

Ewolucja gwiazd oczami teleskopów

**Hubble,
Spitzer i
Chandra**



**Tomasz Mrozek
Instytut Astronomiczny
Uniwersytet Wrocławski**

Diagram H-R

Przedstawiony w 1911 roku przez E. Hertzsprunga

Udoskonalony w 1913 roku przez H.N. Russella

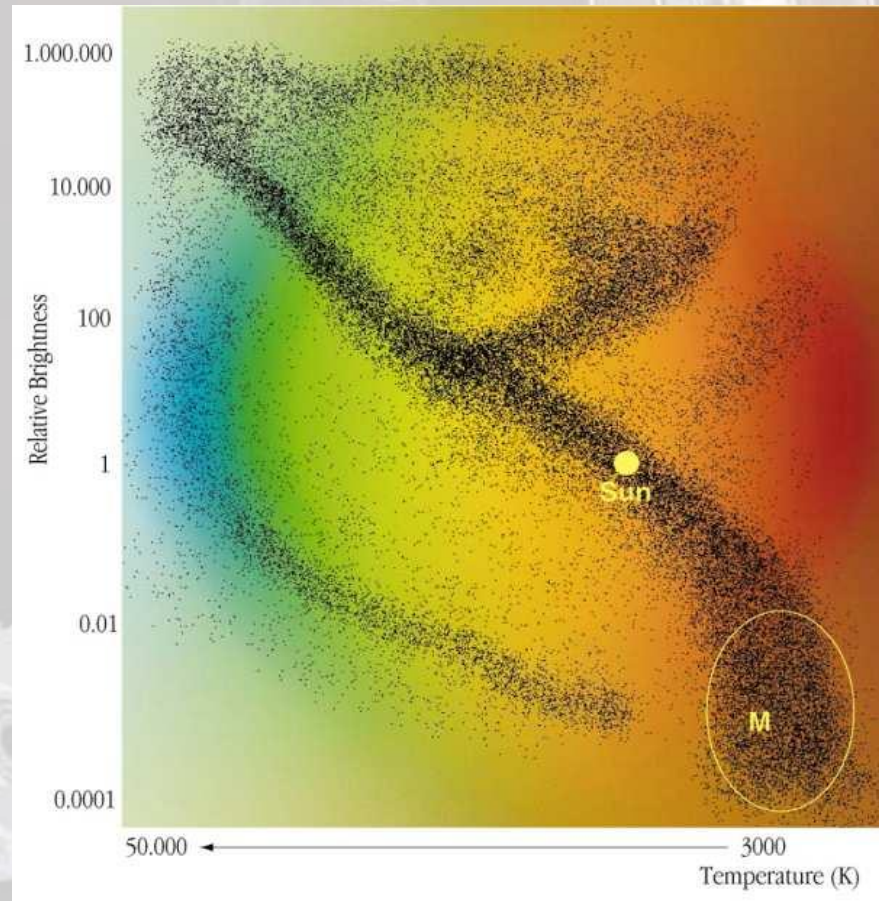
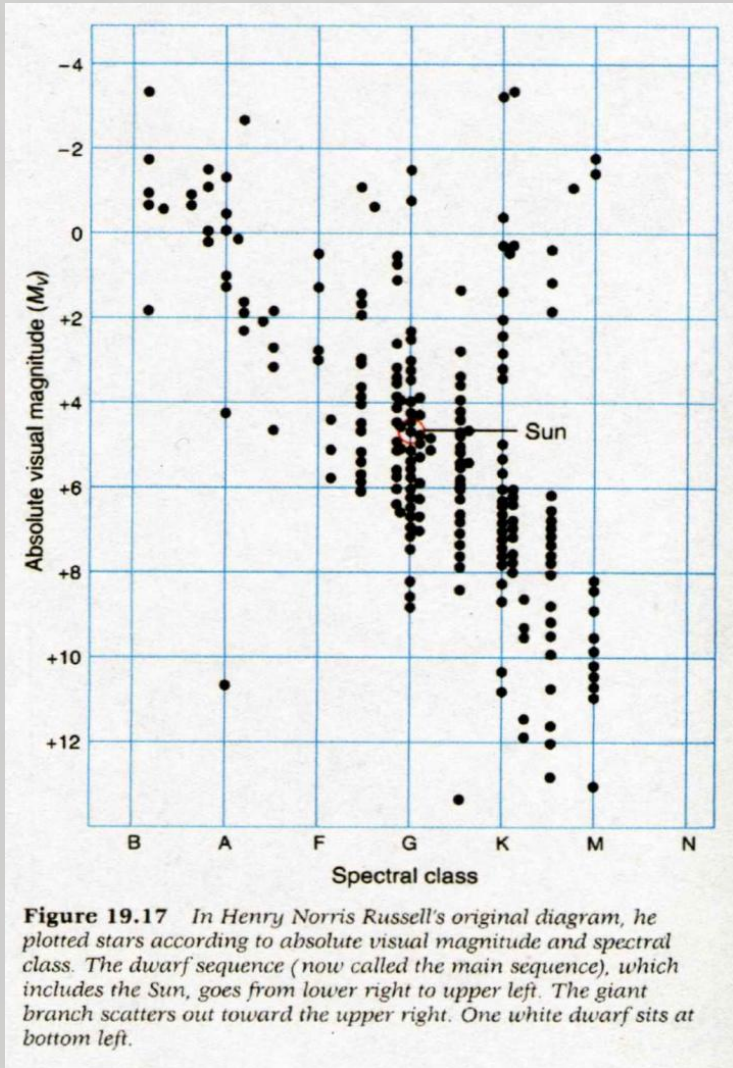
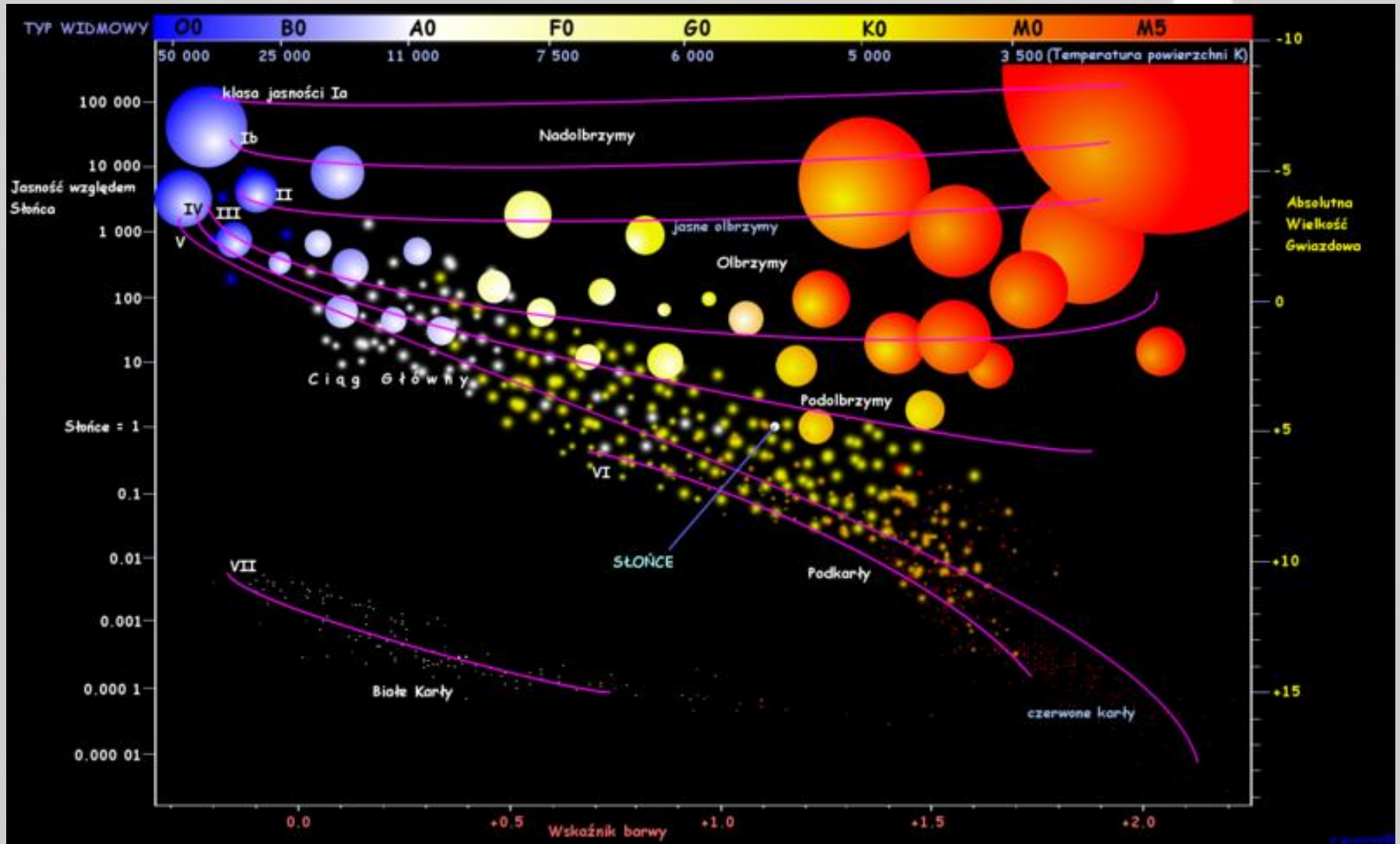
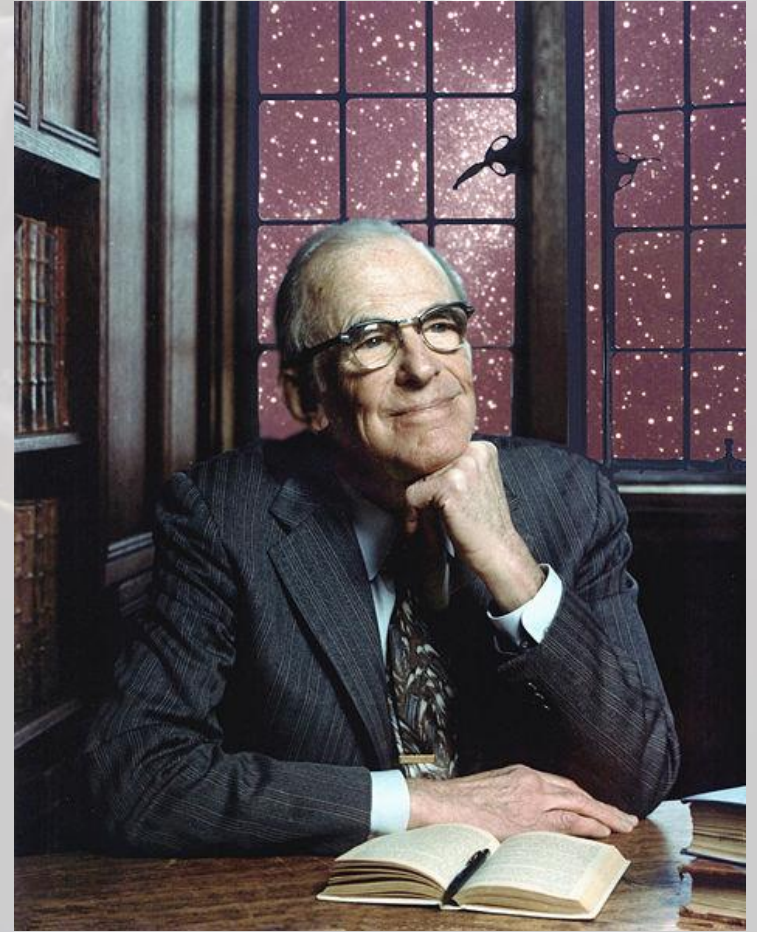
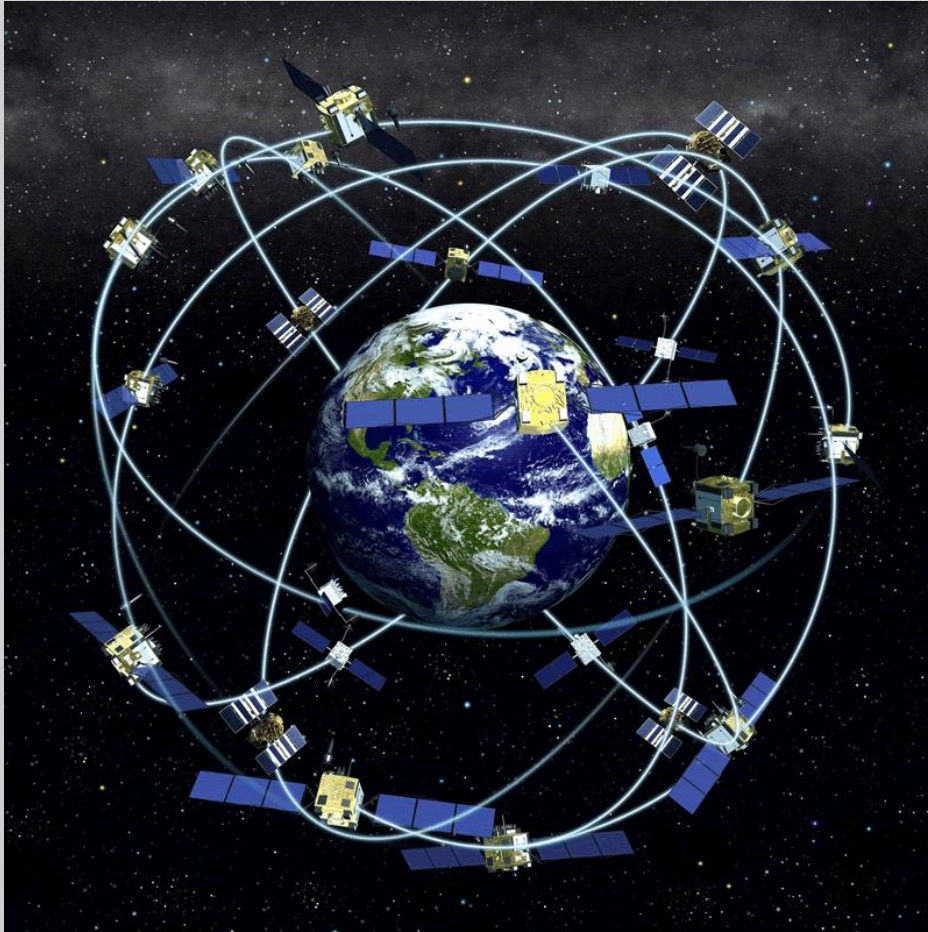


Diagram H-R



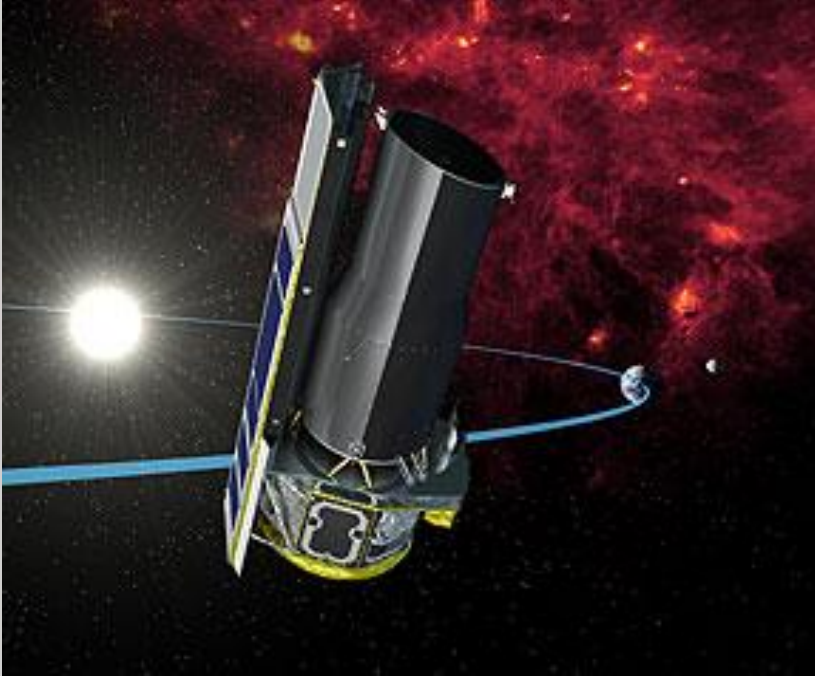
Charakterystyczny rozkład gwiazd na diagramie H-R tłumaczy teoria ewolucji gwiazd

Lyman Spitzer Jr. (26.06.1914 – 31.03.1997)



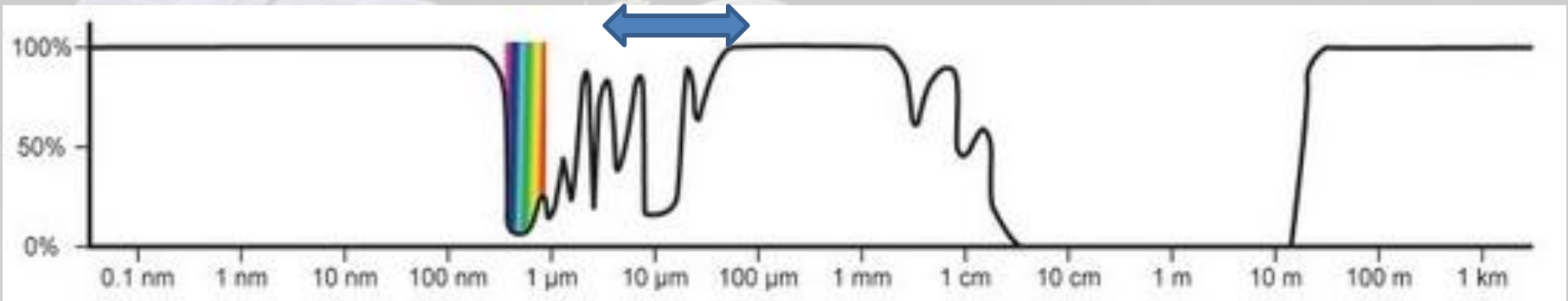
W 1946 r. zaproponował umieszczenie dużego teleskopu na sztucznym satelicie

Kosmiczny Teleskop Spitzera

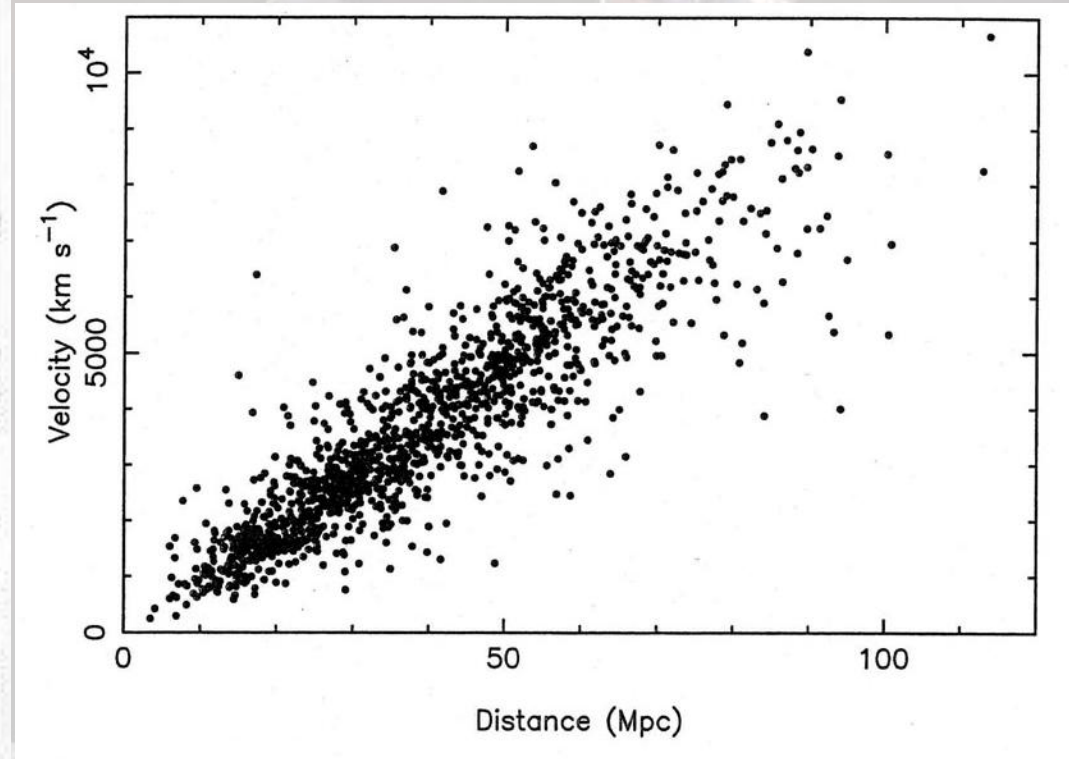


wystrzelony:
z zwierciadło:
zakres:
chłodzenie:

