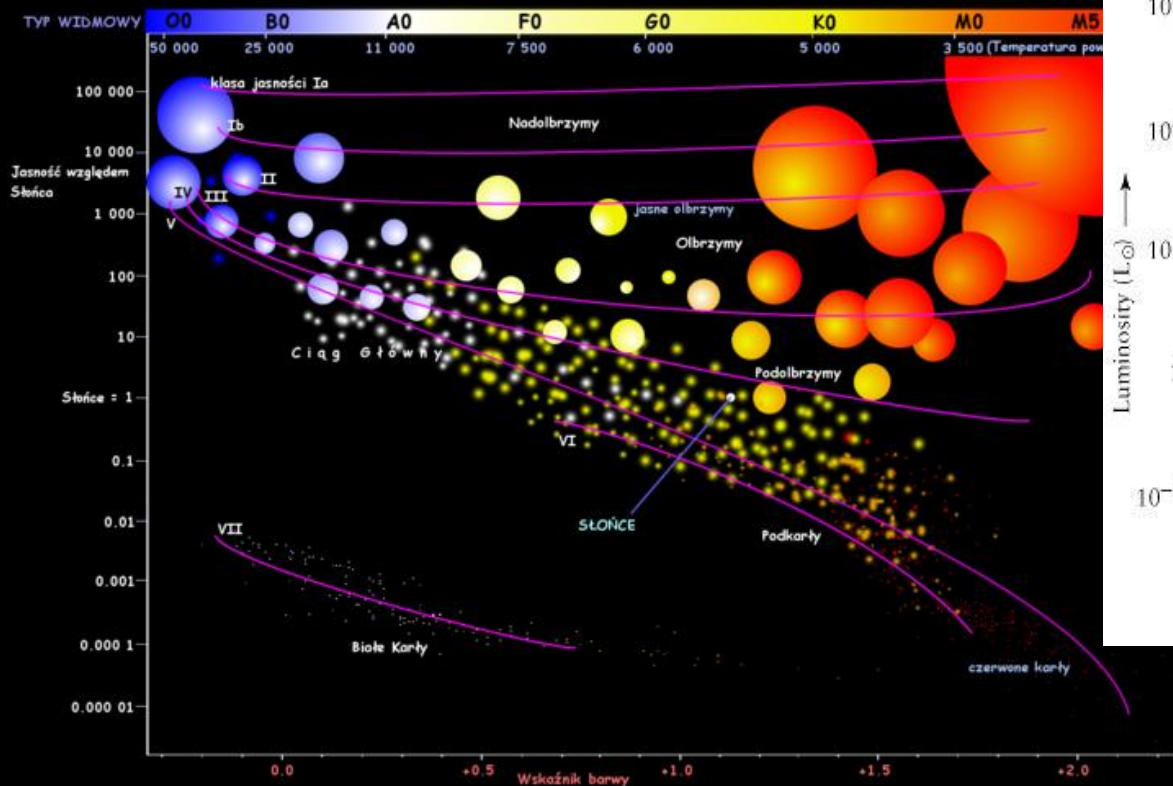
Z młodą gwiazdą związane są charakterystyczne struktury – strugi (dżety) cząstek. Podobne są także obserwowane w okolicach pulsarów, galaktyk aktywnych



Jets from Your
PRC95-24c - ST Sgl OPO -



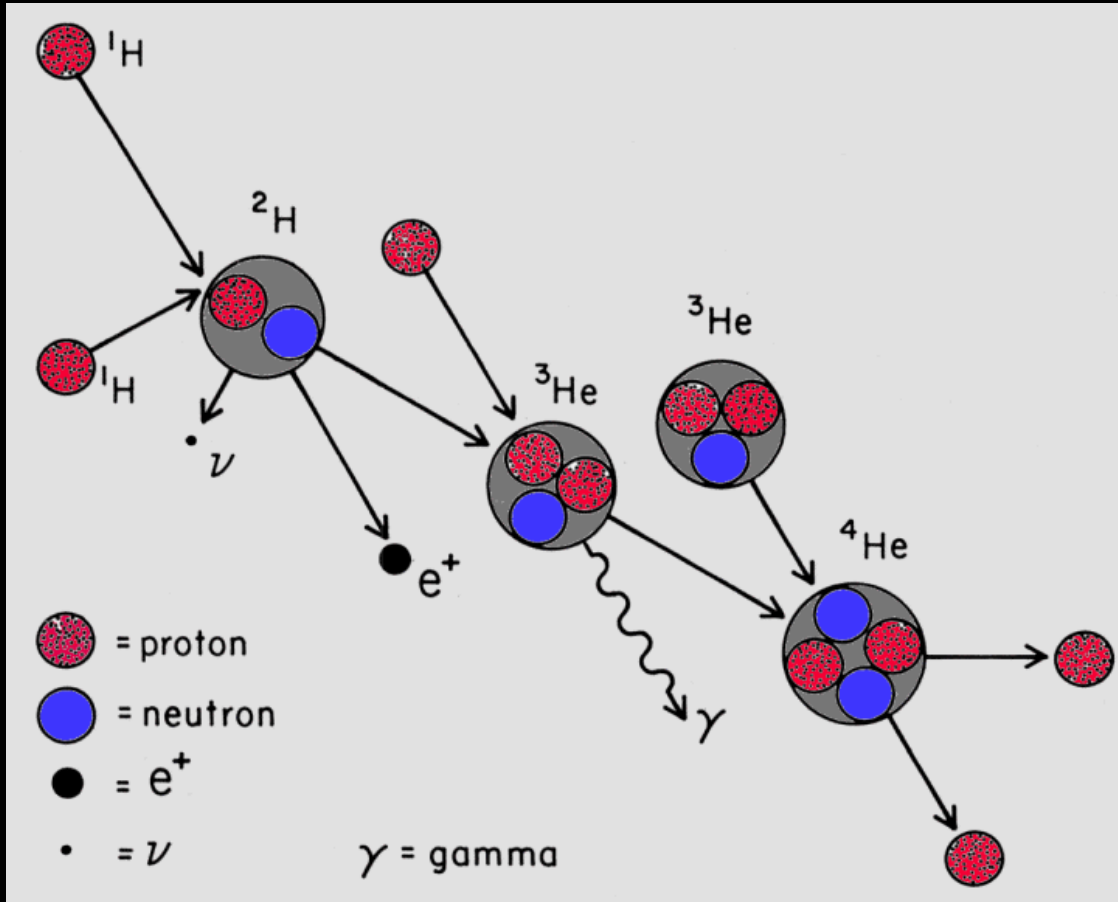
Życie na ciągu głównym



W gwiazdzie zaczynają się reakcje syntezy i zaczyna się najspokojniejszy okres jej życia. Mówimy, że gwiazda „lądzuje” na ciągu głównym. To, w którym miejscu ciągu głównego znajdzie się młoda gwiazda zależy od jej masy.

Życie na ciągu głównym

Reakcja p-p



Typowa (ale nie jedyna) reakcja syntezy wodoru w hel zachodząca w gwiazdzie znajdującej się na ciągu głównym.

Gwiazda po „rozpaleniu” wnętrza osiąga stan równowagi.

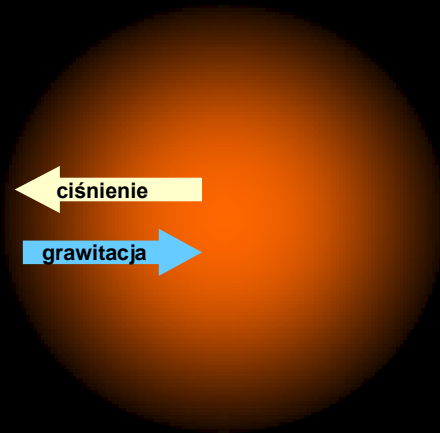
Dla Słońca:

600 mln ton wodoru zamienia się w hel w każdej sekundzie

4 mln ton jest przekształcane w energię: $3.6 \cdot 10^{26}$ J

Życie na ciągu głównym

Gwiazda jest w równowadze gdy grawitacja, która dąży do ściśnięcia gwiazdy jest powstrzymywana przez wytwarzane we wnętrzu ciśnienie:



- gazu (jest duże, bo w centrum jest wysoka temperatura)
- promieniowania (bo wewnątrz zachodzą reakcje termojądrowe)

Równowaga zostaje zaburzona kiedy kończy się paliwo we wnętrzu.

