



**EWOLUCJA
SŁOŃCA
I GWIAZD**

**WSZYSTKO WE WSZECHŚWIECIE PODLEGA ZMIANOM
GWIAZDY RÓWNIEŻ.**

**PRZECHODZĄ ONE FAZĘ NARODZIN,
WIEK DOJRZAŁY,
W KOŃCU UMIERAJĄ.**

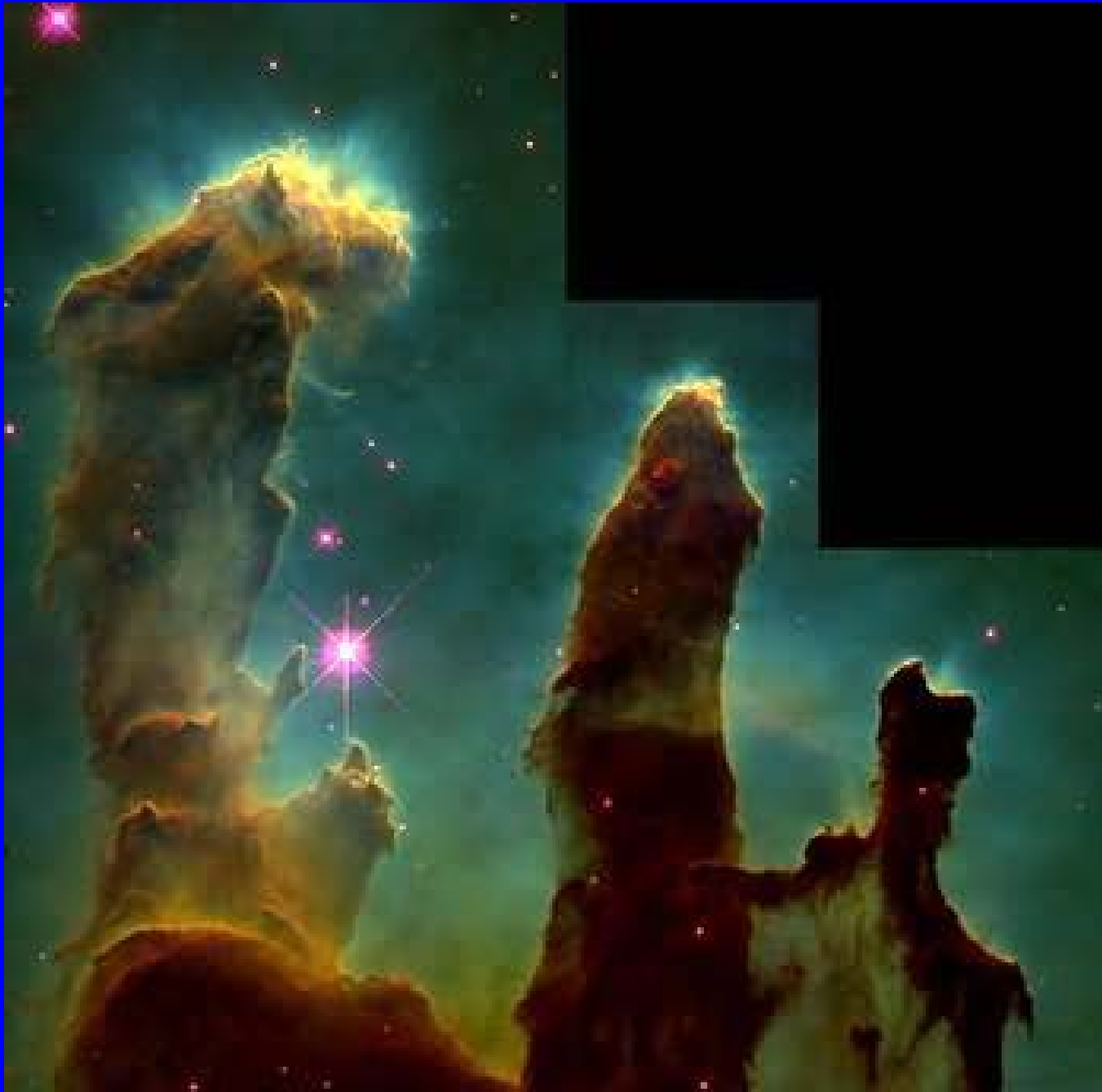
**NASZE SŁOŃCE TAKŻE ZMIENIA SIĘ.
O TYM JAK POWSTAŁO I JAKI LOS JE CZEKA
BĘDZIE MOWA W NINIEJSZEJ PREZENTACJI.**