25.08.2003 r.
0.85 m
3-100 μm
-273 $^{\circ}\text{C}$



Edwin Hubble (20.11.1889 r. – 28.09.1953 r.)



$$v = H_0 r$$

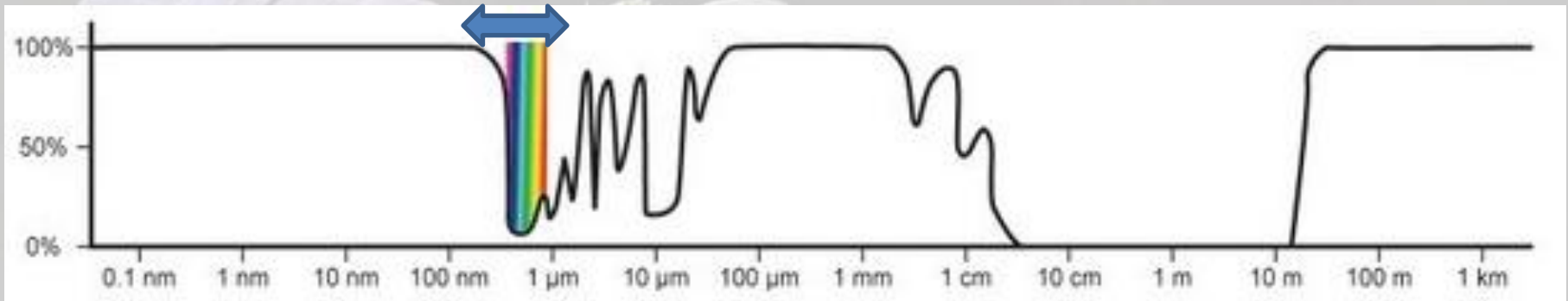
$$H_0 = 73 \pm 3 \text{ km/s/Mpc}$$

Kosmiczny Teleskop Hubble'a

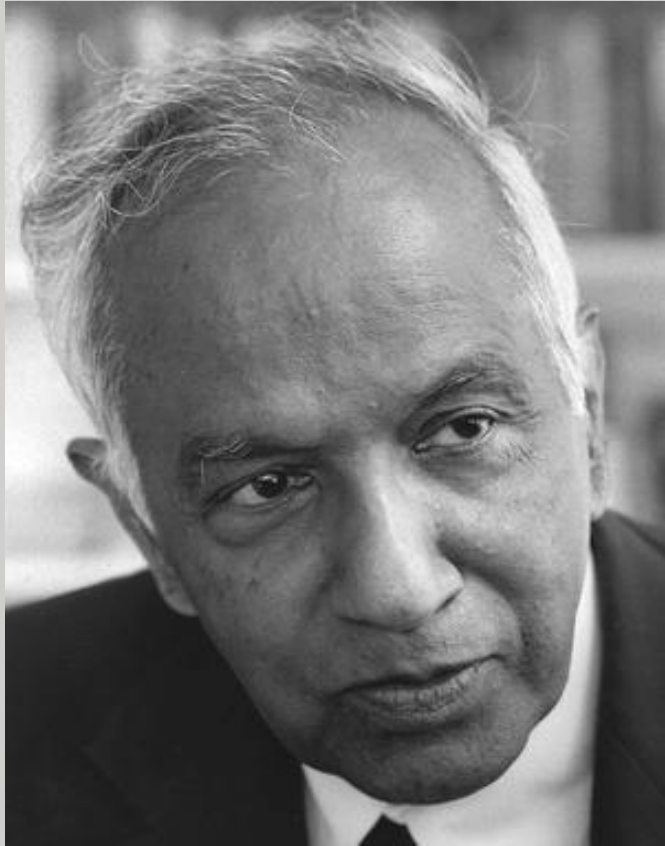


wystrzelony:
zwierciadło:
zakres:

24.04.1990 r.
2.4 m
UV, widzialne,
podczerwień



Subrahmanyan Chandrasekhar (Chandra)

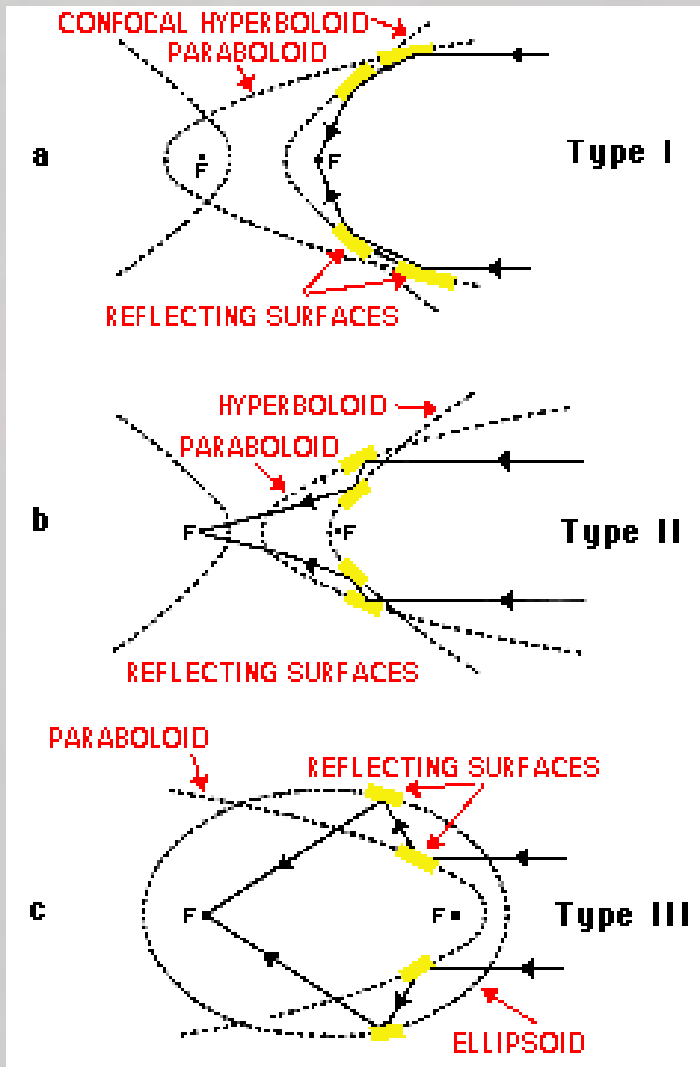


19.10.1910 r. – 21.08.1995 r.

Górny limit na masę białego karła: $\sim 1.4 M$



Teleskop Woltera

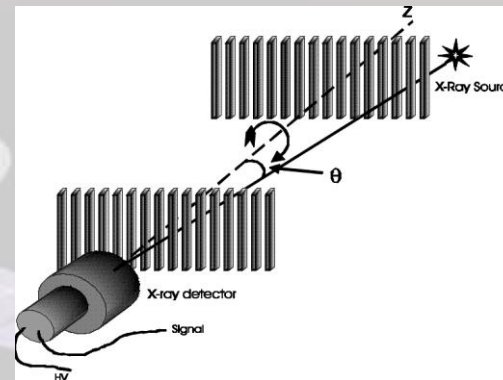


Kwantów promieniowania rentgenowskiego nie da się odbić od żadnej powierzchni, ale można pozwolić im się ślizgać.

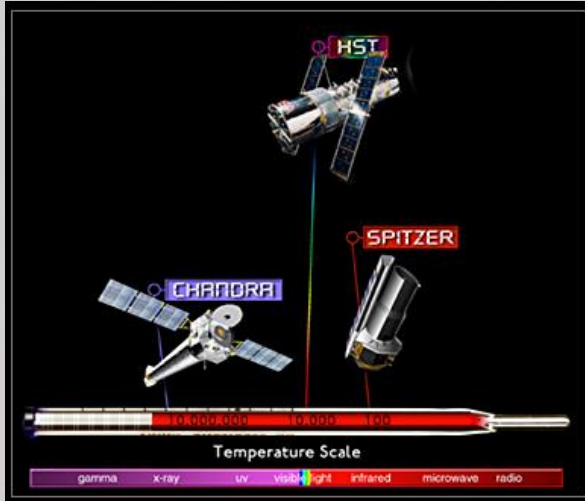
Taką ideę przedstawił w roku 1951 Hans Wolter.

Inne metody obrazowania:

- macierz kolimatorów (SMM)
- obrazowanie fourierowskie (RHESSI)

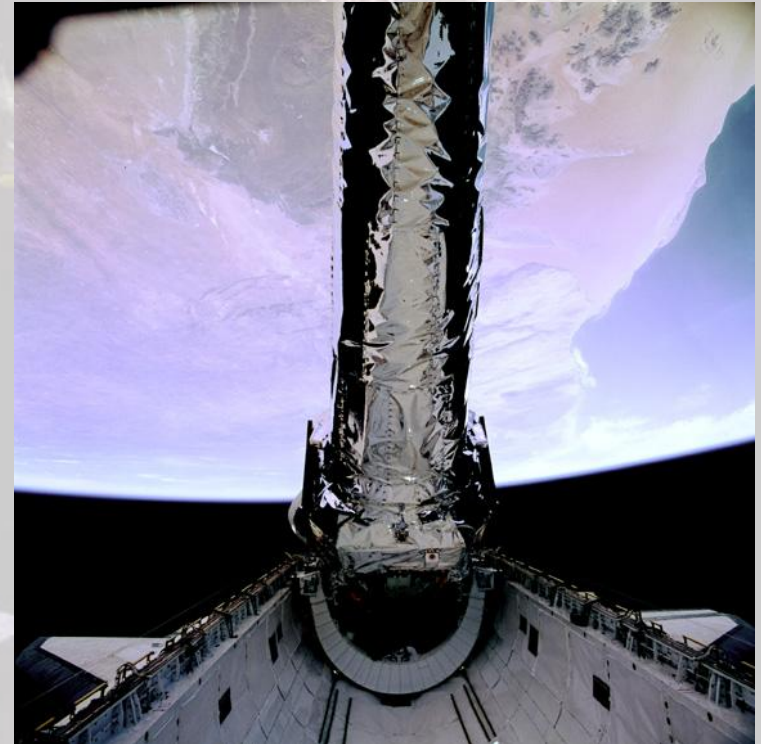


Kosmiczny Teleskop Chandra

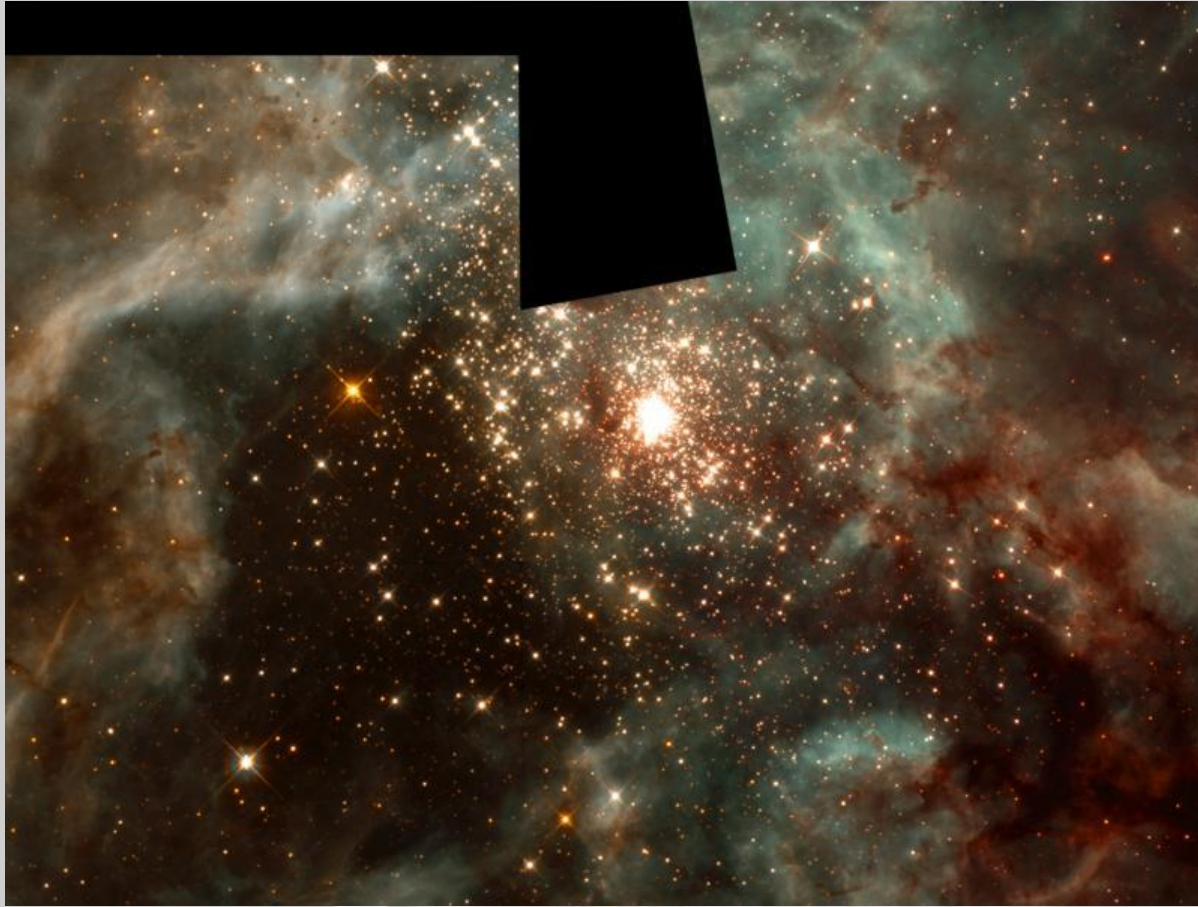


Chandra

- wyniesiony na orbitę 23 lipca 1999 r. za pomocą wahadłowca Columbia
- idealnie gładkie lustra pokryte warstwą irydu
- rozdzielczość ~ 0.25 arc sec
- eliptyczna orbita – odległość od Ziemi zmienia się od 16000 do około 139000 km



Gwiazdy rodzą się



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



HST

Materia międzygwiazdowa

Carina Nebula



Hubble
Heritage

NASA, ESA, N. Smith (University of California, Berkeley), and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
Hubble Space Telescope ACS/WFC • STScI-PRC07-16a

Materia międzygwiazdowa

Trifid Nebula



Hubble
Heritage

Gwiazdy rodzą się



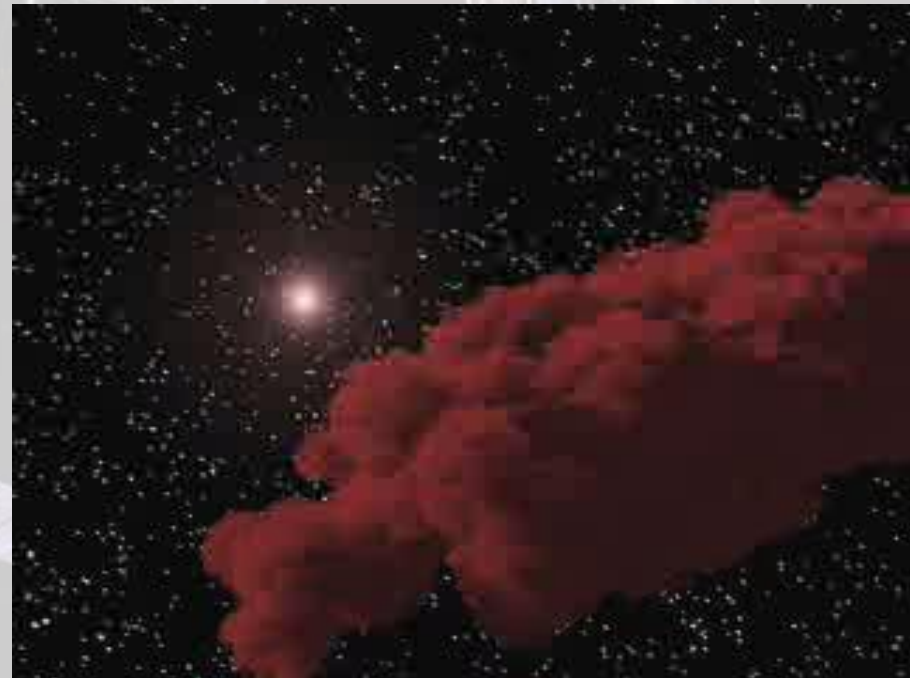
W5 Star Formation Region Spitzer Space Telescope • IRAC • MIPS

NASA / JPL-Caltech / L. Allen & X. Koenig (Harvard-Smithsonian CfA)

ssc2008-15a

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

Jednak obłok nie może zacząć zapadania samoistnie. Potrzebne jest jakieś zaburzenie.