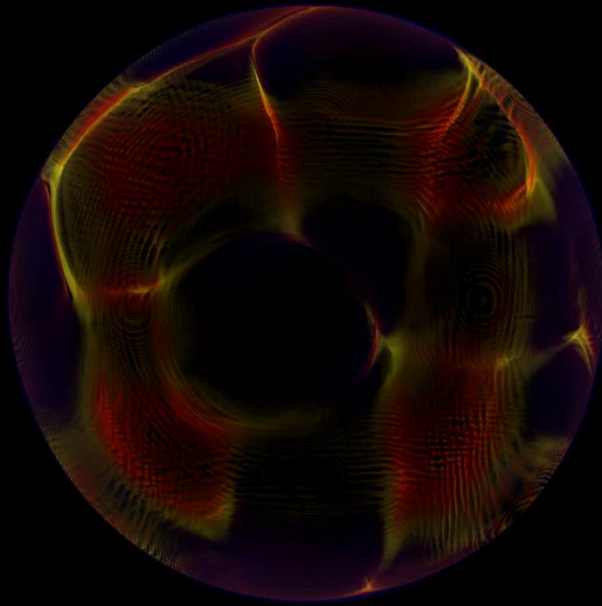
Maleje ciśnienie:

- gazu, bo jest mniej cząstek
- promieniowania, bo spada tempo reakcji termojądrowych



Czas po jakim nastąpi zachwianie równowagi zależy głównie od masy gwiazdy. Od masy zależą także dalsze losy gwiazdy...

Gwiazdy o bardzo małej masie

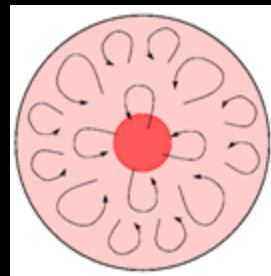
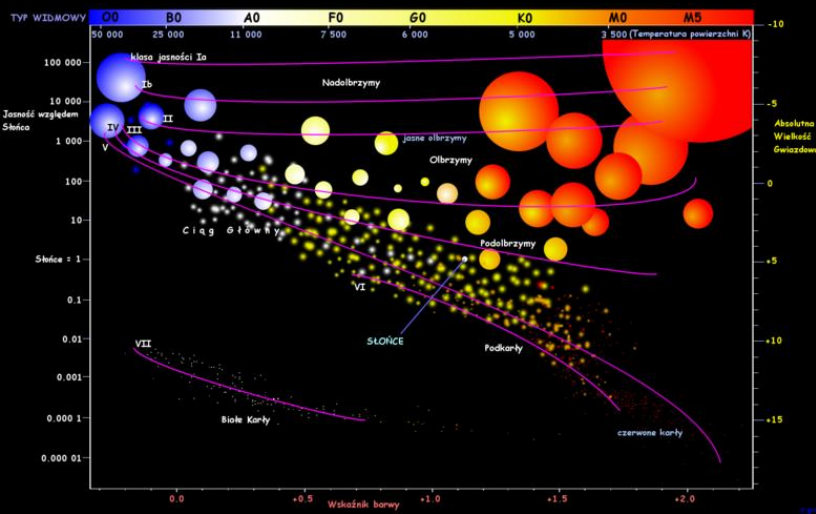


Są to gwiazdy o masach mniejszych niż około $0.4 M_{\odot}$

Cała gwiazda jest konwektywna, a więc materia jest ciągle mieszana i cały wodór zostaje wypalony.

Gwiazda kurczy się ale nie osiąga w centrum temperatury odpowiedniej do przemiany helu w cięższe pierwiastki.

W związku z tym kończy jako mała kula (rozmiarów Ziemi), która stopniowo robi się coraz chłodniejsza.



Gwiazdy o małej masie



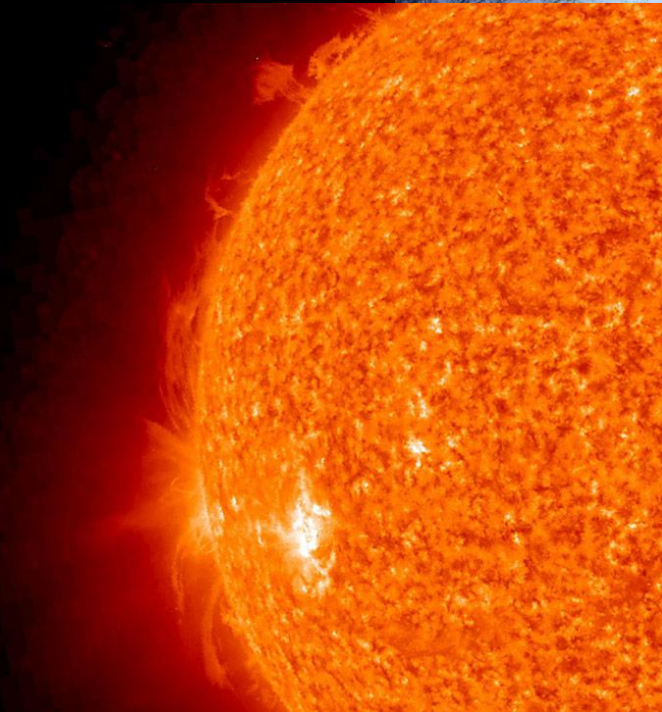
Gwiazdy o masie:

$$0,4 M_{\odot} < M < 1.5 M_{\odot}$$

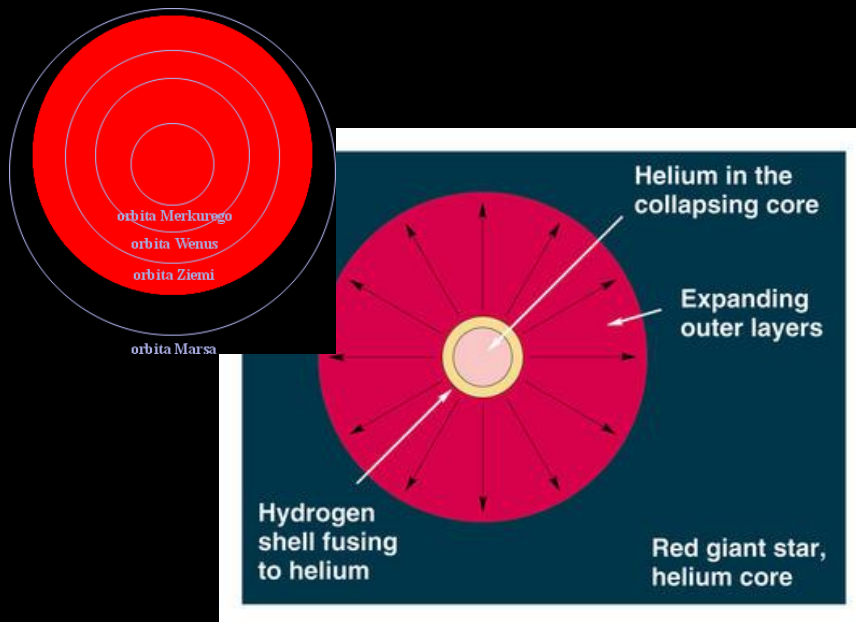
**Typowym przykładem jest
nasze Słońce**