NARODZINY GWIAZD

TWORZYWEM, Z KTÓREGO FORMUJĄ SIĘ GWIAZDY JEST MATERIA MIĘDZYGWIAZDOWA – ZWŁASZCZA OBŁOKI GAZOWO PYŁOWE



OBŁOKI GAZOWO PYŁOWE, W KTÓRYCH ZACHODZĄ NARODZINY GWIAZD





Obłoki gazowo-pyłowe – zimne, ciemne kondensacje pyłów i gazów służą jako „kolebka gwiazd”. Wszystkie gwiazdy (w tym Słońce) powstały w takich obłokach. Materia obłoków to budulec, z którego jesteśmy zrobieni.

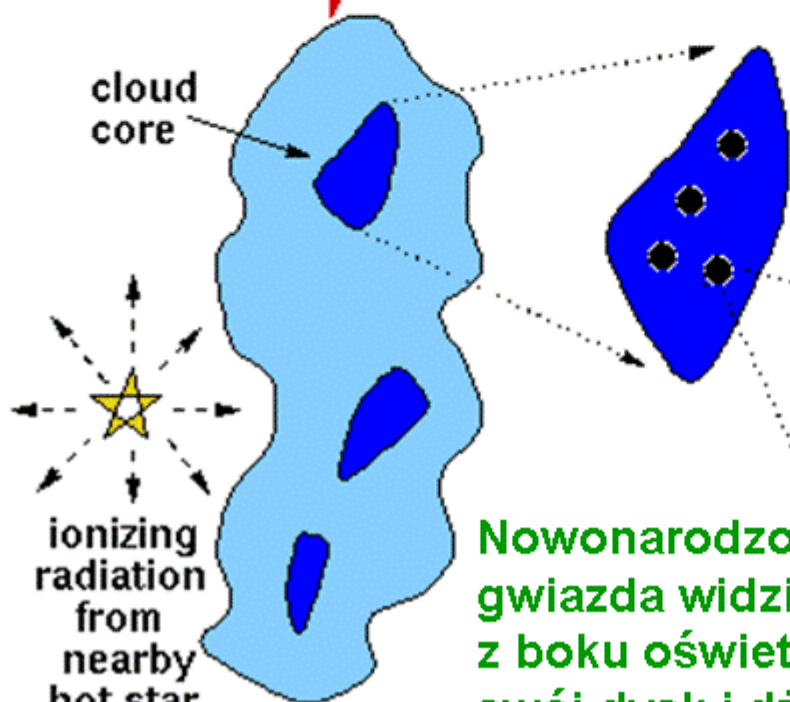
Z powodu pyłów obłoki są nieprzezroczyste dla światła widzialnego. „Zobaczenie” procesu formowania gwiazd wymaga więc obserwacji w podczerwieni.



Obłoki gazowo-pyłowe – zimne, ciemne kondensacje pyłów i gazów służą jako „kolebka gwiazd”. Wszystkie gwiazdy (w tym Słońce) powstały w takich obłokach. Materia obłoków to budulec, z którego jesteśmy zrobieni.

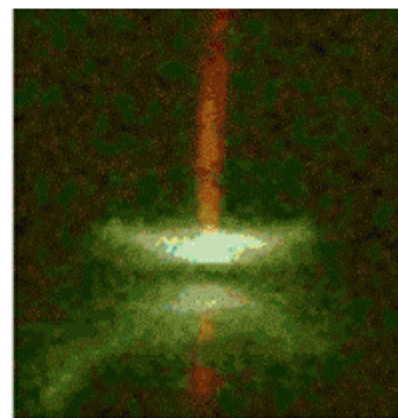
Z powodu pyłów obłoki są nieprzezroczyste dla światła widzialnego. „Zobaczenie” procesu formowania gwiazd wymaga więc obserwacji w podczerwieni.

molecular cloud



Gęsty fragment zapada się pod wpływem grawitacji, tworząc protogwiazdy. Gromadzą one opadającą materię i formują wirujące dyski i wypływającą w postaci dżetów materię.