Gwiazdy rodzą się



Galaxy NGC 1097

NASA / JPL-Caltech / The SINGS team (SSC/Caltech)

Spitzer Space Telescope • IRAC

ssc2009-14a

Mogą to być zgęszczenia w obszarach ramion spiralnych

Zderzenia galaktyk też sprzyjają powstawaniu gwiazd



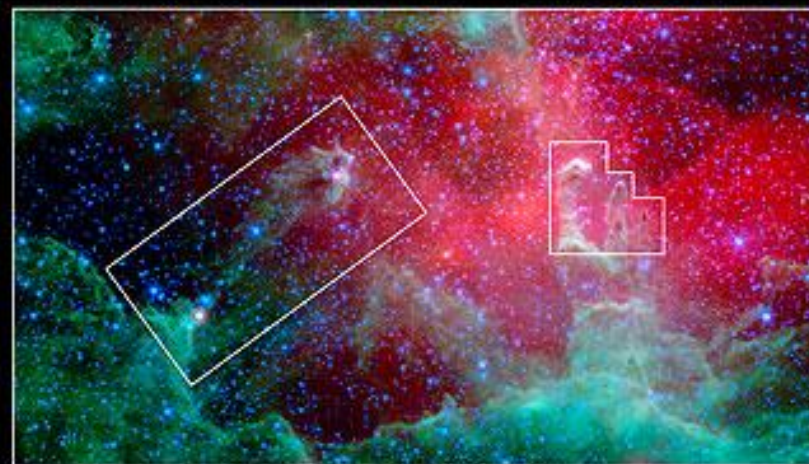
Gwiazdy rodzą się

NGC 4038-4039 • Antennae Galaxies



Hubble
Heritage

NASA, ESA, and The Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration • HST/ACS • STScI-PRC06-46



Eagle Nebula (M16) Pillars Spitzer Space Telescope • IRAC • MIPS
in Visible and Infrared Hubble Space Telescope (insets)

NASA / JPL-Caltech / N. Flagey (SSC/Caltech) & the MIPS/GAL Science Team

ssc2007-01d

Gwiazdy rodzą się

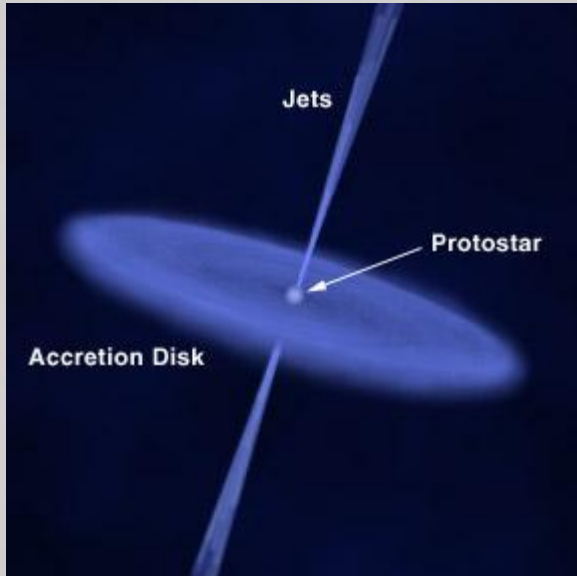


Globule Boka

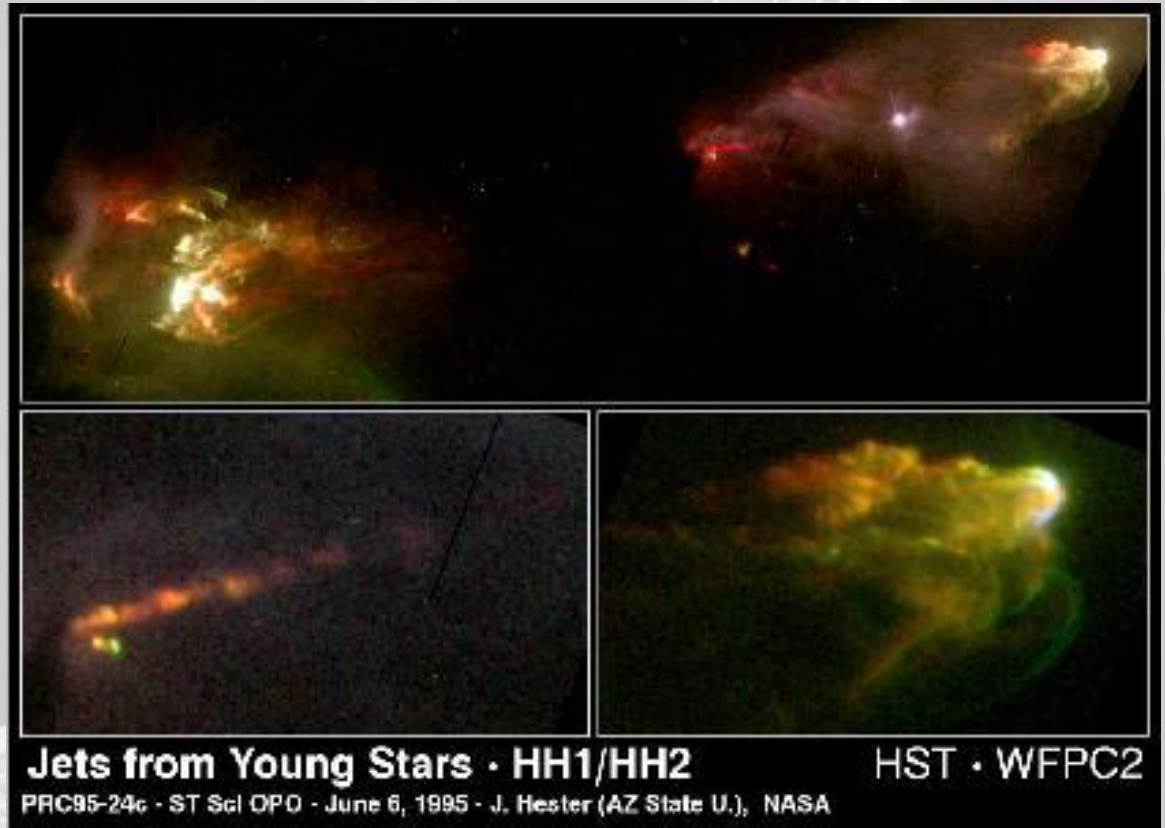
$M = 10-50 M_{\odot}$

$D = 1 \text{ rok } \text{św.}$

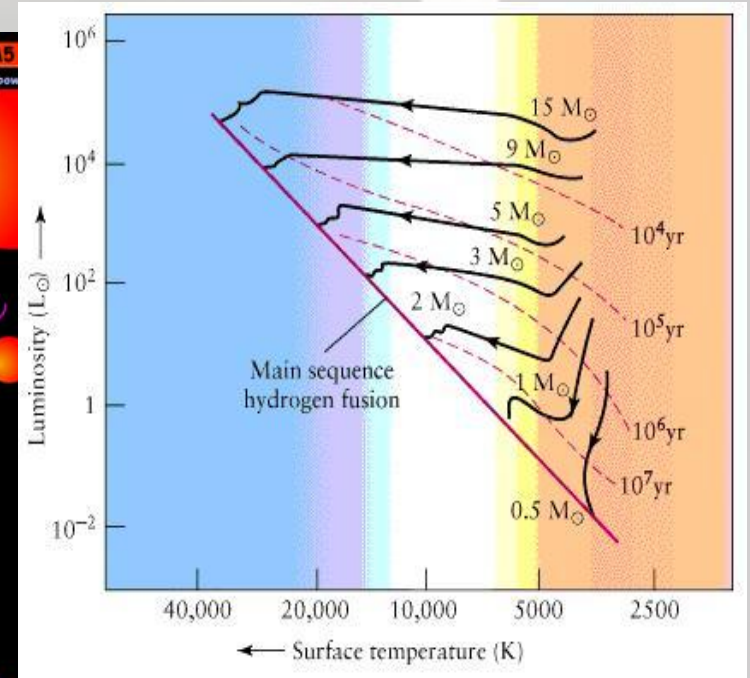
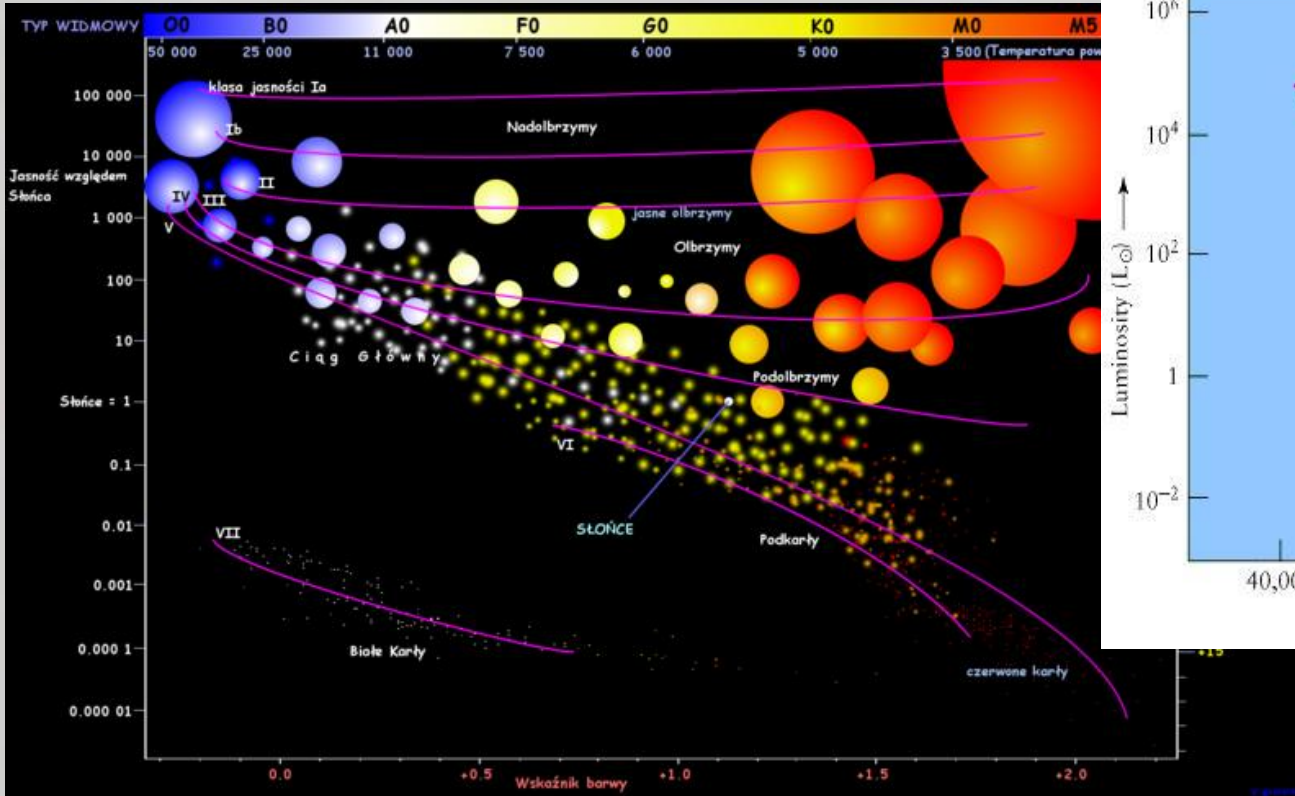
Gwiazdy rodzą się



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



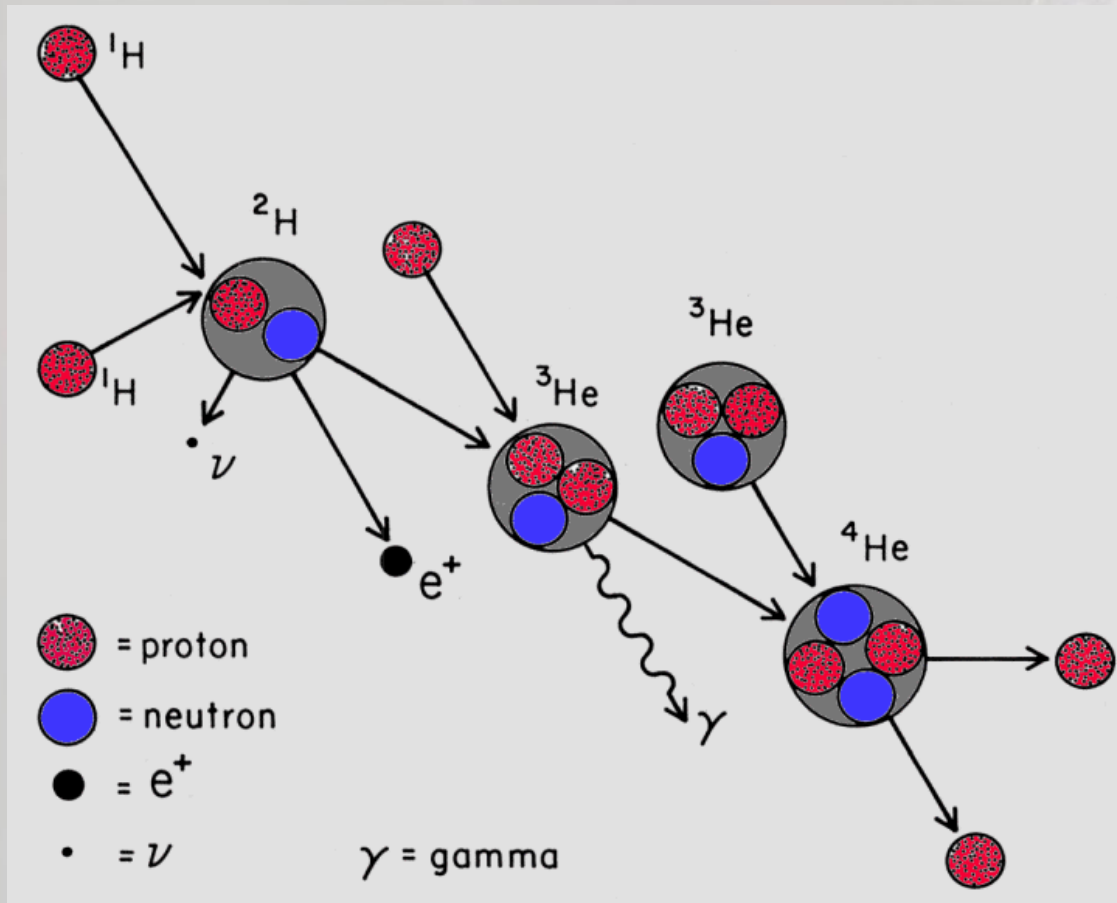
Gwiazdy rodzą się



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.

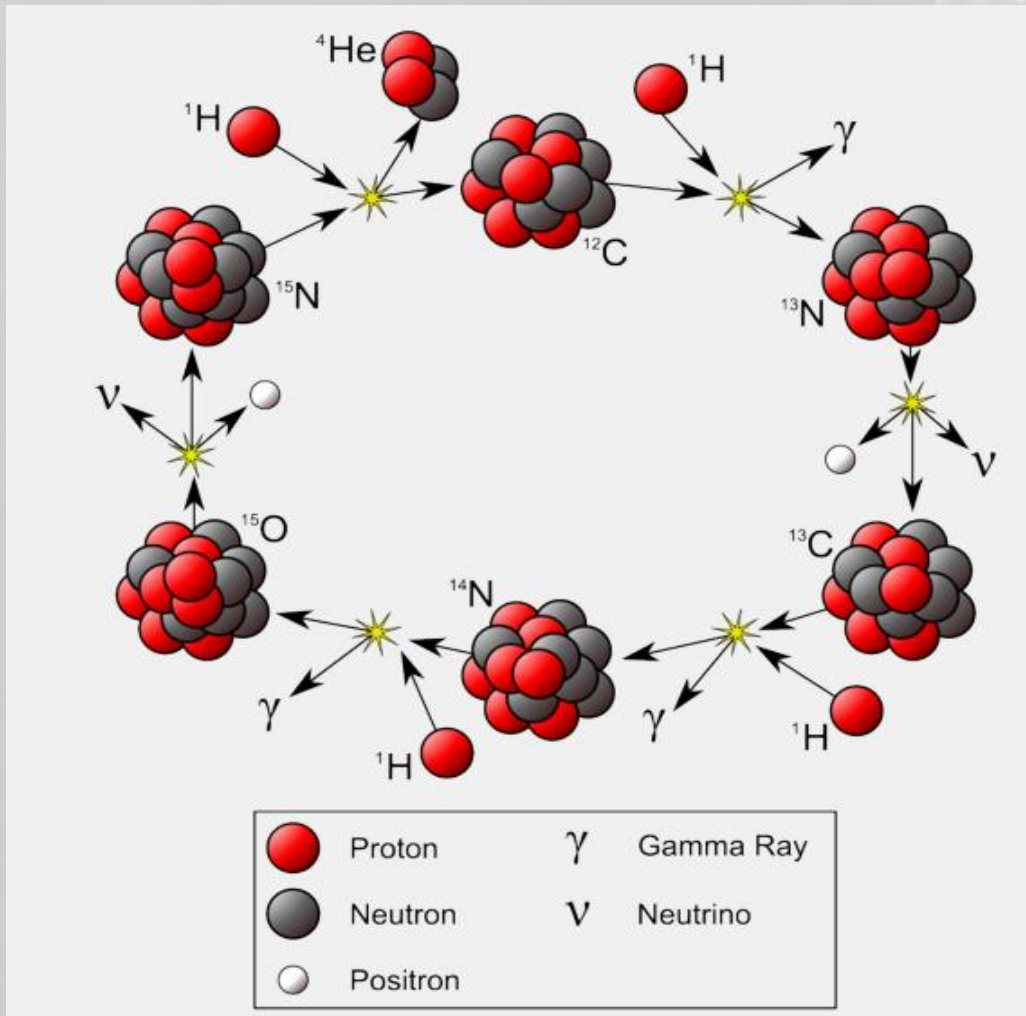
Dla Słońca:

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

Reakcja CNO

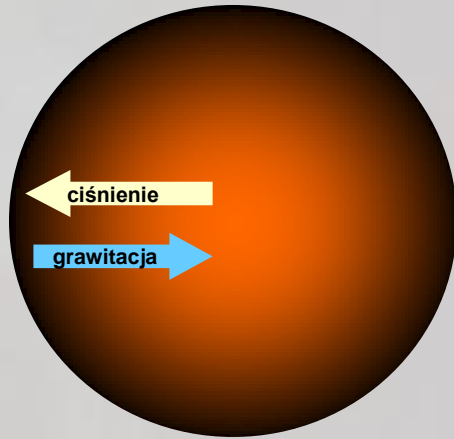


Inny rodzaj reakcji syntezy.

We wnętrzu Słońca panują warunki odpowiednie dla tej reakcji jednak jądro słoneczne jest zdominowane przez wodór i prawie cała energia pochodzi z reakcji p-p.

Ta reakcja staje się istotna dla gwiazd, które spaliły prawie cały wodór w jądrze oraz dla gwiazd bardzo masywnych

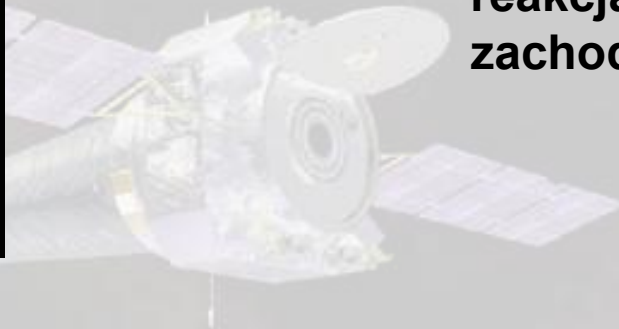
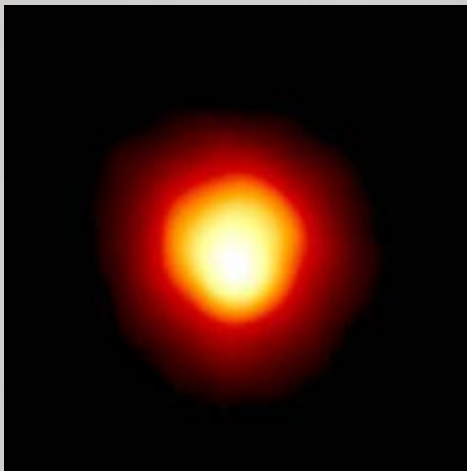
Życie na ciągu głównym



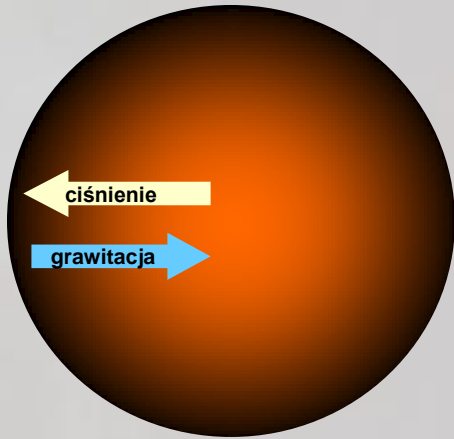
Gwiazda w równowadze:

gravitacja, która dąży do ściśnięcia gwiazdy jest powstrzymywana przez ciśnienie wytwarzane we wnętrzu.

to ciśnienie składa się z ciśnienia gazu (jest duże, bo w centrum jest wysoka temperatura) oraz ciśnienia promieniowania związanego z reakcjami termojądrowymi, które zachodzą we wnętrzu.



Życie na ciągu głównym

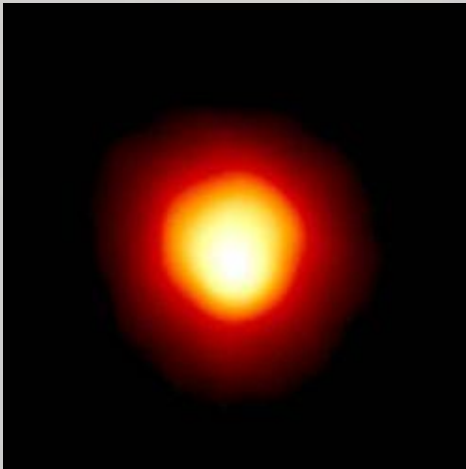


Równowaga zostaje zaburzona kiedy kończy się paliwo (wodór) we wnętrzu.