**Życie takich gwiazd jest nieco
ciekawsze.**

**Po wypaleniu wodoru we wnętrzu
gwiazda kurczy się i rozgrzewa w
centrum do temperatury ponad
100 milionów kelwinów.**

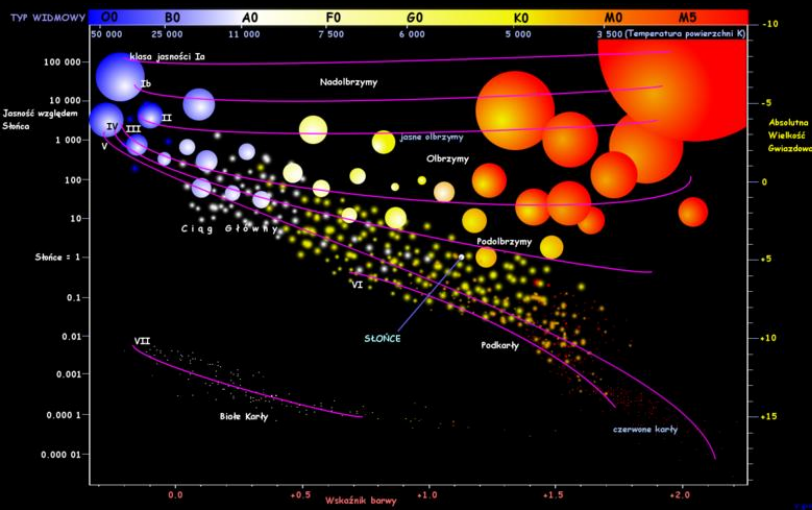


Gwiazdy o małej masie



Zanim jednak centrum osiągnie odpowiednią temperaturę gwiazda przechodzi przez etap „czerwonego olbrzyma”-na diagramie H-R przesuwa się w prawo i w górę

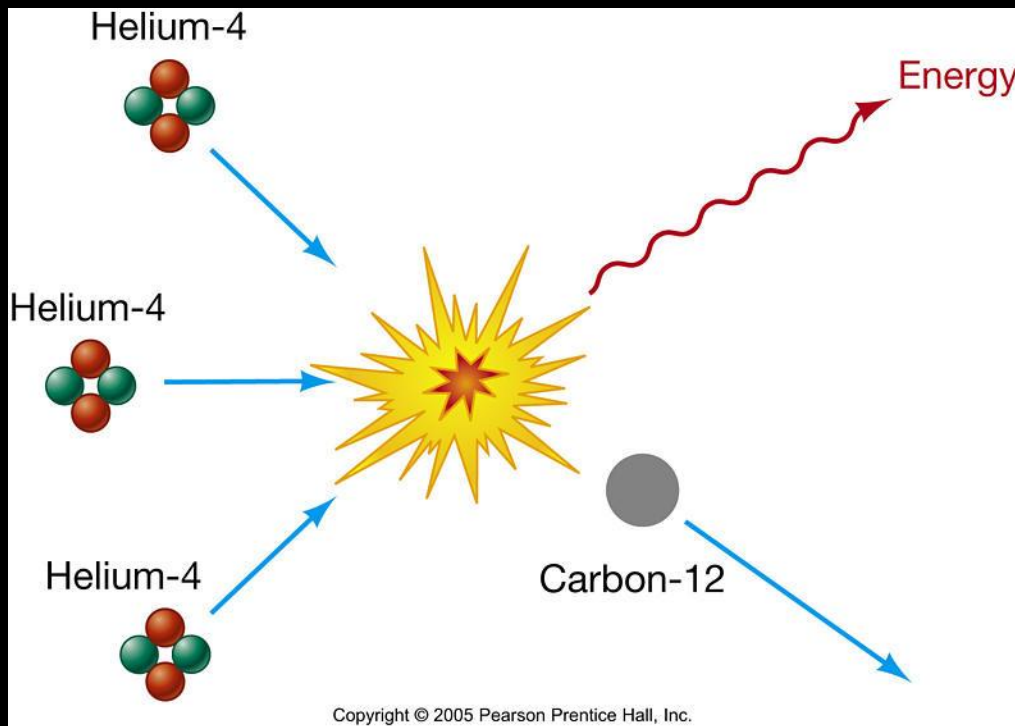
Jądro gwiazdy powoli zapada się. Wewnątrz nie ma już paliwa (wodoru). Temperatura jądra rośnie i zaczyna się spalanie wodoru w cienkiej warstwie wokół jądra.



Jednocześnie zewnętrzne warstwy gwiazdy rozdymają się i chłodzą – gwiazda robi się wielka i czerwona.

Ten etap pojawia się w czasie życia każdej gwiazdy poza tymi najmniej masywnymi.

Gwiazdy o małej masie



Kiedy jądro osiągnie odpowiednią temperaturę następuje tzw. błysk helowy – wewnątrz rozpoczyna się nagle przemiana helu w węgiel, a gwiazda gwałtownie jaśnieje

Ta reakcja nazywa się reakcją 3α ponieważ z trzech atomów helu (cząstek α) powstaje jeden atom węgla.

Reakcja 3α jest bardzo wrażliwa na zmiany temperatury – gwiazda staje się „niespokojna”

Po zapaleniu helu gwiazda znów jest w stanie równowagi. Ten stan nie trwa jednak długo.

Gwiazdy o małej masie



NGC 2392 • "Eskimo" Nebula
Hubble Space Telescope • WFPC2

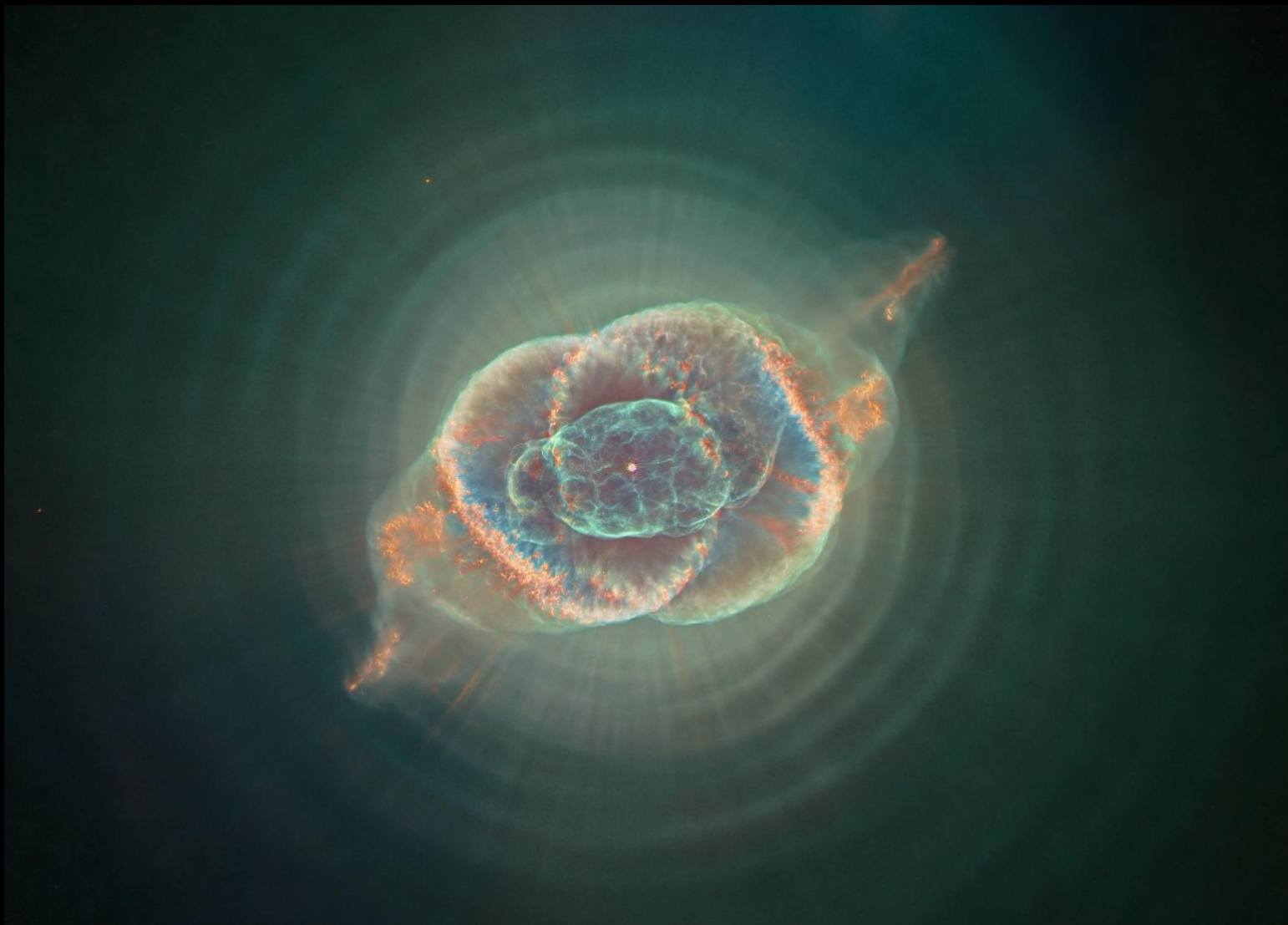
NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-07

W pewnym momencie kończy się hel i zapadanie jądra trwa aż do etapu białego karła.