Nowonarodzona gwiazda widziana z boku oświetla swój dysk i dżet.



„EMBRIONY” GWIAZD (*PROTOGWIAZDY*) W KOKONIE PYŁOWO GAZOWYM



DALSZY LOS
GWIAZDY ZALEŻY
OD JEJ MASY
WYJŚCOWEJ

EWOLUCJA GWIAZD

TEMPO I PRZEBIEG EWOLUCJI GWIAZDY ZALEŻY GŁÓWNIE OD JEJ MASY POCZĄTKOWEJ (W CHWILI ROZPOCZĘCIA REAKCJI TERMOJĄDROWYCH W JEJ CENTRUM)

IM WIĘKSZA MASA TYM SZYBSZA EWOLUCJA!!!

EWOLUCJA GWIAZD

TEMPO I PRZEBIEG EWOLUCJI GWIAZDY ZALEŻY GŁÓWNIE OD JEJ MASY POCZĄTKOWEJ (W CHWILI ROZPOCZĘCIA REAKCJI TERMOJĄDROWYCH W JEJ CENTRUM)

IM WIĘKSZA MASA TYM SZYBSZA EWOLUCJA!!!

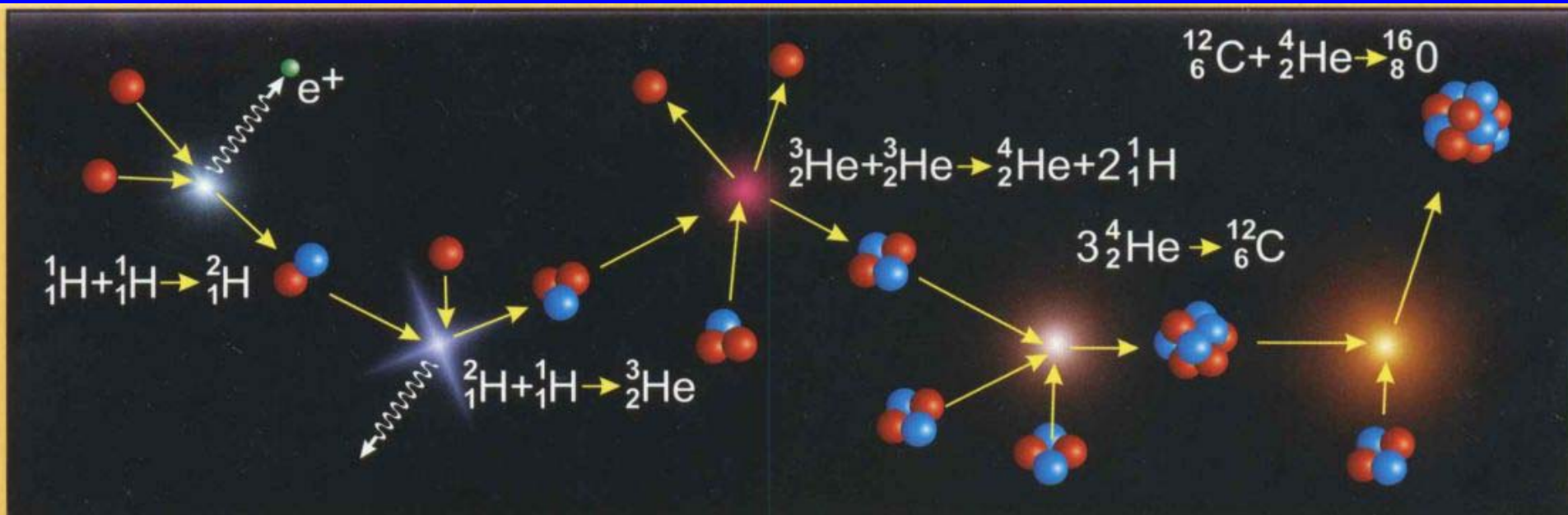
PROTOGWIAZDY O MASACH **MNIEJSZYCH NIŻ 0.08 MASY_SŁOŃCA** (tzw. brązowe karły) NIE SĄ W STANIE ZAPOCZĄTKOWAĆ REAKCJI TERMOJĄDROWYCH W JĄDRZE.