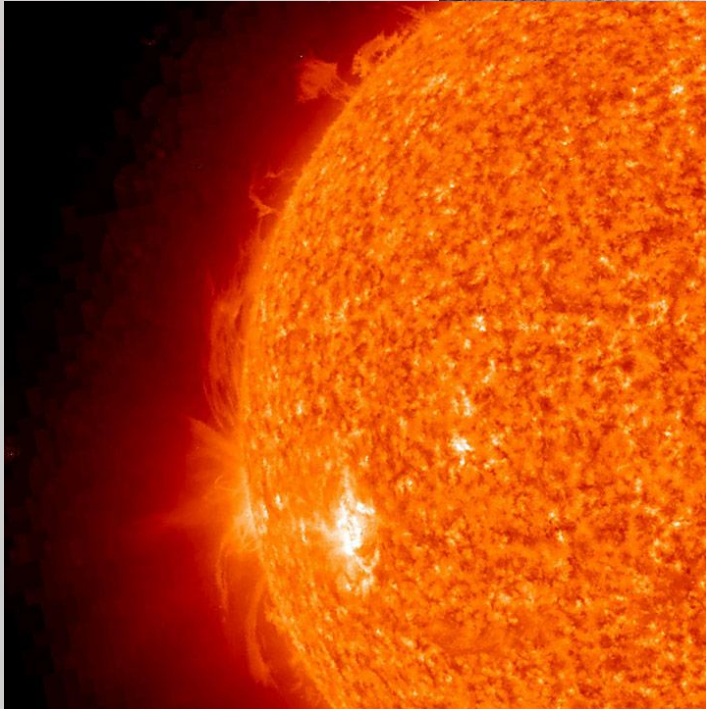
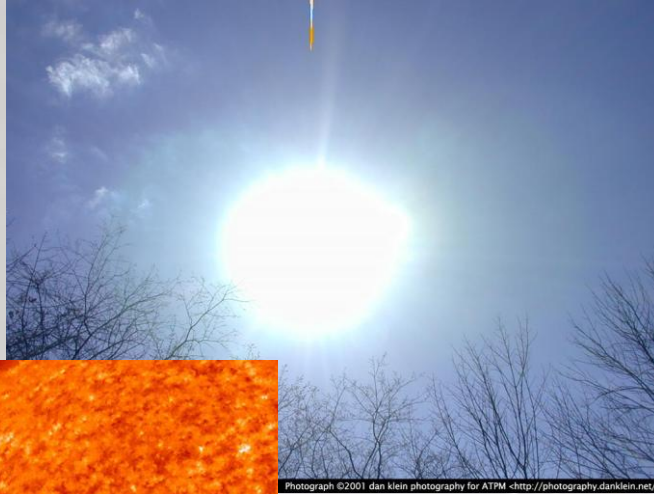
Ciśnienie maleje, bo jest mniej cząstek (mniejsze ciśnienie gazu) oraz maleje tempo reakcji termojądrowych (maleje ciśnienie promieniowania)

Czas po jakim nastąpi zachwianie równowagi zależy głównie od masy gwiazdy.

Od masy zależą także dalsze losy gwiazdy...



Gwiazdy o małej masie



Gwiazdy o masie:

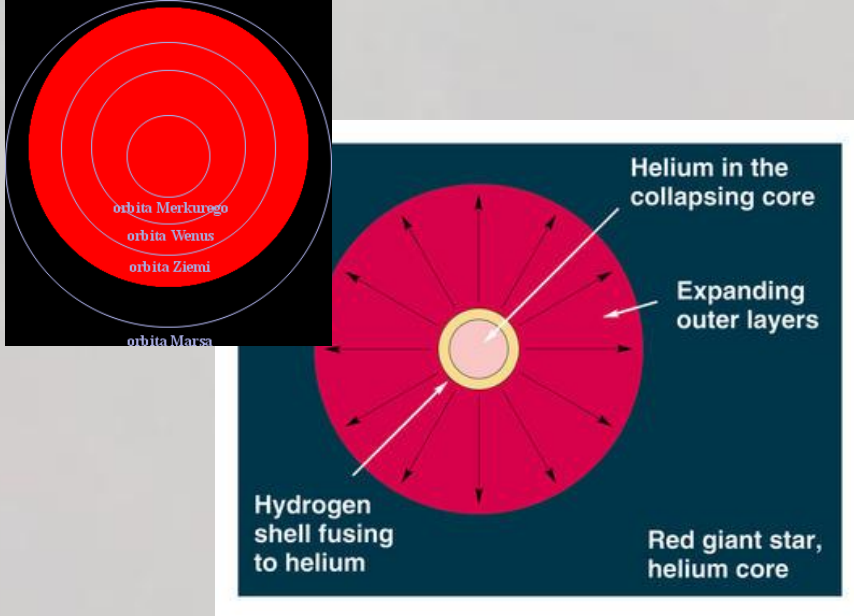
$$0,4 M_{\odot} < M < 1.5 M_{\odot}$$

**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

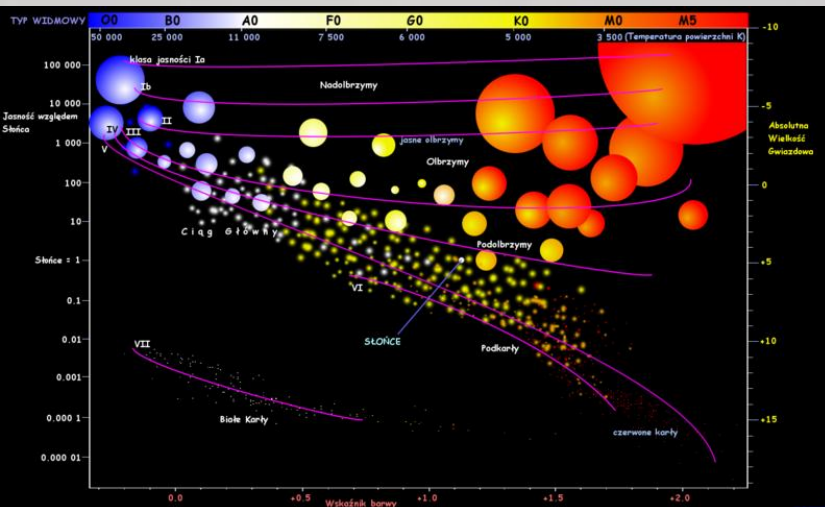


Zanim jednak centrum osiągnie odpowiednią temperaturę gwiazda przechodzi przez etap „czerwonego olbrzyma”-na diagramie H-R przesuwa się w prawo i w górę

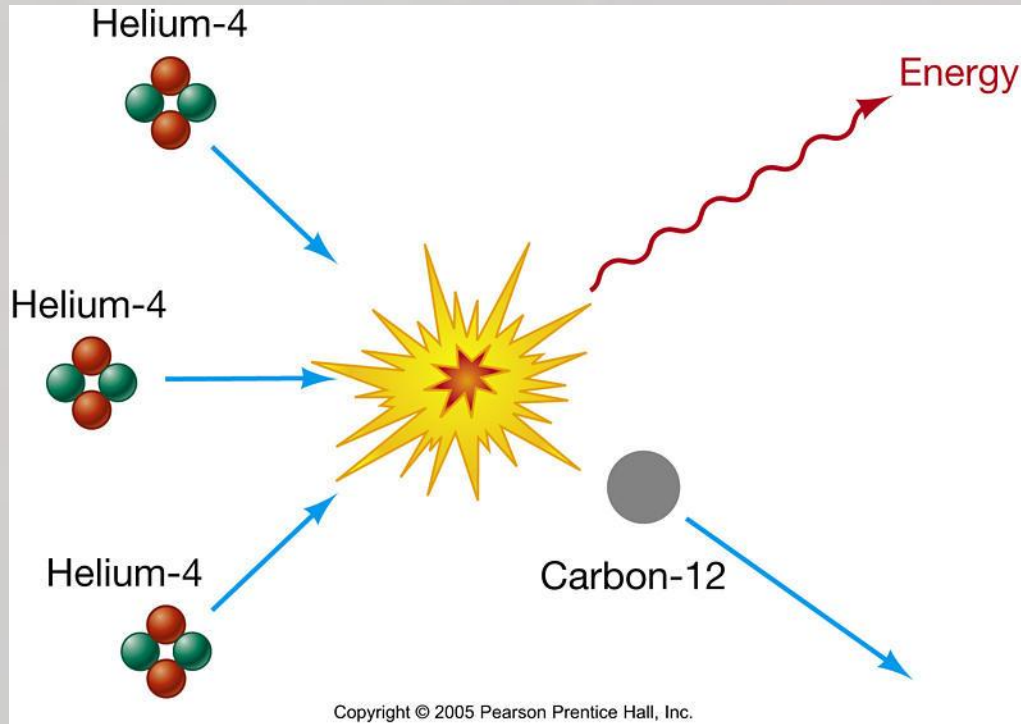
Jądro gwiazdy powoli zapada się. Wewnątrz nie ma już paliwa (wodoru). Temperatura jądra rośnie i zaczyna się spalanie wodoru w cienkiej warstwie wokół jądra.

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

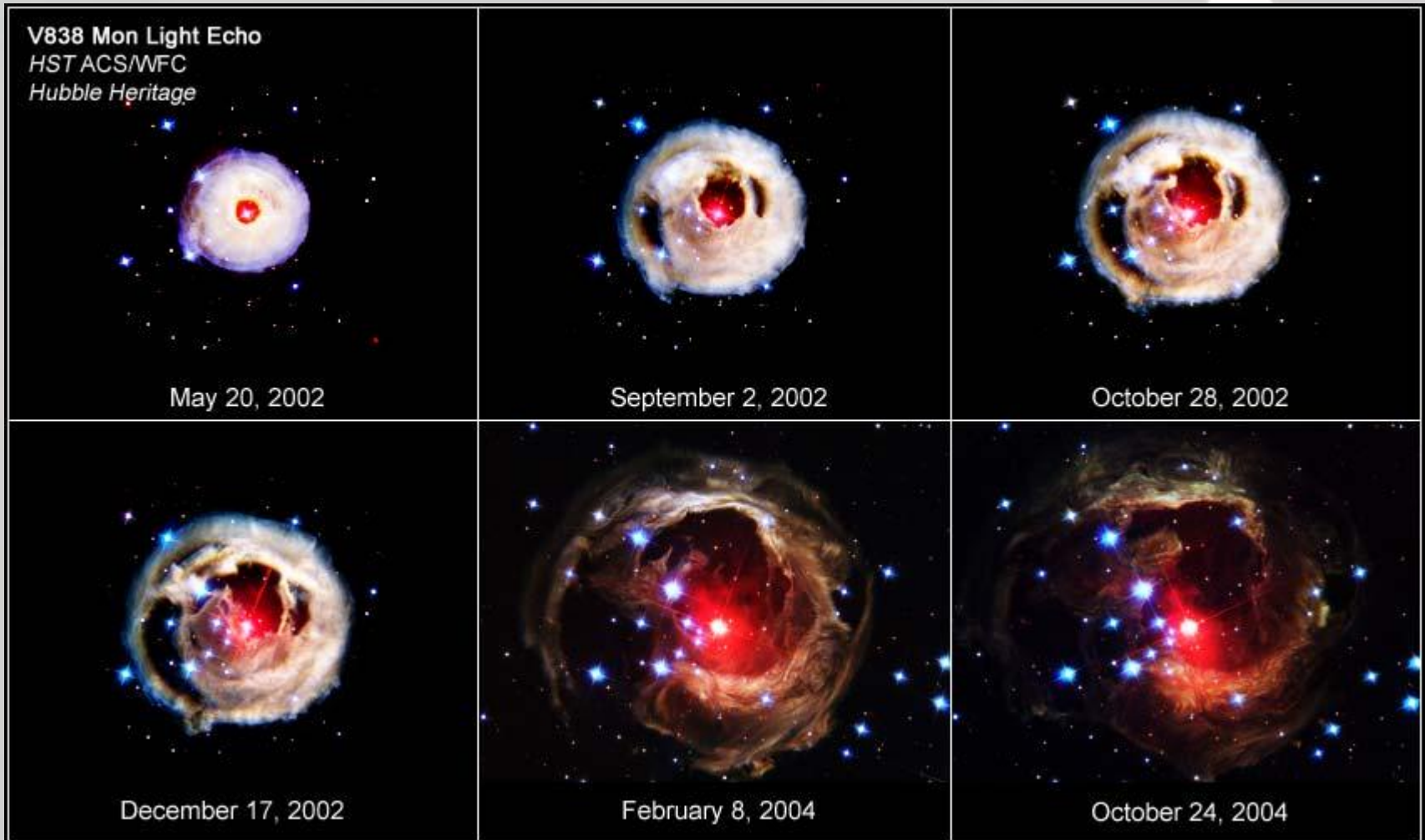


Kiedy jądro osiągnie $T \approx 10^8$ K rozpoczyna się nagle przemiana helu w węgiel (reakcja 3α), a gwiazda gwałtownie jaśnieje.

Reakcja 3α jest bardzo wrażliwa na zmiany temperatury. W wyniku jej gwałtownego rozpoczynania i zatrzymywania następuje odrzucanie zewnętrznych warstw gwiazdy.

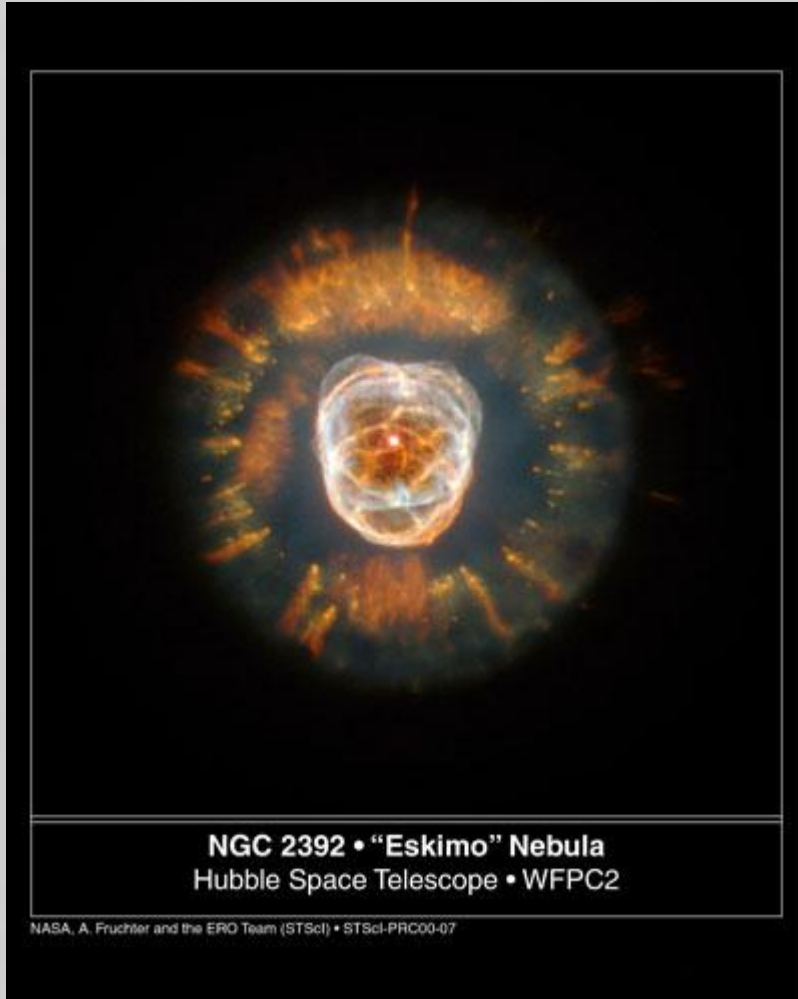
Po zapaleniu helu gwiazda znów jest w stanie równowagi. Ten stan nie trwa jednak długo.

Gwiazdy o małej masie



Echo świetlne pochodzące od wybuchu jaki miał miejsce w okolicy czerwonego olbrzyma

Gwiazdy o małej masie



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.

Zewnętrzne warstwy oddalają się od jądra i w pewnym momencie rozświetlają dzięki promieniowaniu ultrafioletowemu pochodzącemu od gorącego białego karła – obserwujemy tzw. mgławice planetarne.

Mgławice planetarne



The Helix Nebula

Spitzer Space Telescope • IRAC

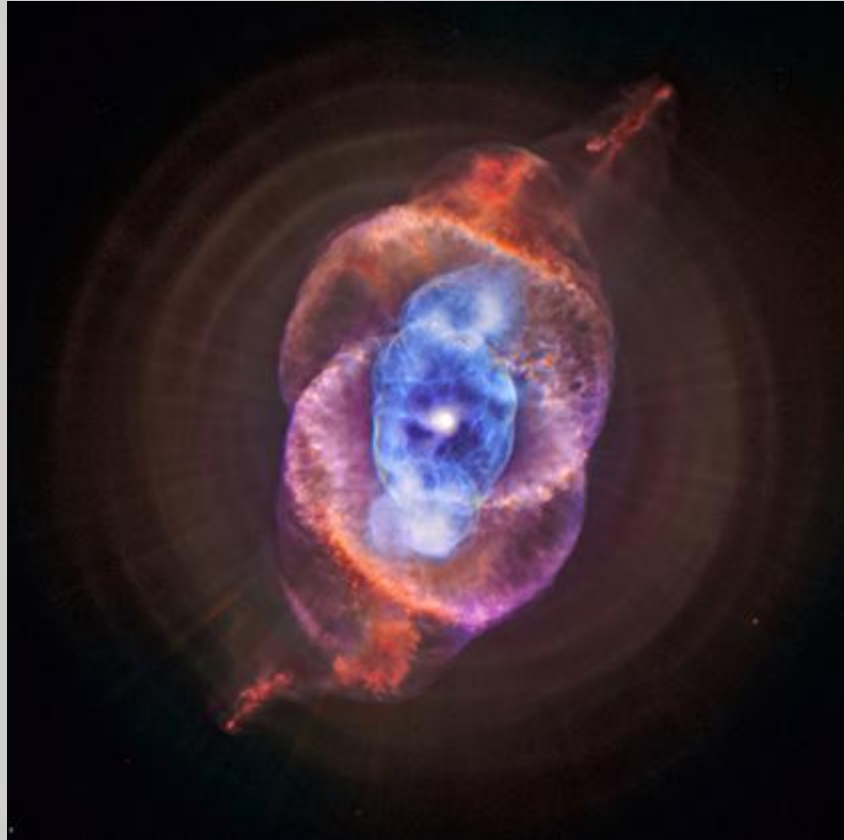
NASA / JPL-Caltech / J. Hora (Harvard-Smithsonian CfA)

ssc2006-01a



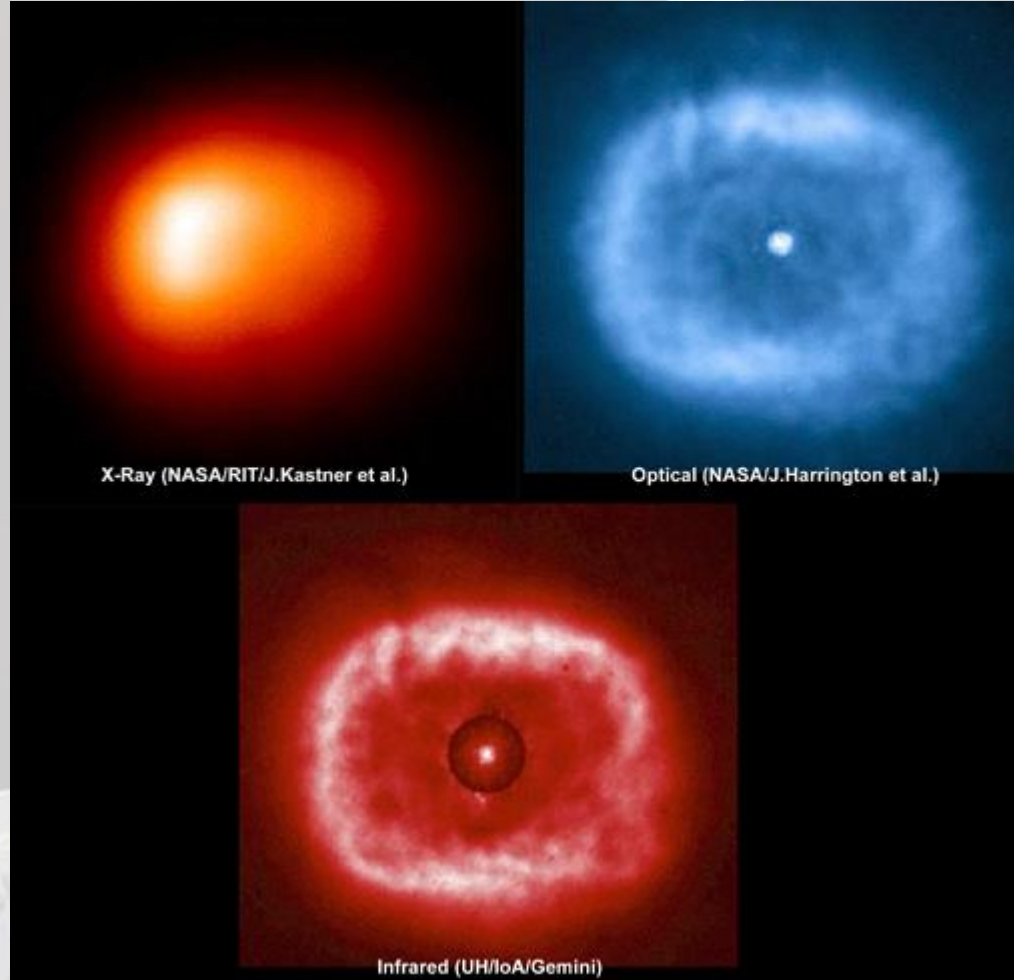
Mgławice planetarne

NGC 6543



HST + Chandra

BD+30-3639



X-Ray (NASA/RIT/J.Kastner et al.)