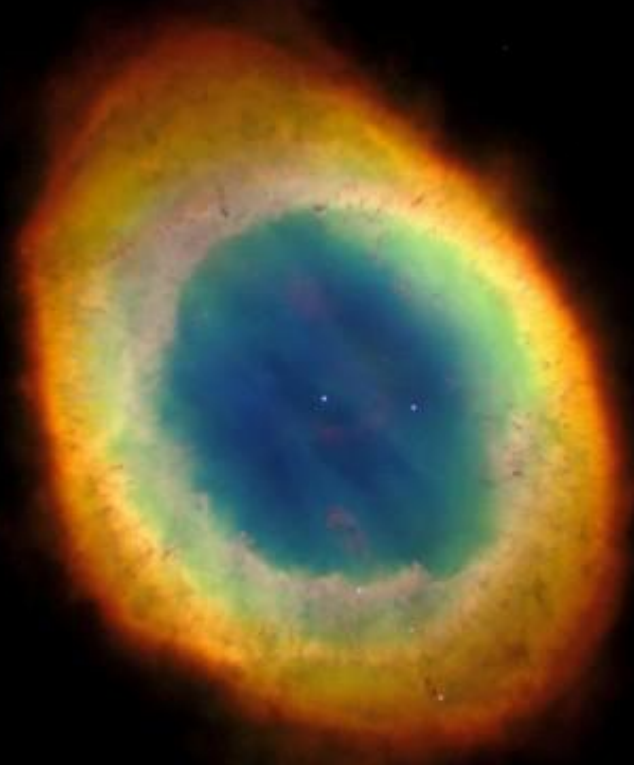
Biały karzeł jest jądrem gwiazdy, które ma ogromną temperaturę i wielką gęstość.

A co z zewnętrznymi warstwami? Oddalają się od jądra i rozświetlają dzięki promieniowaniu ultrafioletowemu pochodzącemu od gorącego białego karła – obserwujemy tzw. mgławice planetarne.

Mgławice planetarne



Mgławice planetarne



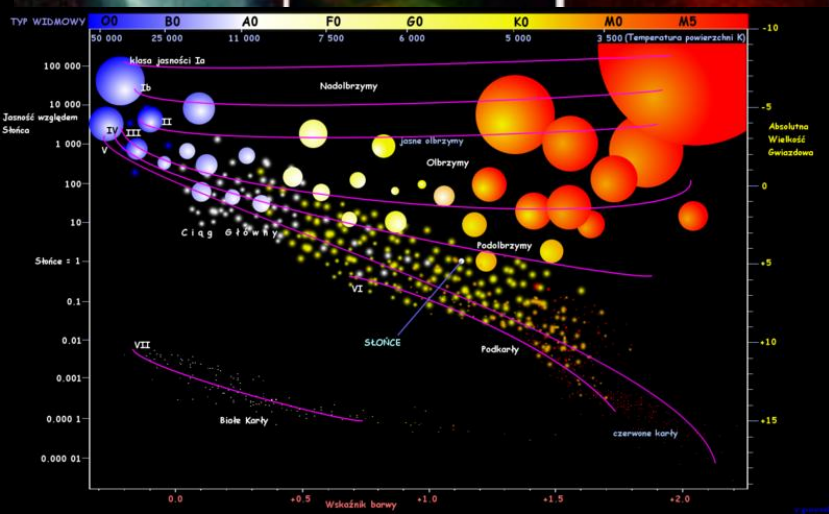
Gwiazdy o małej masie



Gwiazda o masie porównywalnej z masą Słońca kończy życie jako stygnący biały karzeł, który nie może być bardziej masywny niż $1.4 M_{\odot}$

Piękna otoczka w postaci mgławicy planetarnej przestaje świecić po około 10 000 lat

Przestaje świecić ale nie znika. Gaz ucieka w przestrzeń międzygwiazdową i może zasilić obłok, z którego powstaną nowe gwiazdy...