Ewolucja gwiazd

Faza Protogwiazdy

- W czasie kurczenia się energia grawitacyjna zamienia się w ciepło, ogrzewając centrum obłoku.
- Gaz nagrzewa się do 2 do 3 tys. K,
- Świeci na czerwono, ale otaczający go kokon gazowo-pyłowy pochłania promieniowanie i wysyła je dalej w podczerwieni i w zakresie mikrofalowym.

GDY TEMPERATURA W CENTRUM KURCZĄCEJ SIĘ PROTOGWIAZDY OSIĄGNIĘ OK. **15 mln. K** TO ZACZNIE SIĘ TERMOJĄDROWA SYNTEZA HELU Z WODORU. OBIEKT **STAJE SIĘ PEŁNOPRAWNĄ GWIAZDĄ.**



(Cykl proton-proton)

CYKL TAKICH REAKCJI JEST GŁÓWNYM ŹRÓDŁEM ENERGII GWIAZD O MASACH PODOBNYCH DO SŁOŃCA

PODSTAWOWE PARAMETRY GWIAZD CIĄGU GŁÓWNEGO (WIEK ZEROWY)

$\frac{M}{M_S}$	$\frac{R}{R_S}$	T_{ef} [K]	T_{centr} [K]	ρ_{centr} [g/cm ³]	$\frac{L}{L_S}$	Czas życia na ciągu głównym
0.1	0.12	3000	4.6mln	300	5E-3	10¹²lat
1	0.9	5700	14mln	90	0.78	10¹⁰lat
3	2.0	12000	23mln	36	77	3·10⁸
15	5.1	30000	32mln	5	2E4	10⁷
50	10.3	45000	39mln	2	4E5	3·10⁶

Dalsza ewolucja gwiazd podobnych do Słońca

Nasze Słońce ma ok. 4,6 mld lat.
Temperatura w środku - $16 \cdot 10^6$ K

Wodoru wystarczy jeszcze na następne ponad 5 mld lat.

W tym czasie Słońce stanie się prawie 2 razy jaśniejsze.

Dalsza ewolucja gwiazd podobnych do Słońca

Nasze Słońce ma ok. 4,6 mld lat.
Temperatura w środku - $16 \cdot 10^6$ K

Wodoru wystarczy jeszcze na następne ponad 5 mld lat.

W tym czasie Słońce stanie się prawie 2 razy jaśniejsze.

Po wyczerpaniu wodoru jądro zacznie się zapadać i ogrzewać.
Kiedy temperatura w jądrze osiągnie wartość 10^8 K „zapala” się hel.



a następnie:



Dalsza Ewolucja Słońca

Energia z kurczącego się jądra częściowo pochłaniana w środkowych warstwach spowoduje ich rozszerzanie.



Temperatura na „powierzchni” spadnie od dzisiejszych **6000 K** do **3000 K**.

Jaskrawo czerwony kolor.

Dalsza Ewolucja Słońca

Energia z kurczącego się jądra częściowo pochłaniana w środkowych warstwach spowoduje ich rozszerzanie.



Temperatura na „powierzchni” spadnie od dzisiejszych **6000 K** do **3000 K**.

Jaskrawo czerwony kolor.

Silne **wiatry słoneczne** zmniejszą masę Słońca o 25%.