Optical (NASA/J.Harrington et al.)

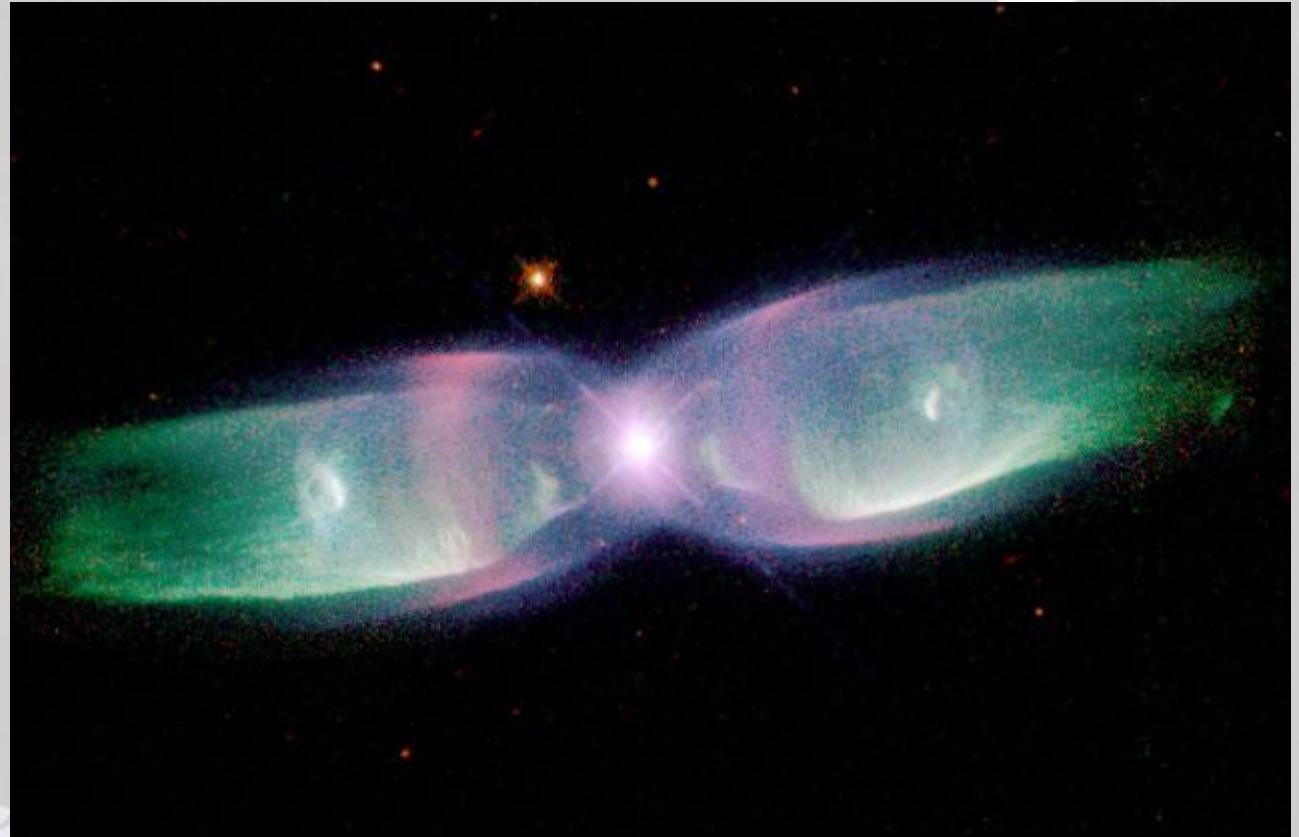
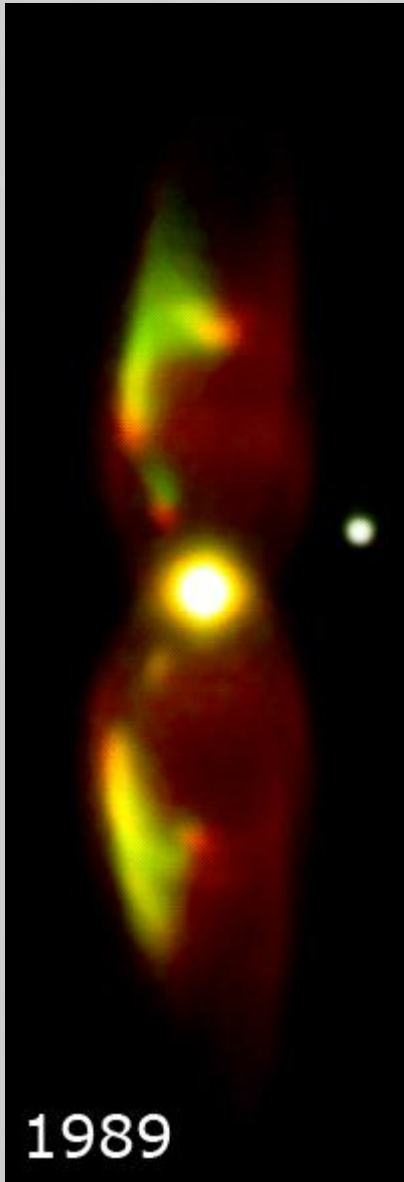
Infrared (UH/loA/Gemini)

Mgławice planetarne



HST + Chandra

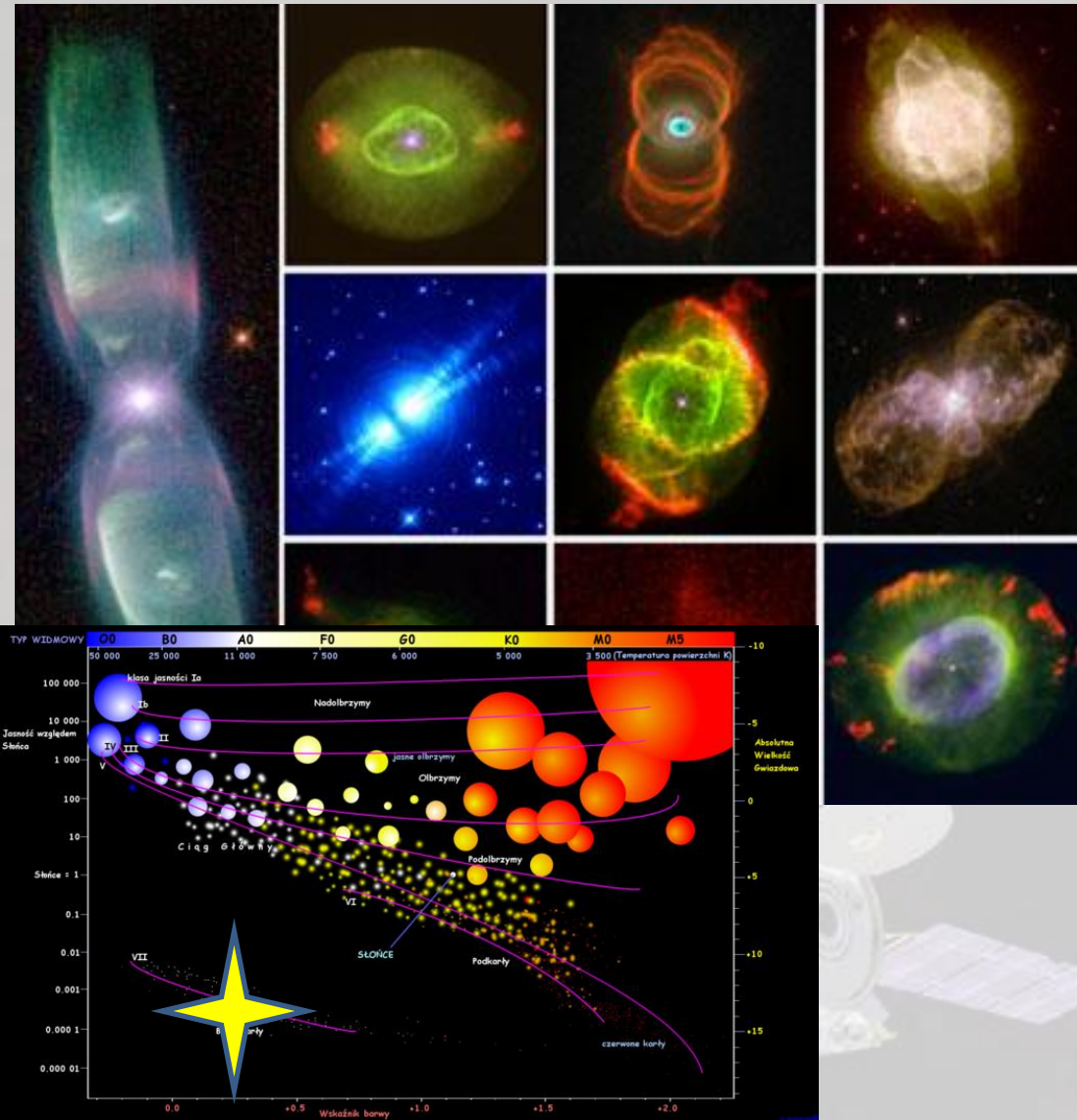
Mgławice planetarne



HST
Mgławica Motyl

Ruch rotacyjny jest interpretowany jako obecność gwiazdy podwójnej w centrum

Gwiazdy o małej masie

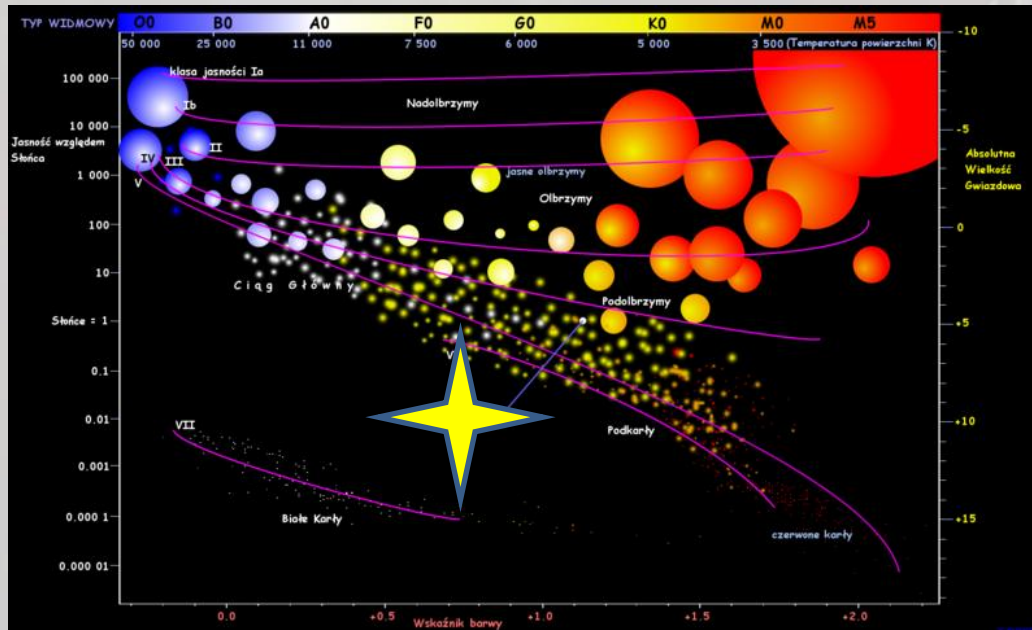


Gwiazda o masie porównywalnej z masą Słońca kończy życie jako stygnący biały karzeł, który nie może być bardziej masywny niż $1.4 M_{\odot}$

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

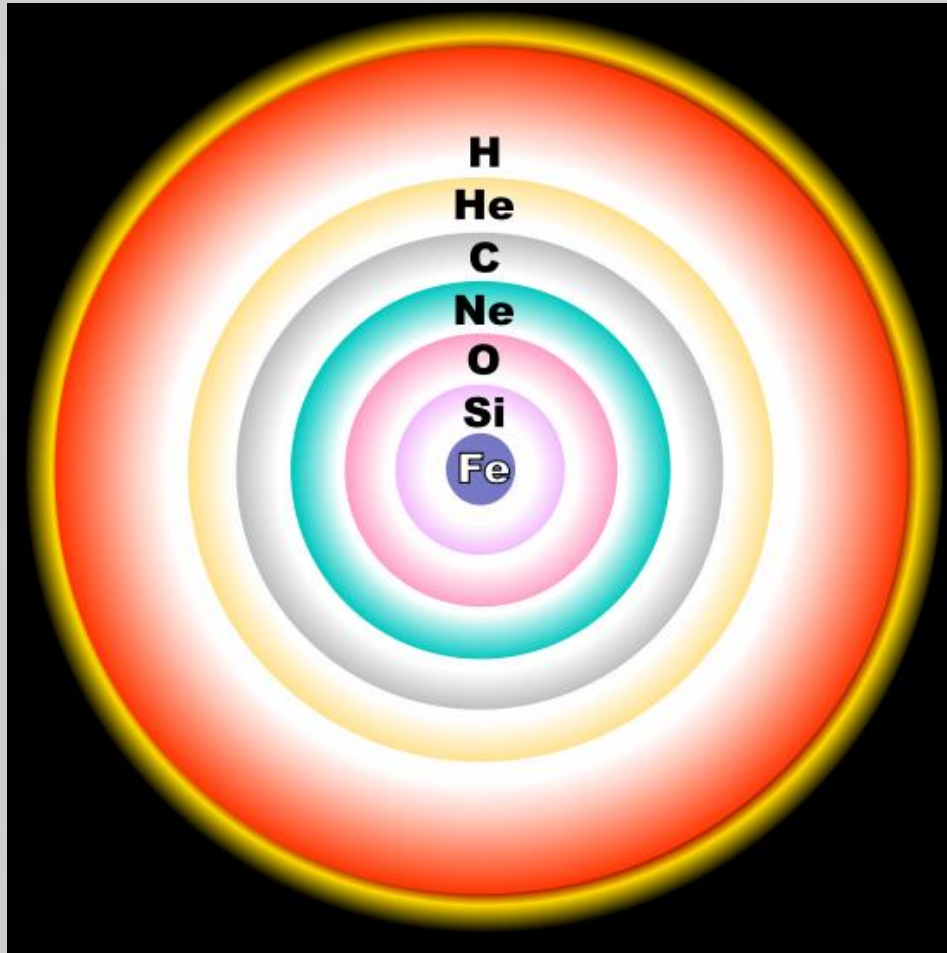


Początkowo ewoluują podobnie jak gwiazdy o mniejszych gwiazdach

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 w neon, następnie (po kolejnym zapadaniu) neon przemienia się w tlen, tlen w krzem, a krzem w żelazo.

Gwiazda przechodzi etap, w którym przypomina cebulę. W różnych jej warstwach spalane są różne pierwiastki

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.

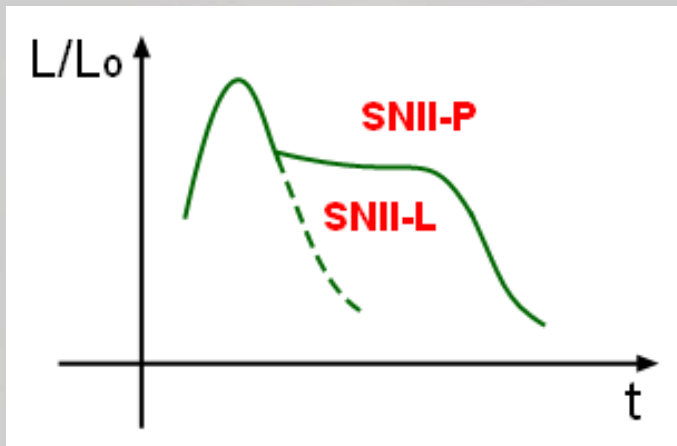
W wyniku tego powstaje gwiazda zbudowana z samych neutronów – gwiazda neutronowa.

Podczas tego procesu obserwuje się wybuch supernowej

Supernowe



Credit: NASA/ESA

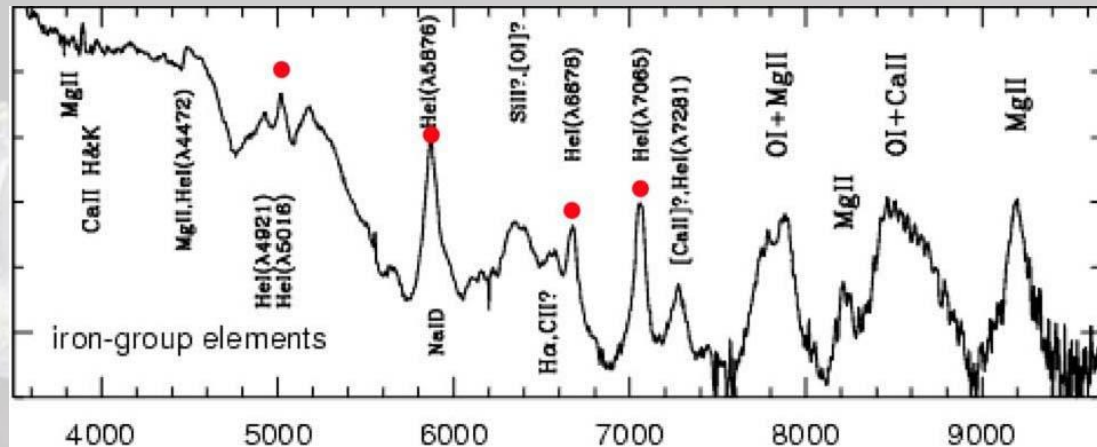


Typ I – brak linii wodoru

- Typ Ia Linia krzemu (Si II) na 615.0 nm
- Typ Ib Linia helu (He I) na 587.6 nm brak linii absorpcyjnej krzemu w okolicy 615 nm
- Typ Ic Słabe lub brak linii helu, brak silnej absorpcji krzemu

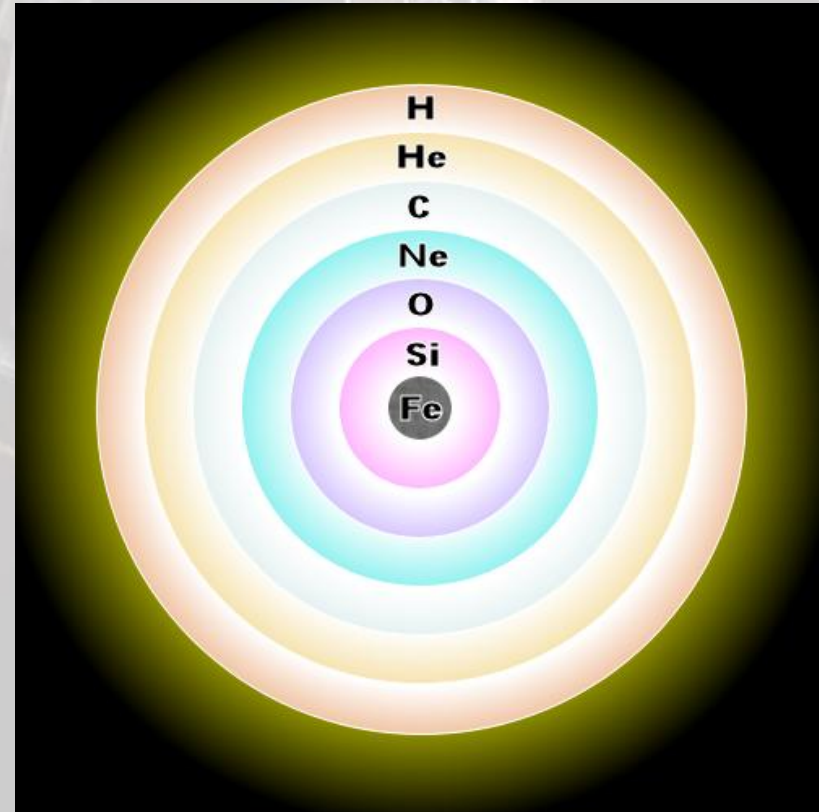
Typ II – obecne linie wodoru

- Typ IIP Widoczne plateau na krzywej blasku
- Typ IIL Widoczna faza liniowego spadku jasności