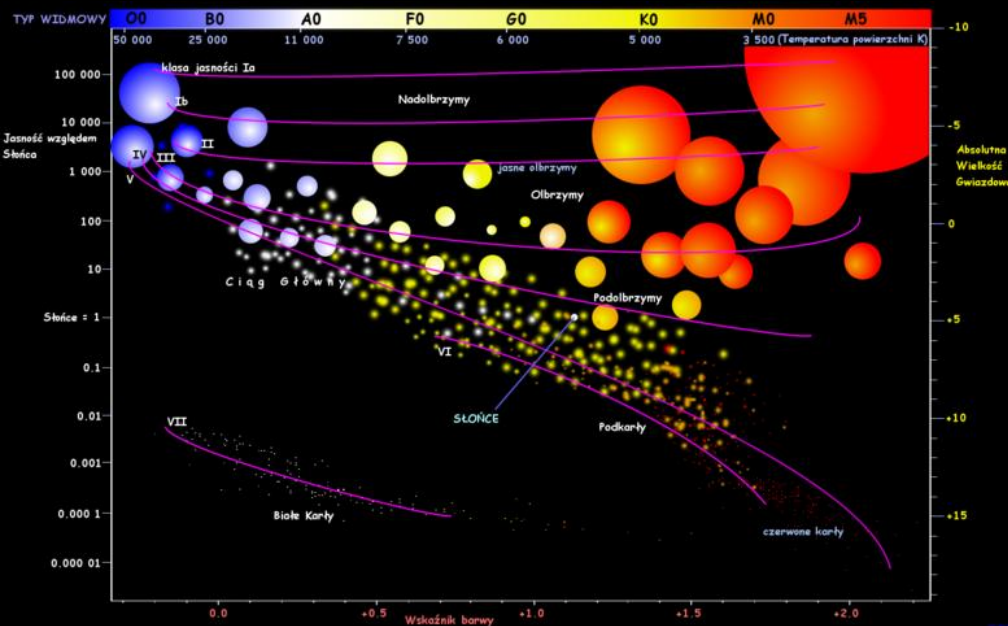
Gwiazdy masywne

Początkowo ewoluują podobnie jak gwiazdy o mniejszych masach tylko szybciej

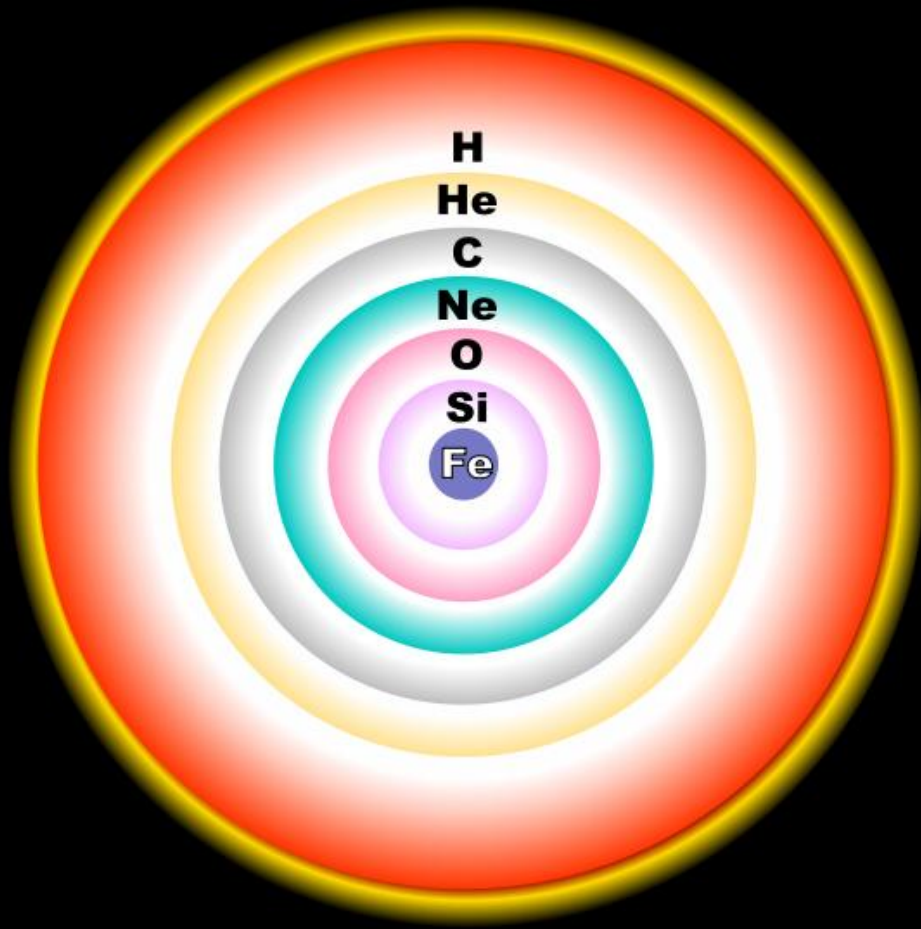
Po wypaleniu wodoru i helu gwiazda ma na tyle dużą masę, że po zapadnięciu się jądra temperatura może wzrosnąć do wartości umożliwiającej zapalenie węgla i przemianę neon przemienia się w tlen, tlen w krzem, a krzem w żelazo.

Żelazo nie może być już spalane w reakcjach termojądrowych.

Oczywiście spalane są też pozostałości lżejszych pierwiastków znajdujące się w zewnętrznych warstwach. Gwiazda osiąga charakterystyczny etap „cebuli”

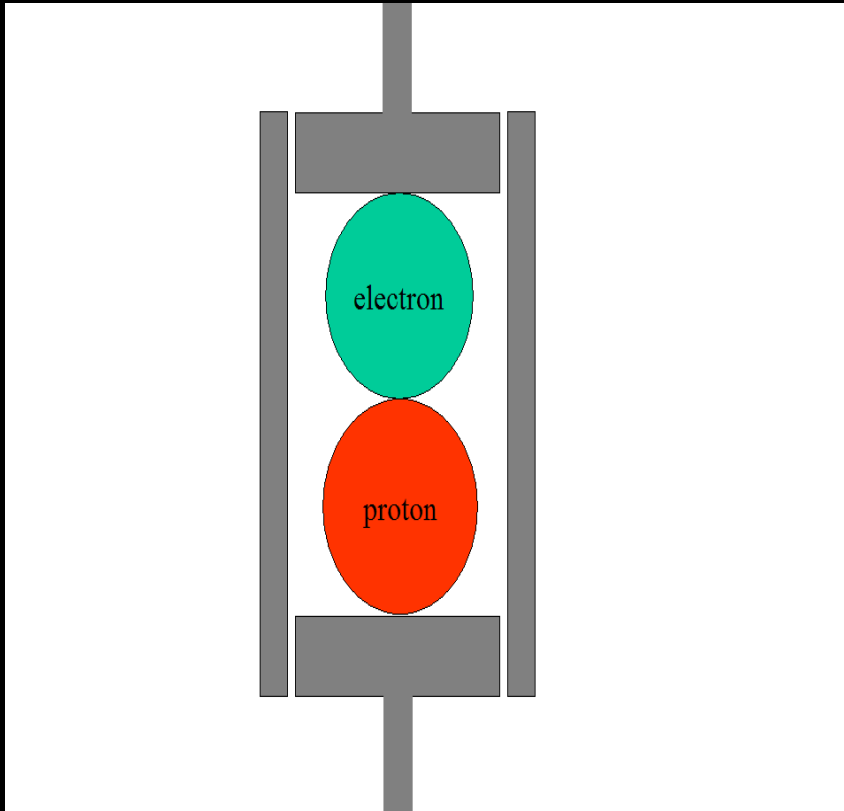


Gwiazdy masywne



Źródło energii	Główny produkt	Gwiazda o masie 25 M _⊙		
		temp. [K]	gęstość (g/cm ³)	trwanie
palenie wodoru	hel	7×10 ⁷	10	10 ⁷ lat
reakcja 3α	węgiel, tlen	2×10 ⁸	2000	10 ⁶ lat
palenie węgla	Ne, Na, Mg, Al	8×10 ⁸	10 ⁶	10 ³ lat
palenie neonu	O, Mg	1.6×10 ⁹	10 ⁷	3 lata
palenie tlenu	Si, S, Ar, Ca	1.8×10 ⁹	10 ⁷	0.3 roku
palenie krzemu	nikiel (rozpadający się do żelaza)	2.5×10 ⁹	10 ⁸	5 dni

Gwiazdy masywne



Dalsza ewolucja zależy od tego jak masywne jest jądro.

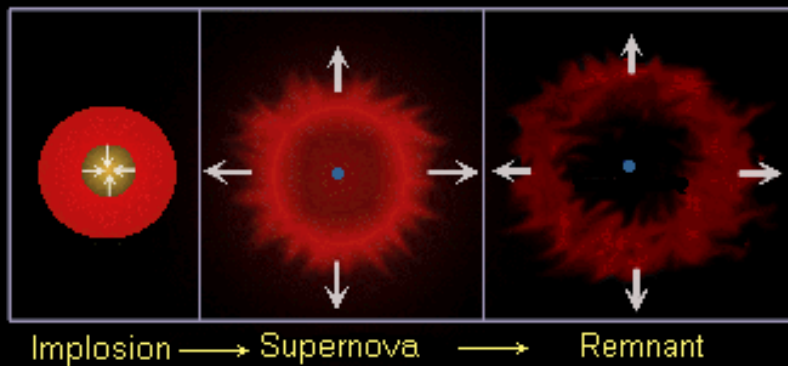
Jeżeli jego masa nie przekracza $1.4 M_{\odot}$ to gwiazda kończy jako biały karzeł.

Gdy masa jądra jest większa to jego kurczenie nie jest zatrzymywane przez degenerację materii i kurczenie trwa aż do momentu gdy elektrony zostaną „wciśnięte” w jądra atomów żelaza.

W wyniku tego powstaje gwiazda zbudowana z samych neutronów – gwiazda neutronowa.

Gwiazdy masywne

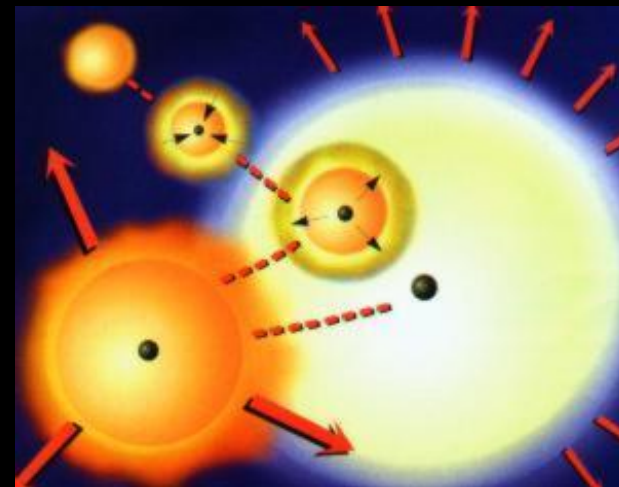
The supernova phenomenon



Wybuch supernowej 1987 w LMC

Podczas kurczenia centrum gwiazdy zapadają się także warstwy zewnętrzne.

Gwiazda neutronowa pojawia się bardzo szybko i towarzyszy jej ogromny strumień neutrin – są one przyczyną gwałtownych reakcji termojądrowych w zewnętrznych warstwach – następuje wtedy synteza pierwiastków cięższych od żelaza



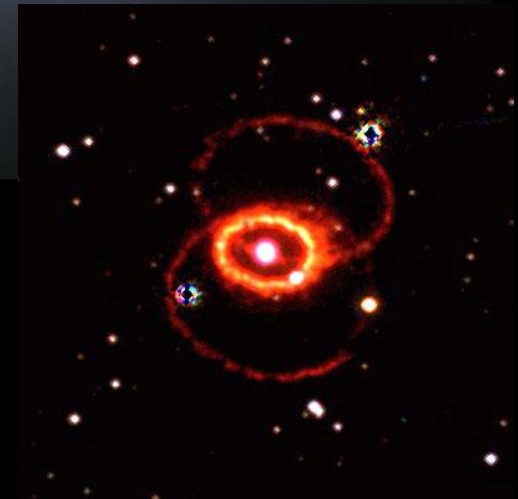
Gwiazdy masywne

supernowa 1994D w galaktyce NGC 4526



Podczas wybuchu supernowej emitowana jest ogromna ilość energii sięgająca 10^{44} J

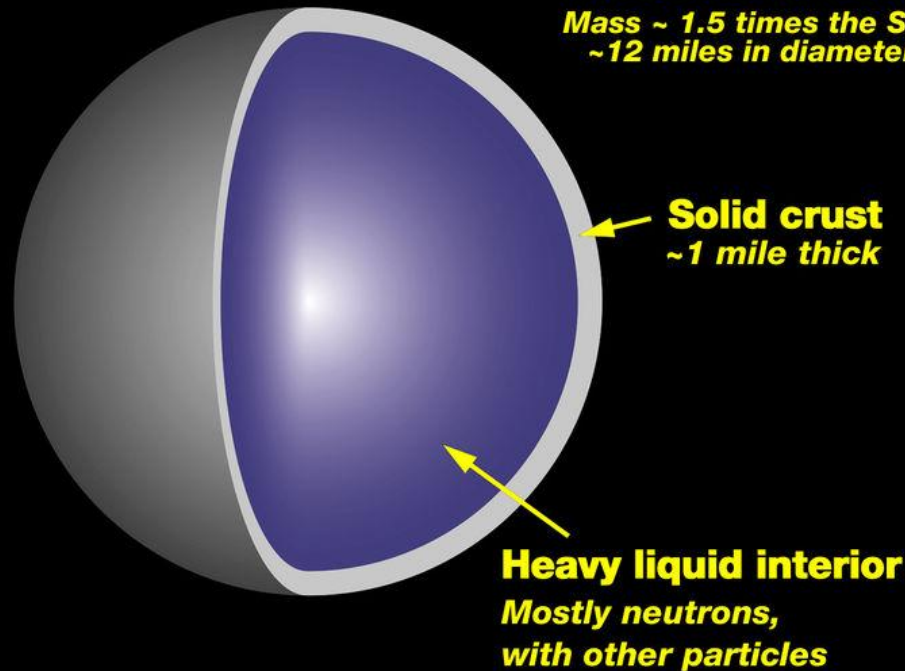
Supernowa staje się jasna jak cała galaktyka...



Gwiazdy masywne

Neutron Star

Mass ~ 1.5 times the Sun
~12 miles in diameter



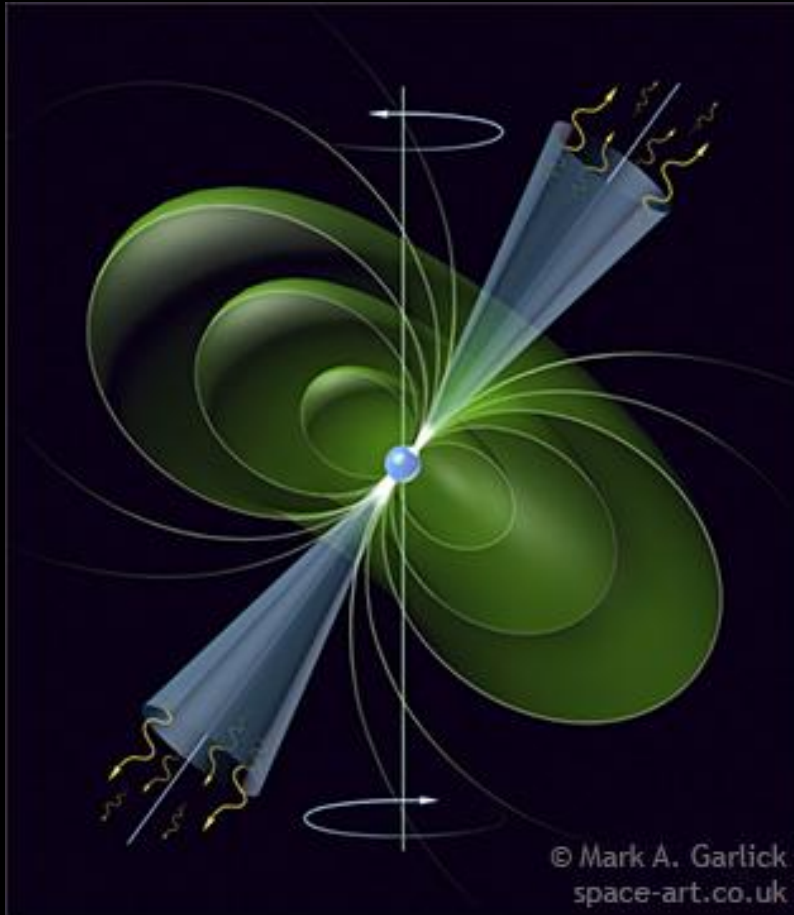
Wybuchy supernowych obserwowane były w przeszłości, a dziś widzimy w tych miejscach pozostałości w postaci charakterystycznych obiektów mgławicowych.

Jednak po supernowej powinna zostać jeszcze gwiazda neutronowa.

Jak zaobserwować taki dziwny obiekt?

Kluczem do tej zagadki okazało się pole magnetyczne gwiazdy neutronowej

Gwiazdy masywne



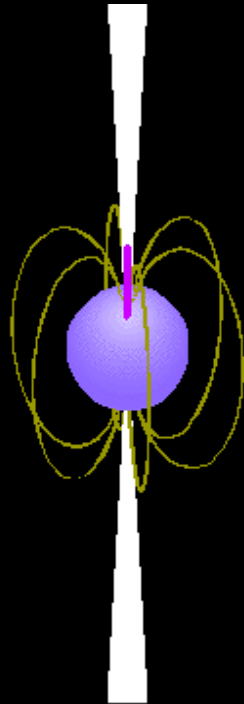
Pole magnetyczne gwiazdy neutronowej jest bardzo dobrym akceleratorem cząstek.

Cząstki rozpędzone do ogromnych prędkości zderzają się z zewnętrznymi warstwami gwiazdy neutronowej w okolicach biegunów magnetycznych.

W wyniku zderzeń produkowane jest promieniowanie, które możemy rejestrować.

Po raz pierwszy dokonała tego Jocelyn Bell w 1967 roku.

Gwiazdy masywne



© 2004 The Trustees of Amherst College. www.amherst.edu/~qsgrinstein/progs/animations/pulsar_beacon/

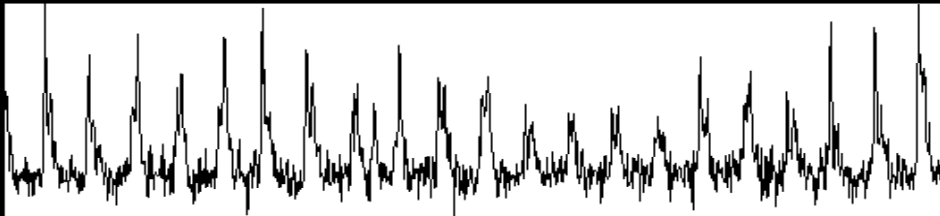
Promieniowanie związane z gwiazdą neutronową ma postać bardzo krótkich impulsów rejestrowanych głównie w zakresie radiowym.

Stąd nazwa tych obiektów – pulsary.

Związane jest to z tym, że oś rotacji pulsara nie pokrywa się z osią pola magnetycznego

Pulsary rotują niewiarygodnie szybko.