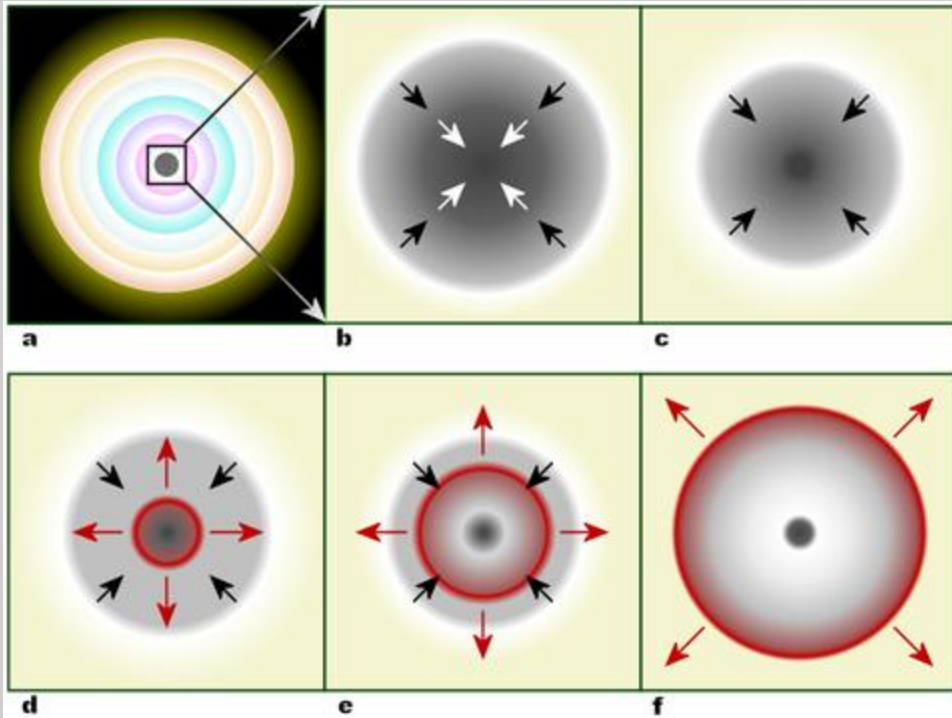
Supernowe: typ Ib, c oraz II

Źródło energii	Główny produkt	Gwiazda o masie $25 M_{\odot}$		
		Temperatura [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



Author: R. J. Hall

Supernowe: typ Ib, c oraz II



Author: R.J. Hall

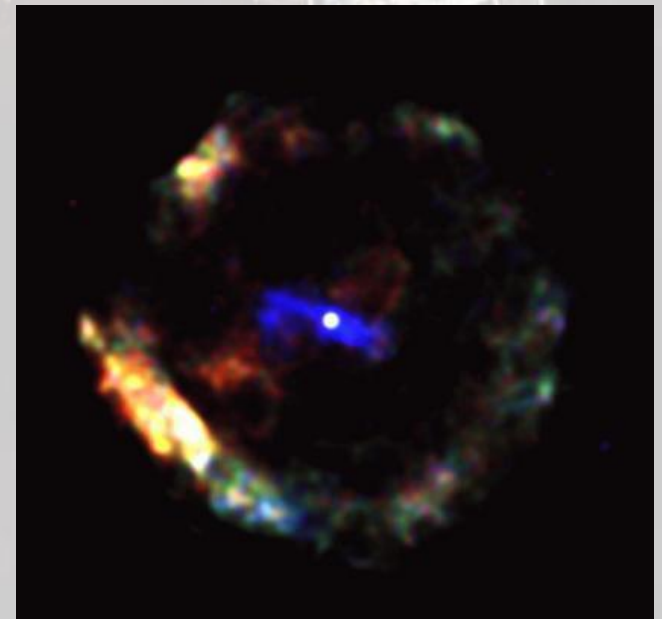
Po utworzeniu jądra żelazowego reakcje w centrum ustają.

Jądro zapada się do gwiazdy neutronowej lub czarnej dziury.

Zewnętrzne warstwy odbijają się od sztywnego obiektu powstającego wewnątrz (jak odbić się od czarnej dziury?)



Wybuch supernowej 1987 w LMC



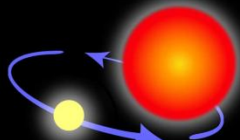
Credit: NASA/McGill/V.Kaspi et al.

Supernowe: typ Ia

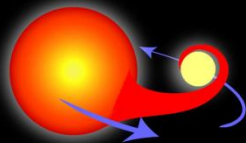
The progenitor of a Type Ia supernova



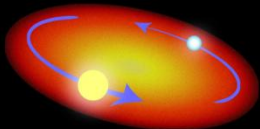
Two normal stars are in a binary pair.



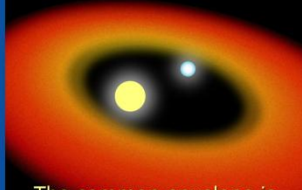
The more massive star becomes a giant...



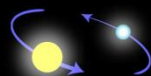
...which spills gas onto the secondary star, causing it to expand and become engulfed.



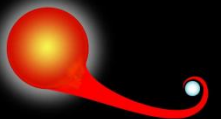
The secondary, lighter star and the core of the giant star spiral inward within a common envelope.



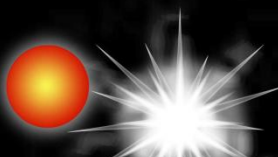
The common envelope is ejected, while the separation between the core and the secondary star decreases.



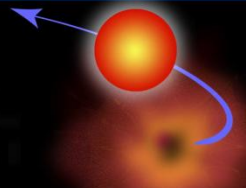
The remaining core of the giant collapses and becomes a white dwarf.



The aging companion star starts swelling, spilling gas onto the white dwarf.



The white dwarf's mass increases until it reaches a critical mass and explodes...



...causing the companion star to be ejected away.

Eksplodujące białe karły, które gwałtownie przekraczają granicę Chandrasekhara

Podobne masy eksplodujących białych karłów – podobne jasności supernowych – świece standardowe

White Dwarf Deflagration

Resolution: 6 km

Initial Bubble Radius: 18 km

Ignition Offset: 42 km

Variable 1: Density [1.5e+07 - 2.0e+07]

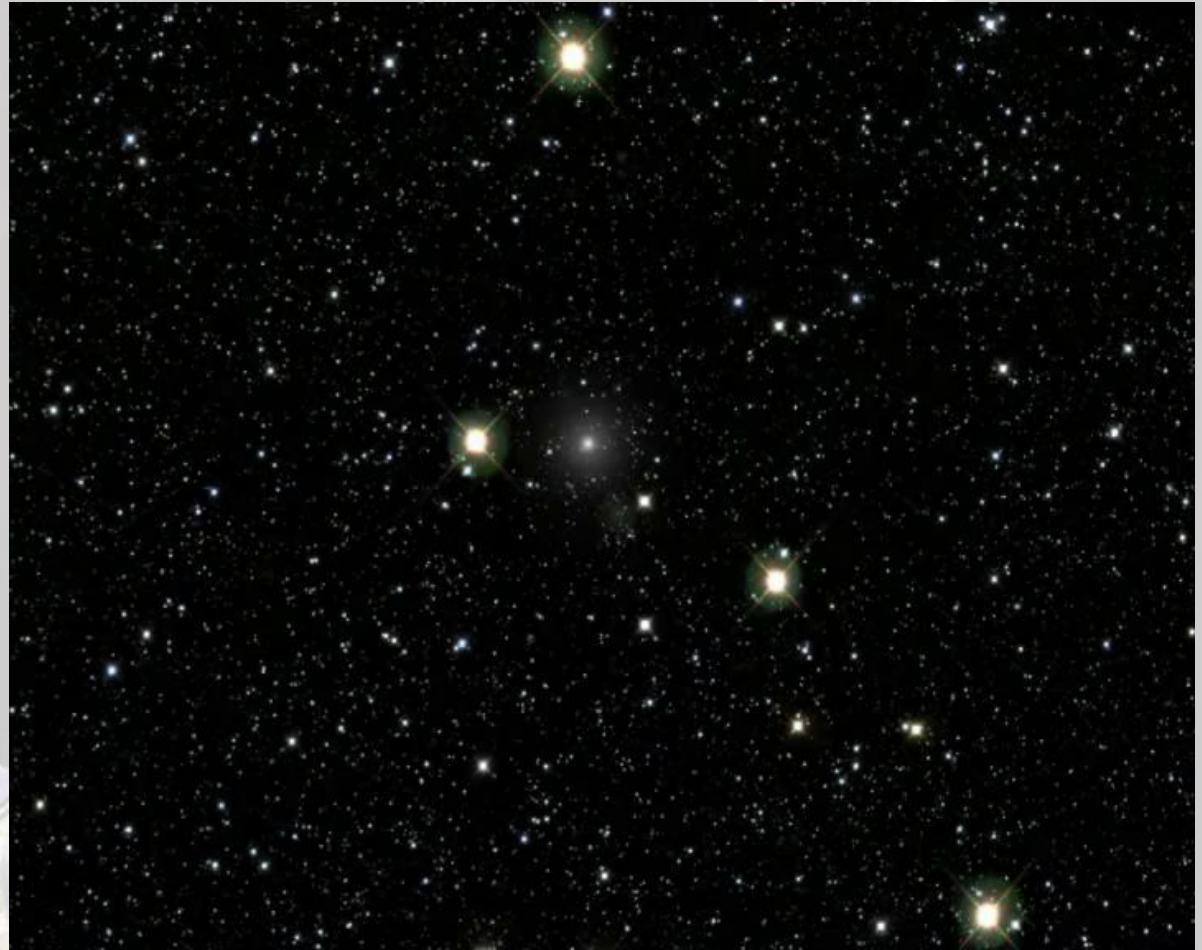
Variable 2: Reaction Progress [0.0 - 1.0]

Pozostałości po supernowych: typ Ia

11 listopada 1572 r.

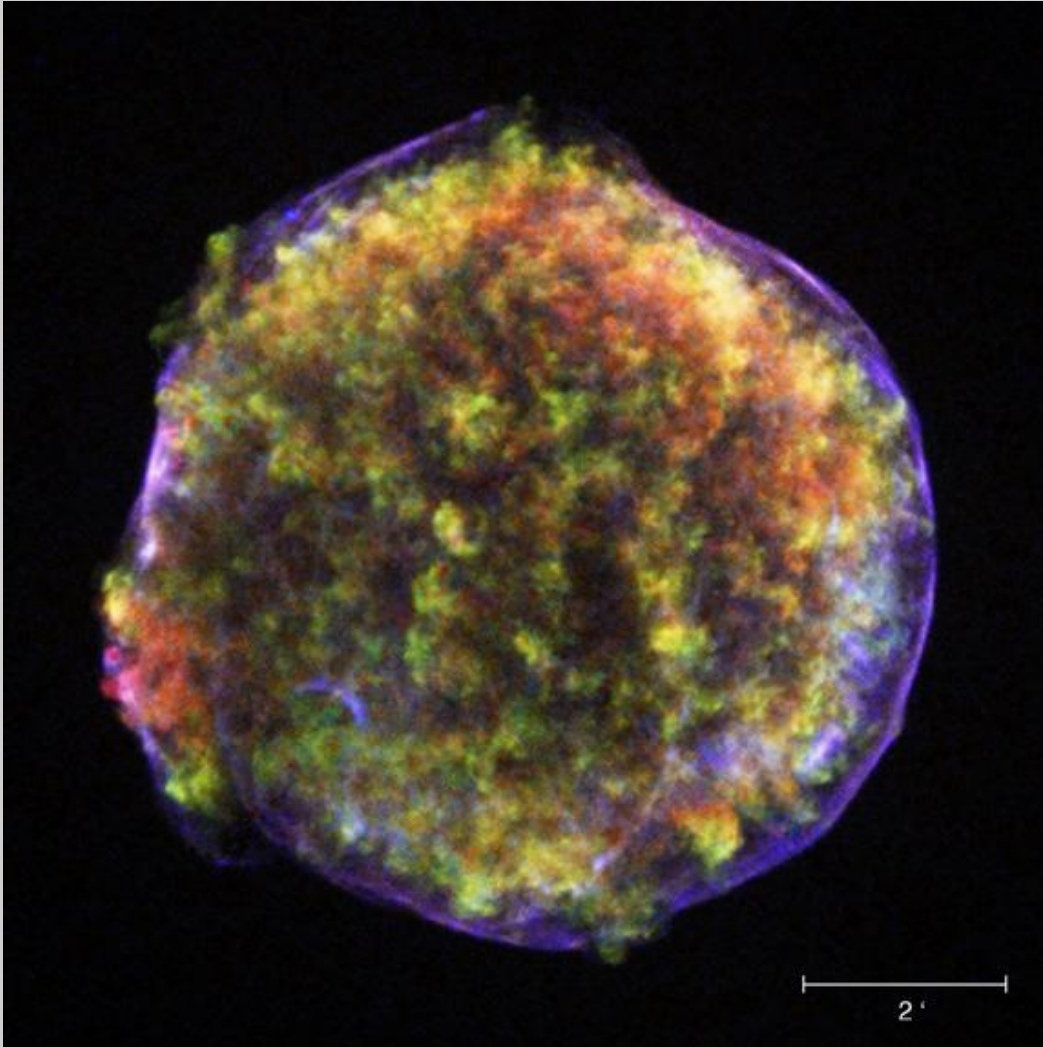


Tycho Brahe
14.12.1546 r. – 24.10.1601 r.



(Oliver Krause, MPIA)

Pozostałości po supernowych: typ Ia



Dwie fale uderzeniowe wędrujące na zewnątrz i do wewnątrz pozostałości

Front zewnętrznej fali powinien być oddalony o około 2 l. św., a obserwacje chandra pokazują, że jest w odległości jedynie 0.5 l. św.

Wytłumaczeniem tego faktu może być transfer energii frontu fali uderzeniowej na przyspieszenie cząstek do wysokich energii.

Obserwacje Chandra wskazują, że źródłem wysokoenergetycznego promieniowania kosmicznego mogą być wybuchy supernowych

Pozostałości po supernowych: typ Ia



Johannes Kepler
27.12.1571 r. – 15.11.1630 r.

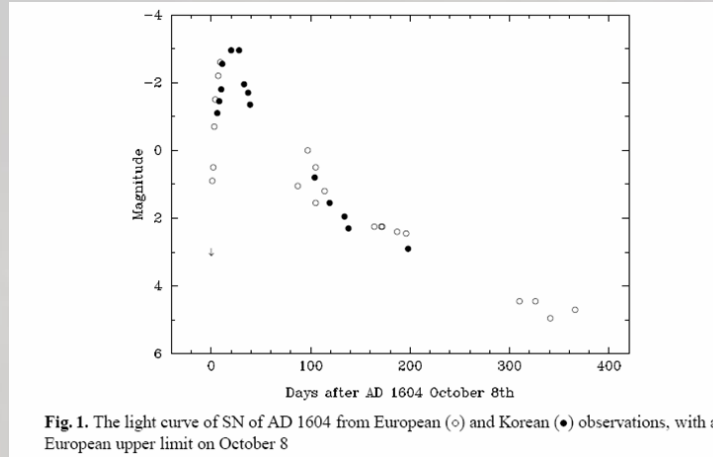


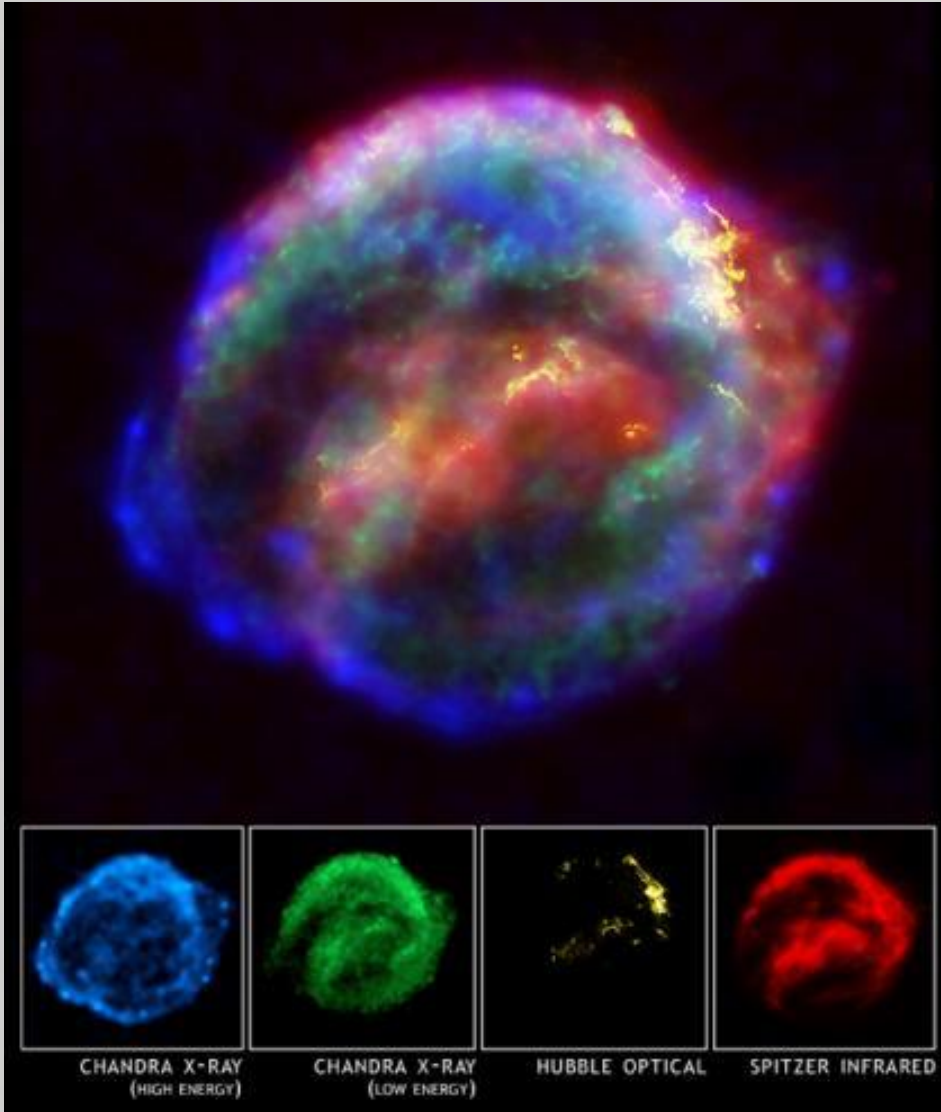
Fig. 1. The light curve of SN of AD 1604 from European (○) and Korean (●) observations, with a European upper limit on October 8

Green i Stephenson 2003, Lecture Notes in Physics 598, 7

9 października 1604 r.



Pozostałości po supernowych: typ Ia



Obserwacje HST pokazują miejsca gdzie front fali uderzeniowej spotyka gęsty ośrodek.