Typowe okresy obrotu (odległości między kolejnymi pulsami) są rzędu 0.1 – 0.01 s! W takim czasie obiekt o rozmiarach rzędu kilkunastu kilometrów dokonuje pełnego obrotu wokół własnej osi.

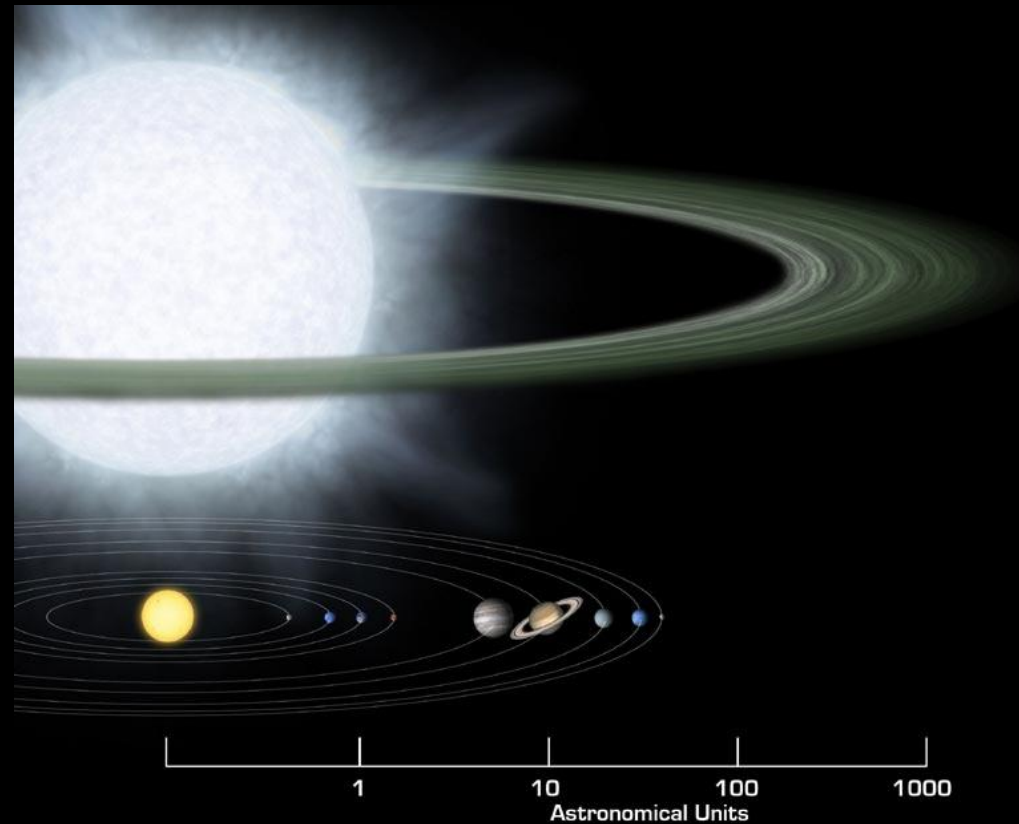


Gwiazdy masywne

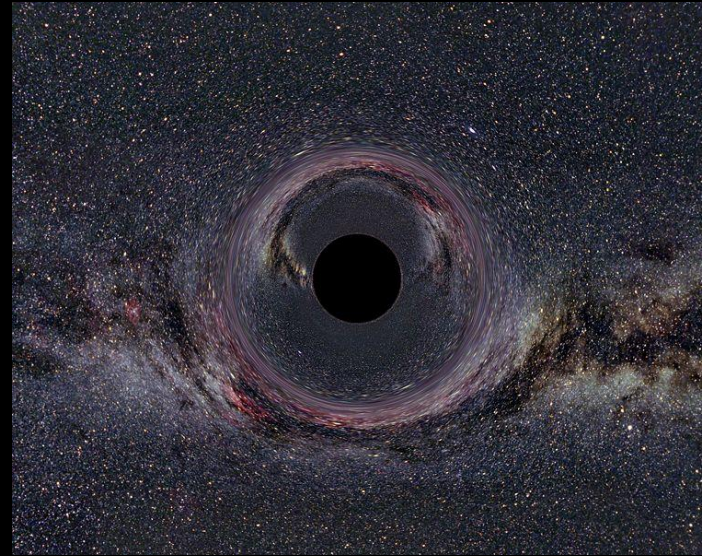
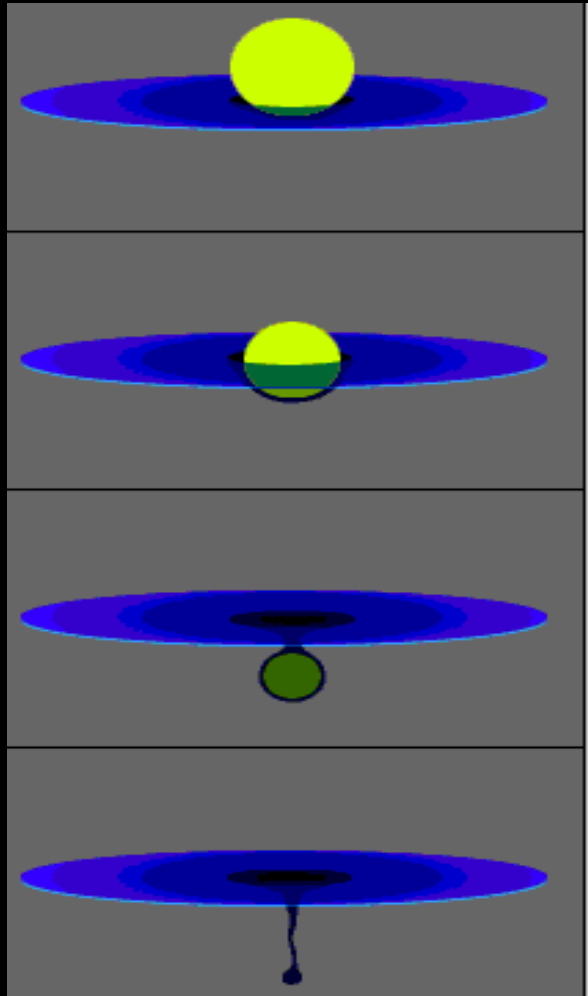
Najbardziej masywne gwiazdy nie kończą życia jako gwiazdy neutronowe.

Jeśli masa jądra gwiazdy znajdującej się w końcowej fazie ewolucji przekroczy $2.1 M_{\odot}$ to zapadanie jądra nie zostaje zatrzymane przez powstanie materii neutronowej.

Jądro zapada się dalej aż do punktu – powstaje czarna dziura.



Gwiazdy masywne

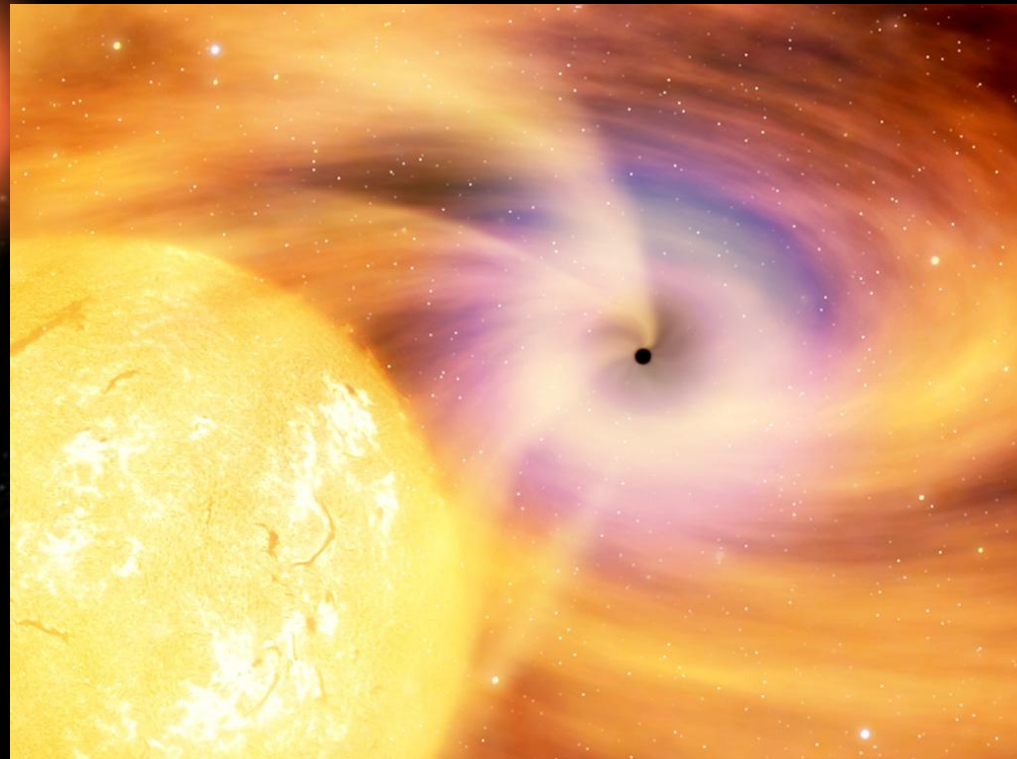


Tak może wyglądać czarna dziura.