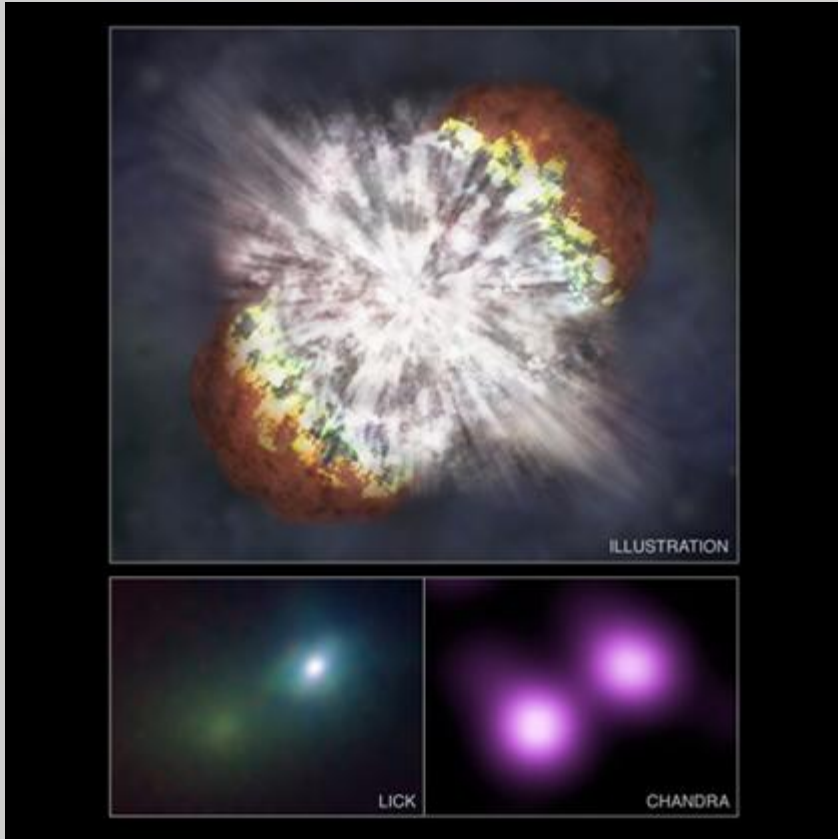
Spitzer pokazuje promieniowanie podczerwone pochodzące od pyłu podgrzanego przez front fali uderzeniowej.

Najgorętszy ośrodek (kolor niebieski) znajduje się tuż za frontem fali uderzeniowej. Związany jest z cząstkami przyspieszonymi na froncie fali uderzeniowej, które wirują dookoła linii sił pola magnetycznego.

Nieco chłodniejsze obszary (kolor zielony) pochodzą od podgrzanej plazmy eksplodującej gwiazdy.

Dokładna analiza obfitości pierwiastków w pozostałościach (Chandra) wskazuje, że była to supernowa typu Ia

Pozostałości po supernowych: typ Ib,c oraz II



NGC1260 w podczerwieni

Słabe źródło to centrum galaktyki, a jasne to supernowa

SN2006GY

Jedna z najjaśniejszych supernowych kiedykolwiek obserwowanych

Obserwacje rentgenowskie pozwoliły stwierdzić, że eksplodowała bardzo masywna gwiazda, a nie biały karzeł (świeciła zbyt słabo w zakresie rentgenowskim)

Masa ok. $150 M_{\odot}$ – typ supernowych, które były bardziej powszechne w młodym Wszechświecie



Pozostałości po supernowych: typ Ib,c oraz II

Cassiopeia A

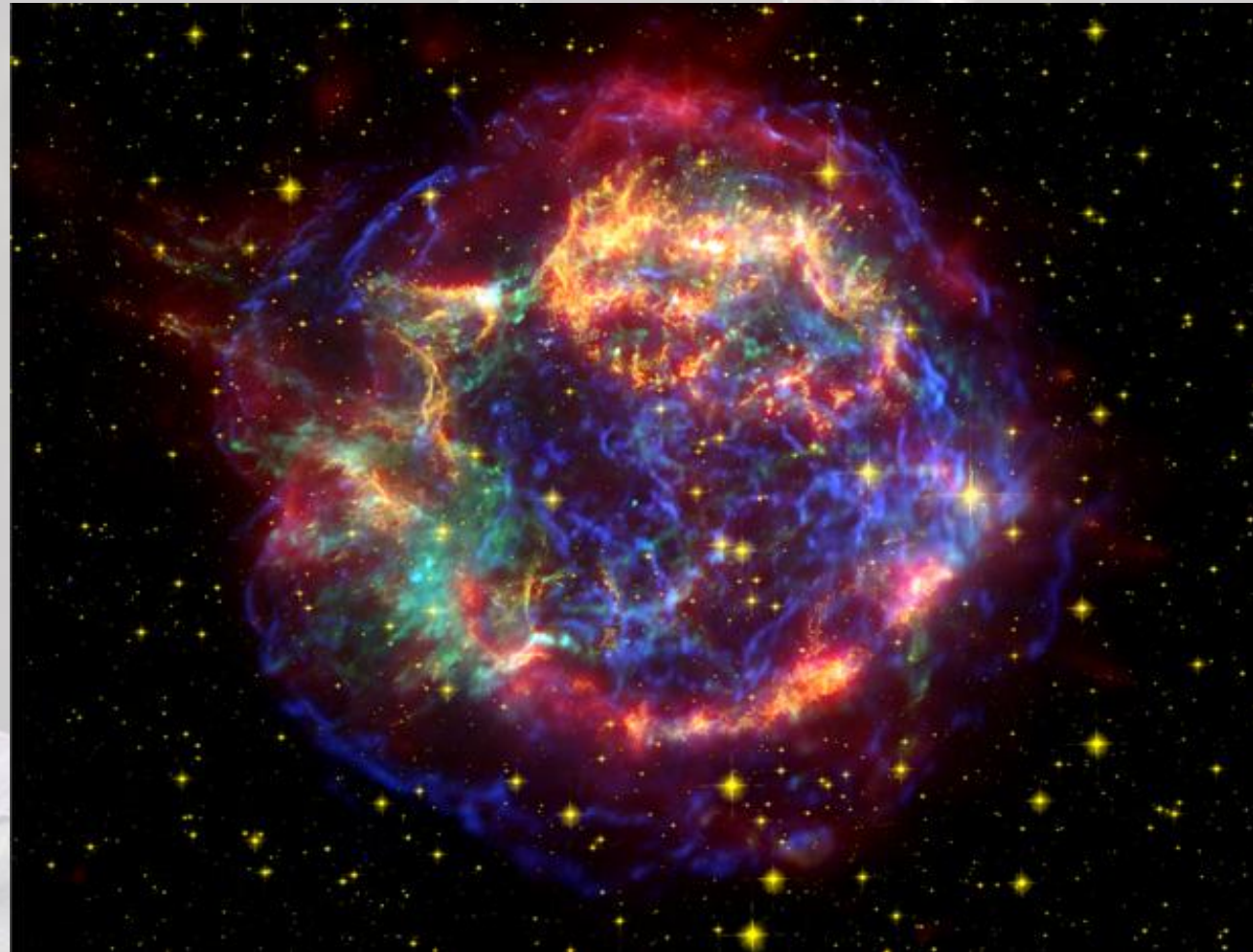
Wybuch masywnej gwiazdy, który nastąpił ok. 300 lat temu

Kolory:

czerwony – Spitzer (~280 K)

żółty – HST (10 000 K)

zielony i niebieski – Chandra (10⁶ K)



Credit: X-ray: NASA/CXC/SAO; Optical: NASA/STScI; Infrared: NASA/JPL-Caltech/Steward/O.Krause et al.

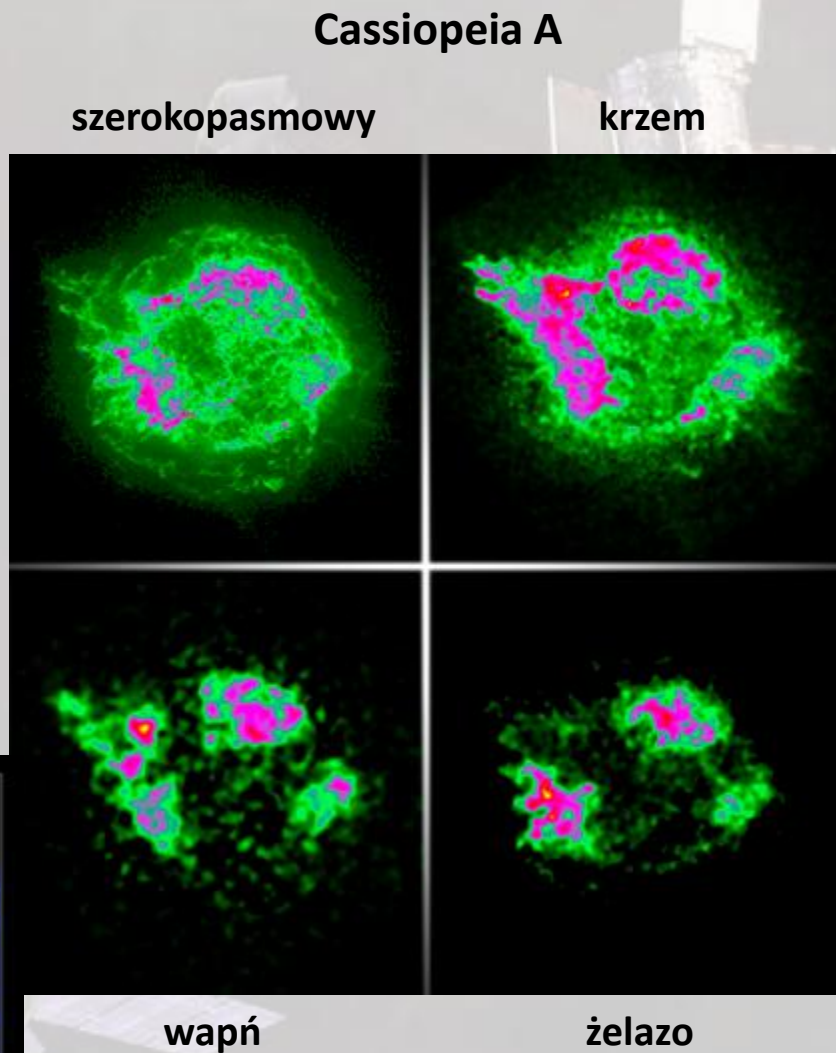
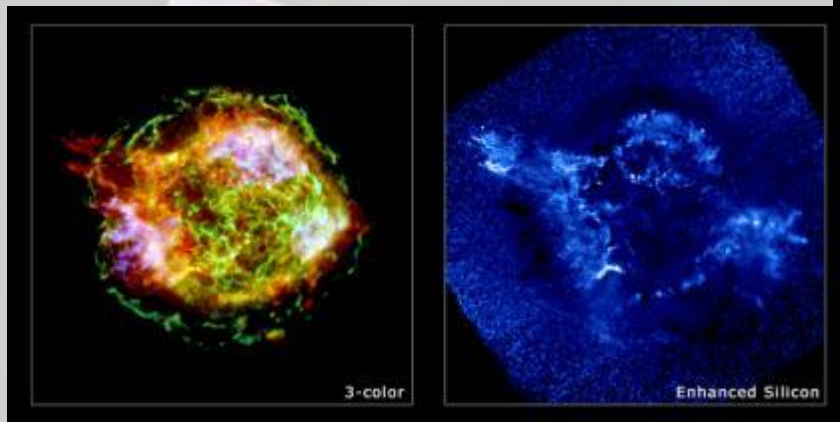
Pozostałości po supernowych: typ Ib,c oraz II

Obraz wykonany w szerokim zakresie widma jest najbardziej symetryczny – widoczna emisja to promieniowanie synchrotronowe

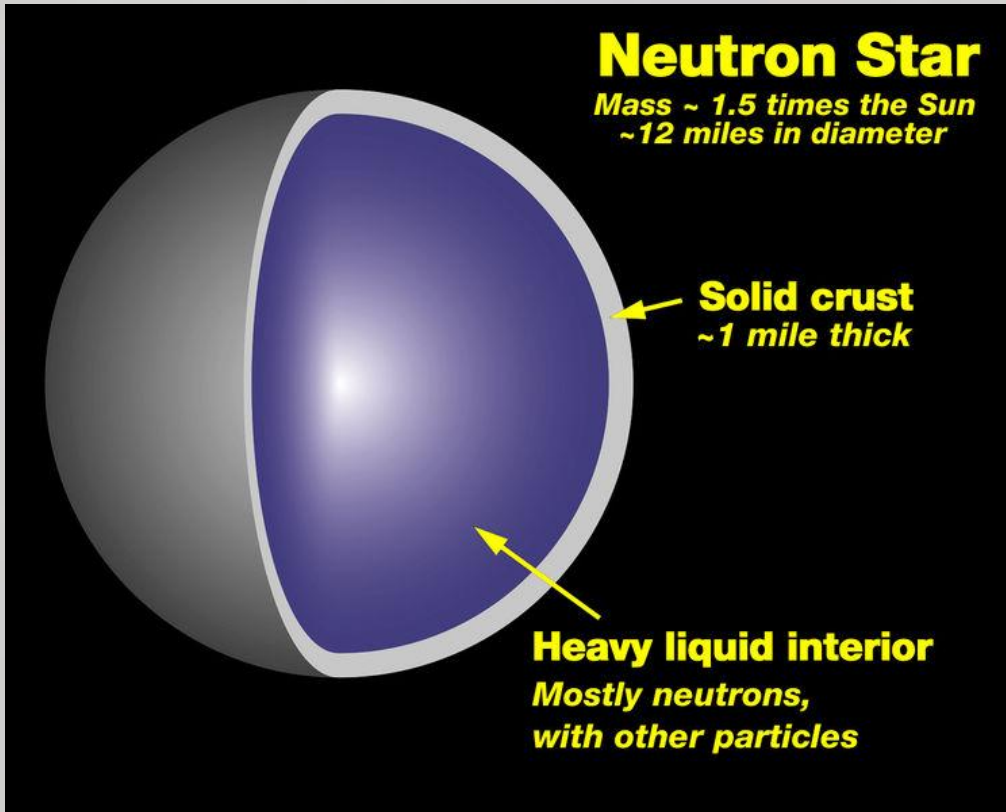
Krzem: wyraźny dżet (górny lewy róg) i słabe strugi po przeciwnej stronie wskazują na asymetrię eksplozji

Obraz „wapniowy” jest podobny

Żelazo – kierunek ruchu prawie prostopadły do kierunku dżetu widocznego w linii krzemu i wapnia



Gwiazdy neutronowe



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

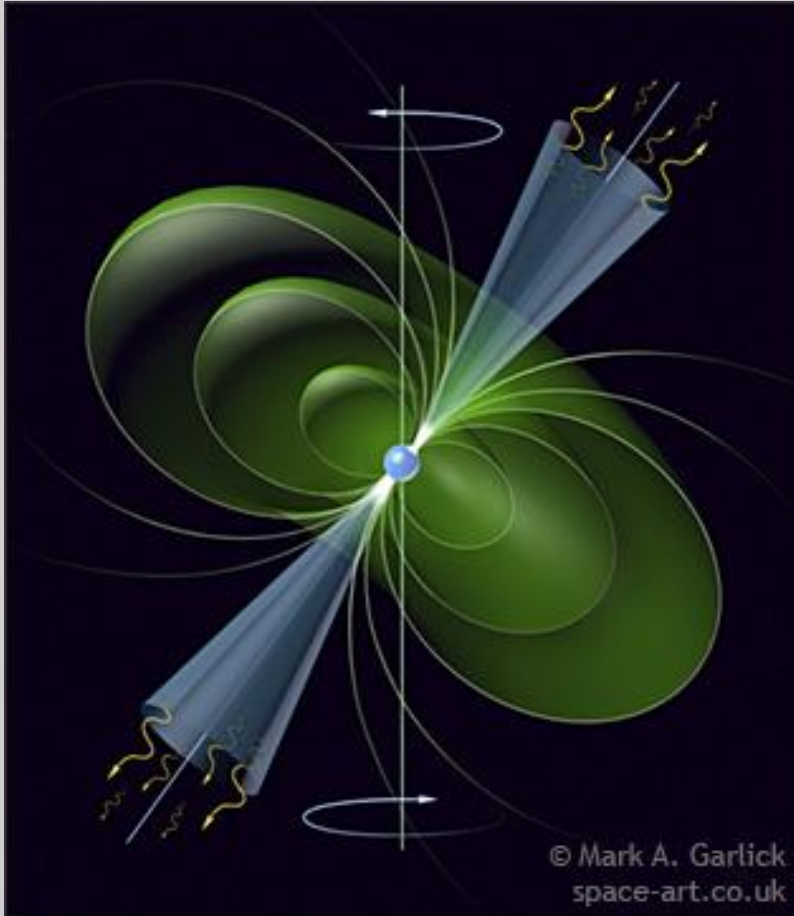
Jednak po supernowej powinna zostać jeszcze gwiazda neutronowa.

Jak zaobserwować taki dziwny obiekt?

Kluczem do tej zagadki okazało się pole magnetyczne gwiazdy neutronowej



Gwiazdy neutronowe



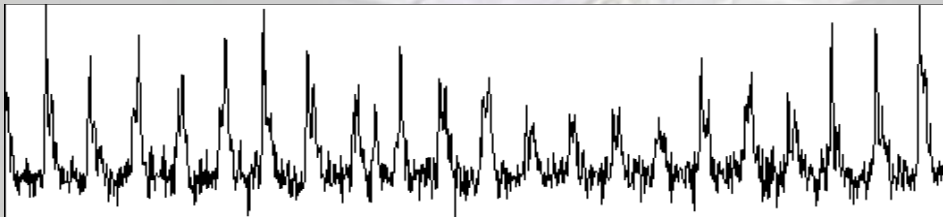
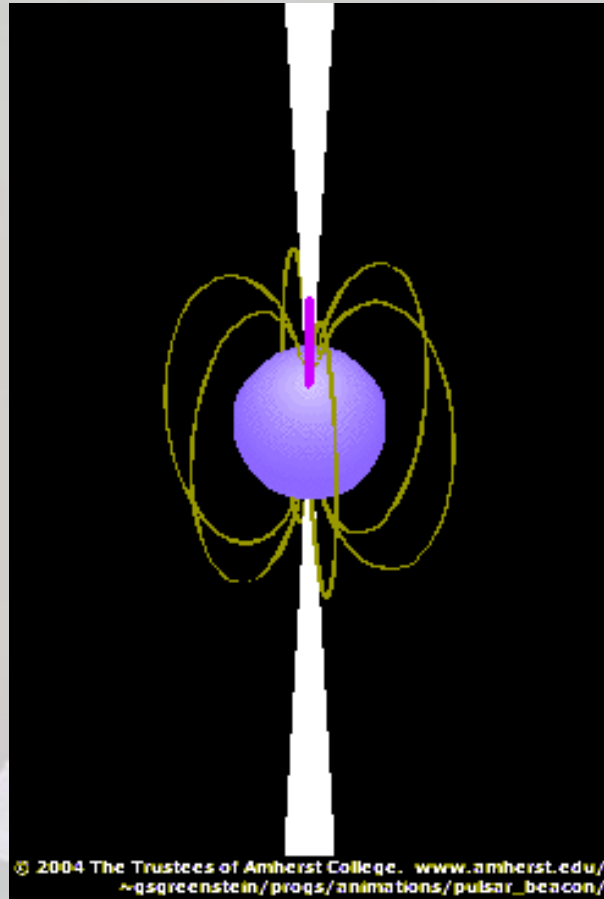
Pole magnetyczne gwiazdy neutronowej jest bardzo dobrym akceleratorem cząstek.

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 neutronowe



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

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

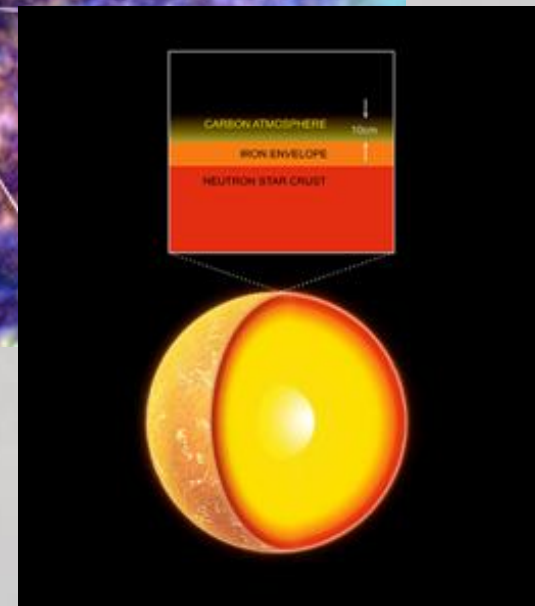
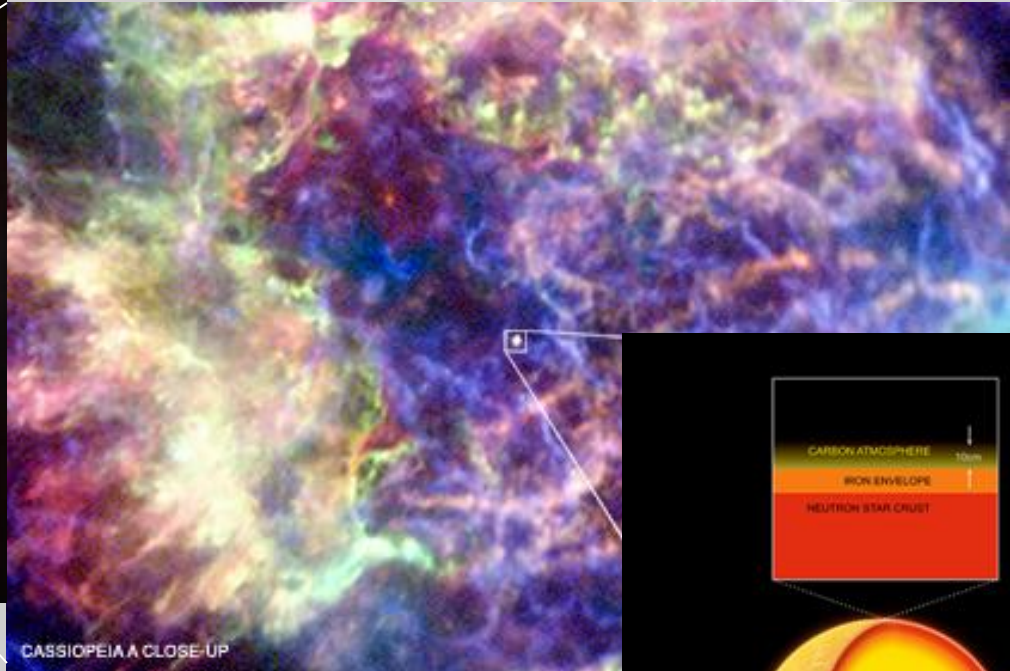
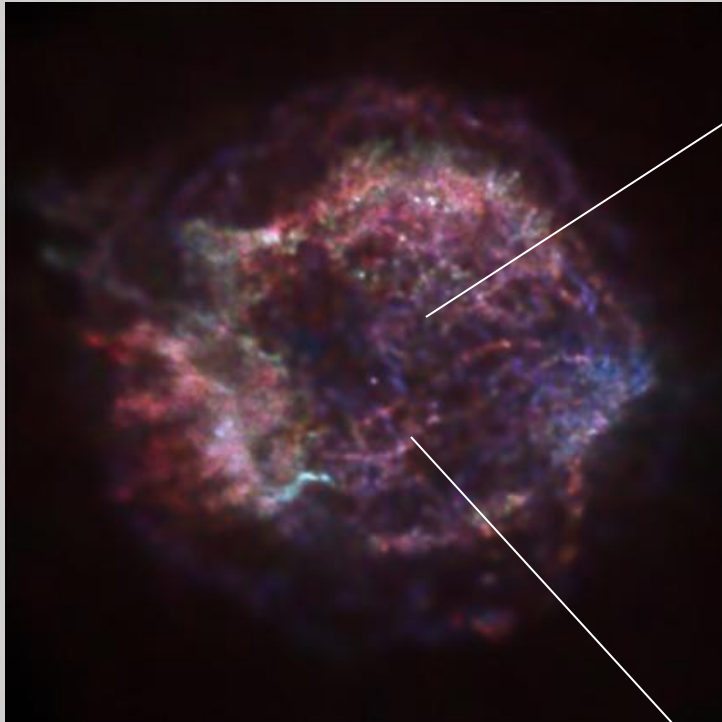
Stąd nazwa tych obiektów – pulsary.

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 neutronowe

Cassiopeia A



Obserwacje atmosfery gwiazdy neutronowej:

- zbudowana z węgla
- temperatura – 2 mln K
- ciśnienie – 10 x ciśnienie wewnątrz Ziemi
- grubość – 10 cm
- przyspieszenie grawitacyjne – 10^{11} g
- gęstość – porównywalna z gęstością diamentu

Mgławica Krab (M1)

rentgenowskie

widzialne

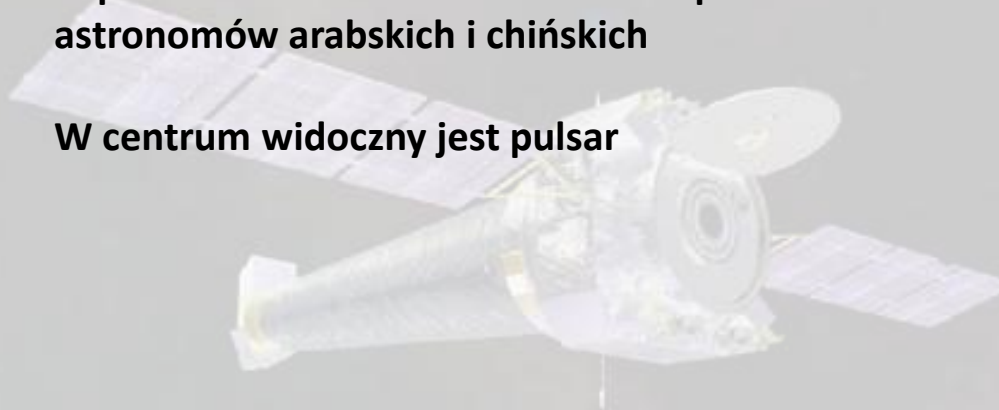
podczerwone

radiowe

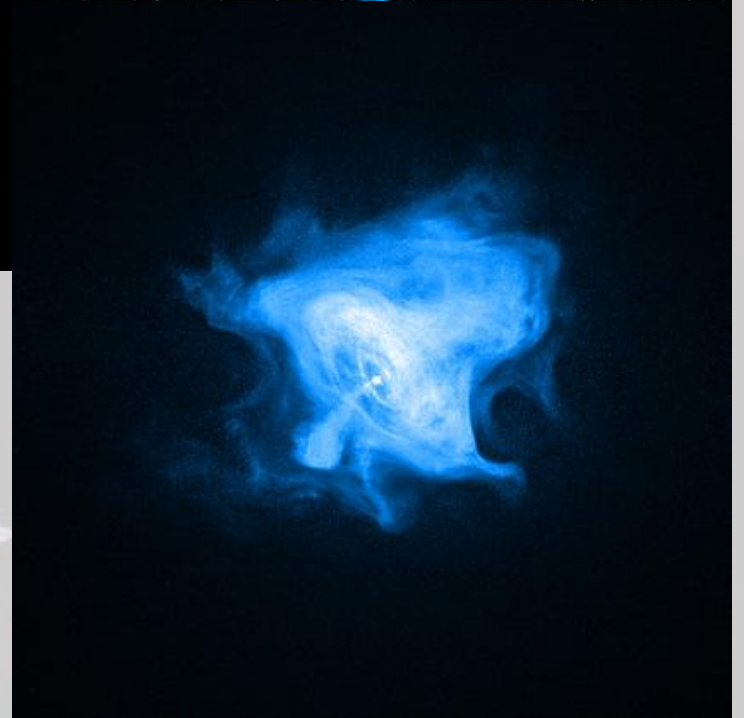
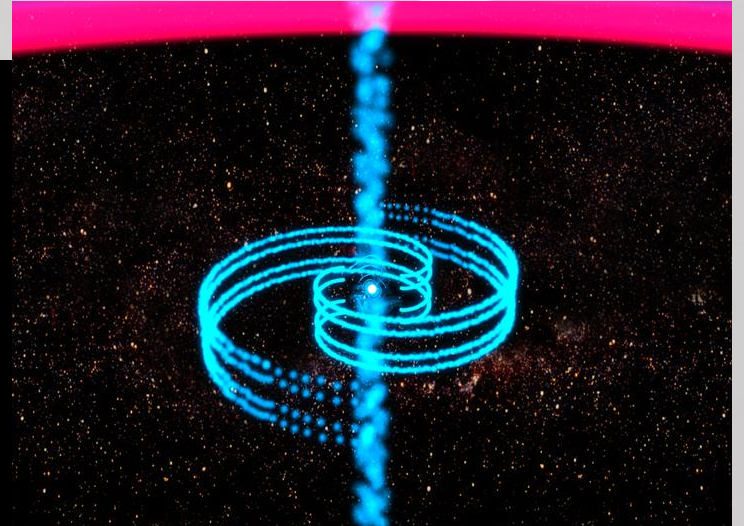
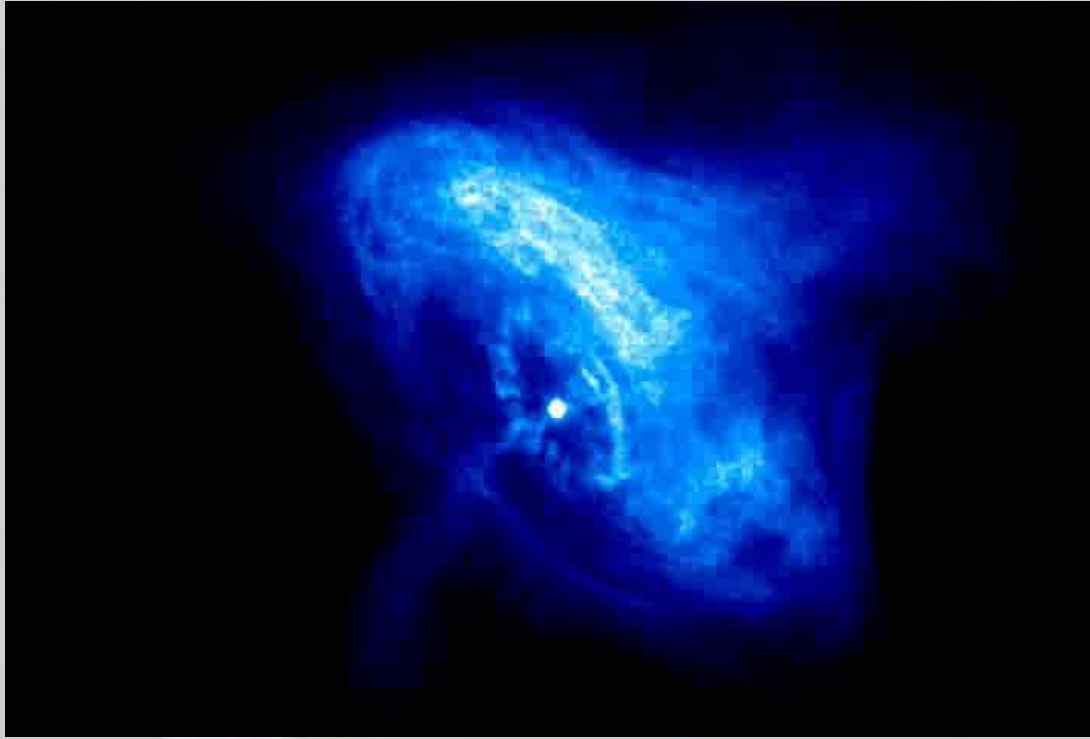


Supernowa obserwowana w 1054 r. przez astronomów arabskich i chińskich

W centrum widoczny jest pulsar



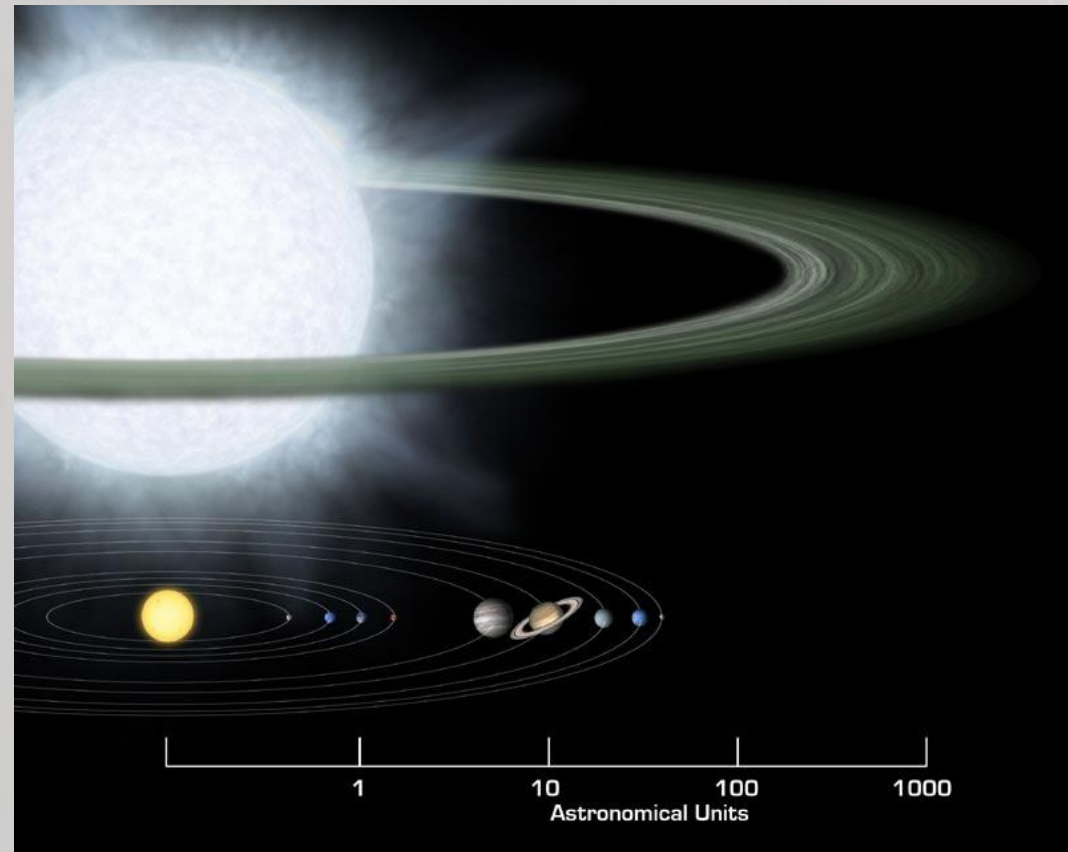
Mgławica Krab (M1)



Szybko rotujący pulsar jest bardzo efektywnym akceleratorem cząstek

Wewnętrzny krąg wskazuje miejsce, w którym rozpędzone cząstki zderzają się z ośrodkiem otaczającym pulsara

Gwiazdy masywne

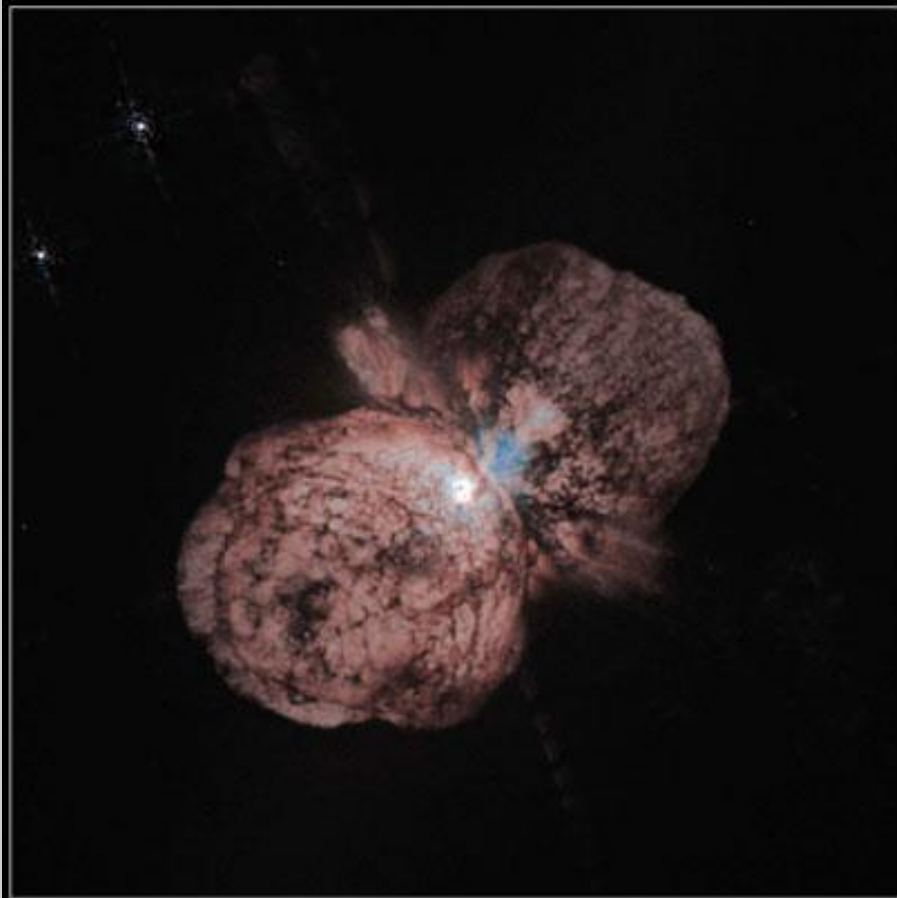


Najbardziej masywne gwiazdy nie kończą życia jako gwiazdy neutronowe.

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



Eta Carinae

Hubble Space Telescope · WFPC2

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.

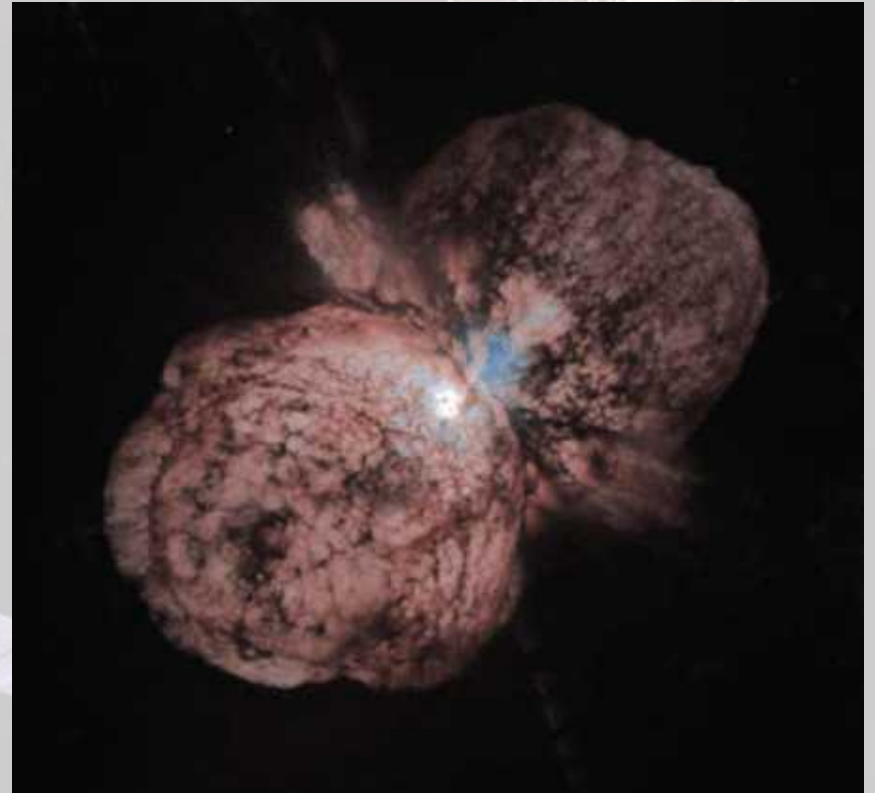
Eta Carinae



Credit: X-ray: NASA/CXC/GSFC/M.Corcoran et al.; Optical: NASA/STScI

Masa od 100 do 150 M_{\odot}

Bardzo podobna do gwiazdy, która eksplodowała jako SN2006GY



Niebieski – HST
Żółty - Chandra

Podsumowanie