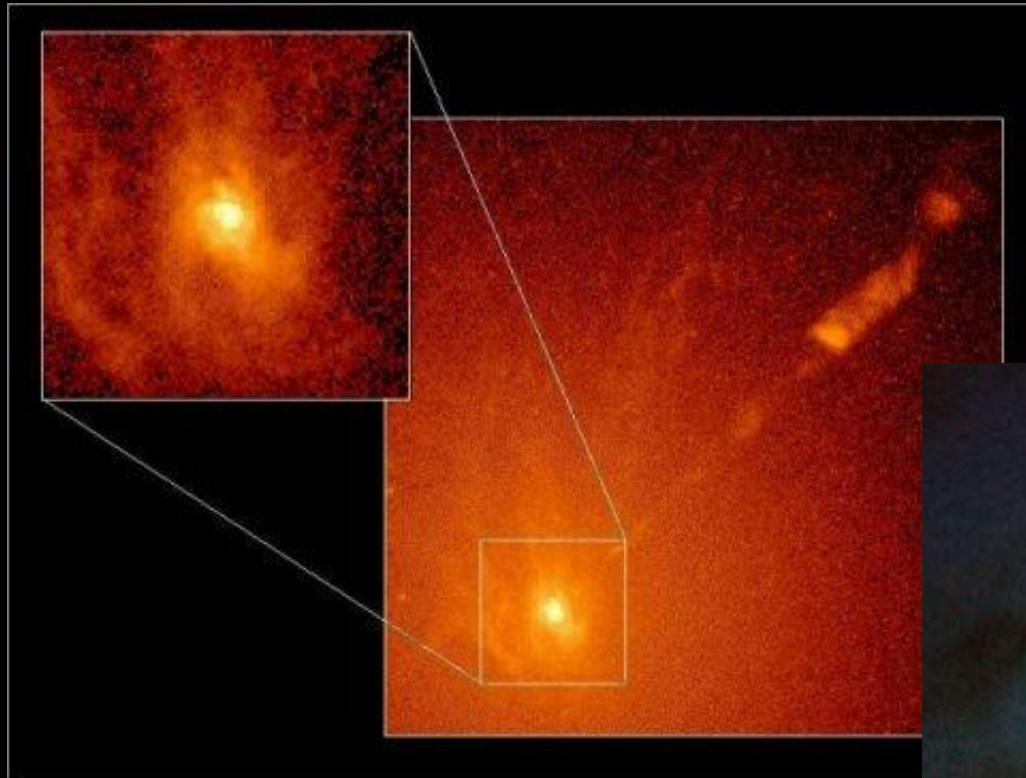
Zniekształcony obraz dookoła niej bierze się z zakrzywienia przestrzeni jakie wywołuje każdy obiekt posiadający masę, ale czarna dziura zakrzywia przestrzeń wyjątkowo silnie (duża masa w bardzo małej objętości).

Gwiazdy masywne

Czarne dziury obserwujemy pośrednio – dzięki efektom jakie wywołują. Głównym źródłem informacji na ich temat są zjawiska obserwowane w otoczeniu tych niewidocznych obiektów.

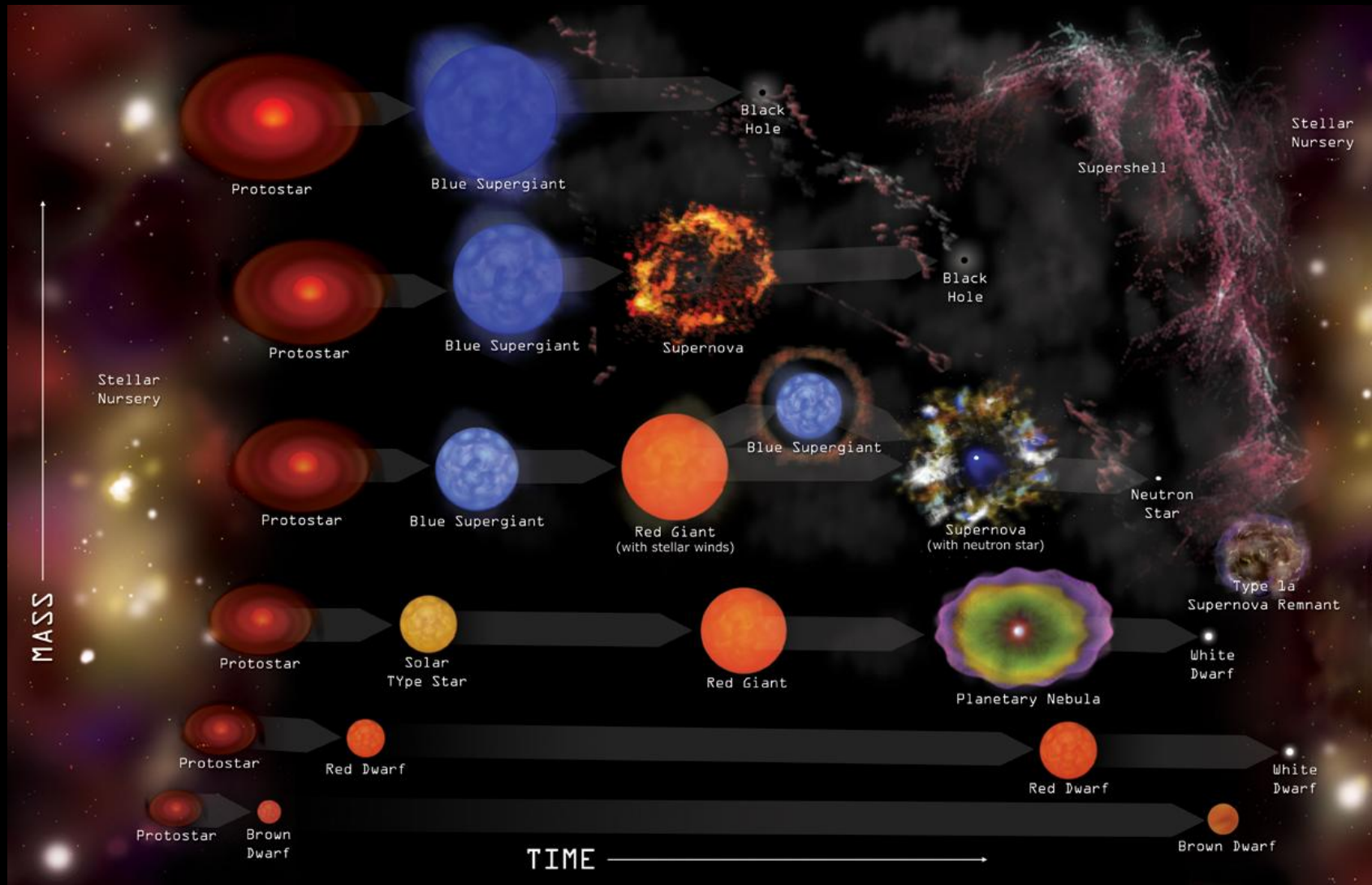


Gwiazdy masywne



Przykładowe obserwacje czarnych dziur

Sens życia gwiazd





KONIEC