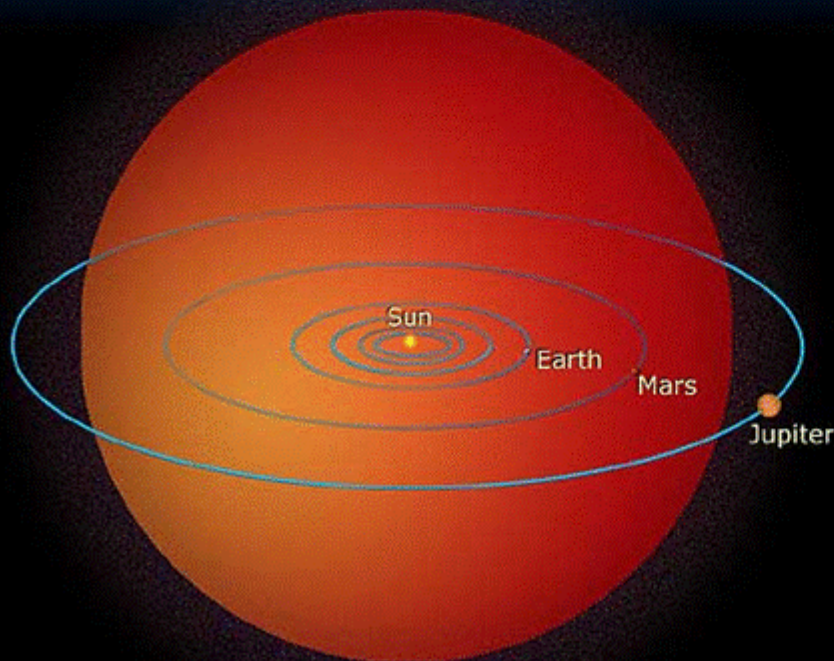
Planety przesuną się na dalsze orbity. (np. Ziemia na obecne położenie Marsa).

Okolo po wyczerpaniu w jądrze wodoru i kontrakcji gęstość w jądrze staje się tak wielka, że rozpoczyna się **spalanie helu** w węgiel – jest to tzw. **błysk helowy**.

Dalsza ewolucja gwiazd o masie 1 do 3 mas Słońca

Faza **czerwonego olbrzyma** – w czasie **około 100 mln lat** trwa kontrolowane spalanie helu w jądrze zaś leżące nad jądrem warstwy Słońca rozszerzają się pod wpływem ciśnienia promieniowania. Promień Słońca wzrasta kilkadziesiąt razy.

Size of star V838 Monocerotis at its fullest, compared with our solar system



Przykład rozmiarów innej gwiazdy w fazie olbrzyma na tle rozmiarów orbit planet.

Dalsza ewolucja gwiazd o masie 1 do 3 mas Słońca

Jasność Słońca w fazie maksymalnego świecenia jako czerwony olbrzym staje się około **2000 razy** większa niż obecnie.

Będzie ona następnie stopniowo spadać do wartości **50 razy** większej niż obecnie.

Skąły na Ziemi znów będą ciałem stałym – temperatura na Ziemi spadnie do kilkuset °C.

Dalsza ewolucja gwiazd o masie 1 do 3 mas Słońca

Jasność Słońca w fazie maksymalnego świecenia jako czerwony olbrzym staje się około **2000 razy** większa niż obecnie.

Będzie ona następnie stopniowo spadać do wartości **50 razy** większej niż obecnie.

Skąły na Ziemi znów będą ciałem stałym – temperatura na Ziemi spadnie do kilkuset °C.

Po wyczerpaniu zapasu helu w jądrze znów następuje kontrakcja jądra i rozdęcie warstw zewnętrznych.

→ Wyrzut mgławicy planetarnej.

UWAGA!!! nazwa „MGLAWICA PLANETARNA” nie ma nic wspólnego z planetami. Ten termin to zaszłość historyczna.

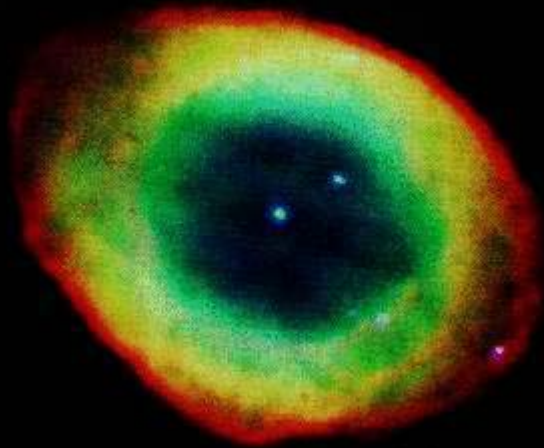
ILUSTRACJA ODRZUCANIA OTOCZKI GWIAZDY I POWSTAWANIA „MGŁAWICY PLANETARNEJ”



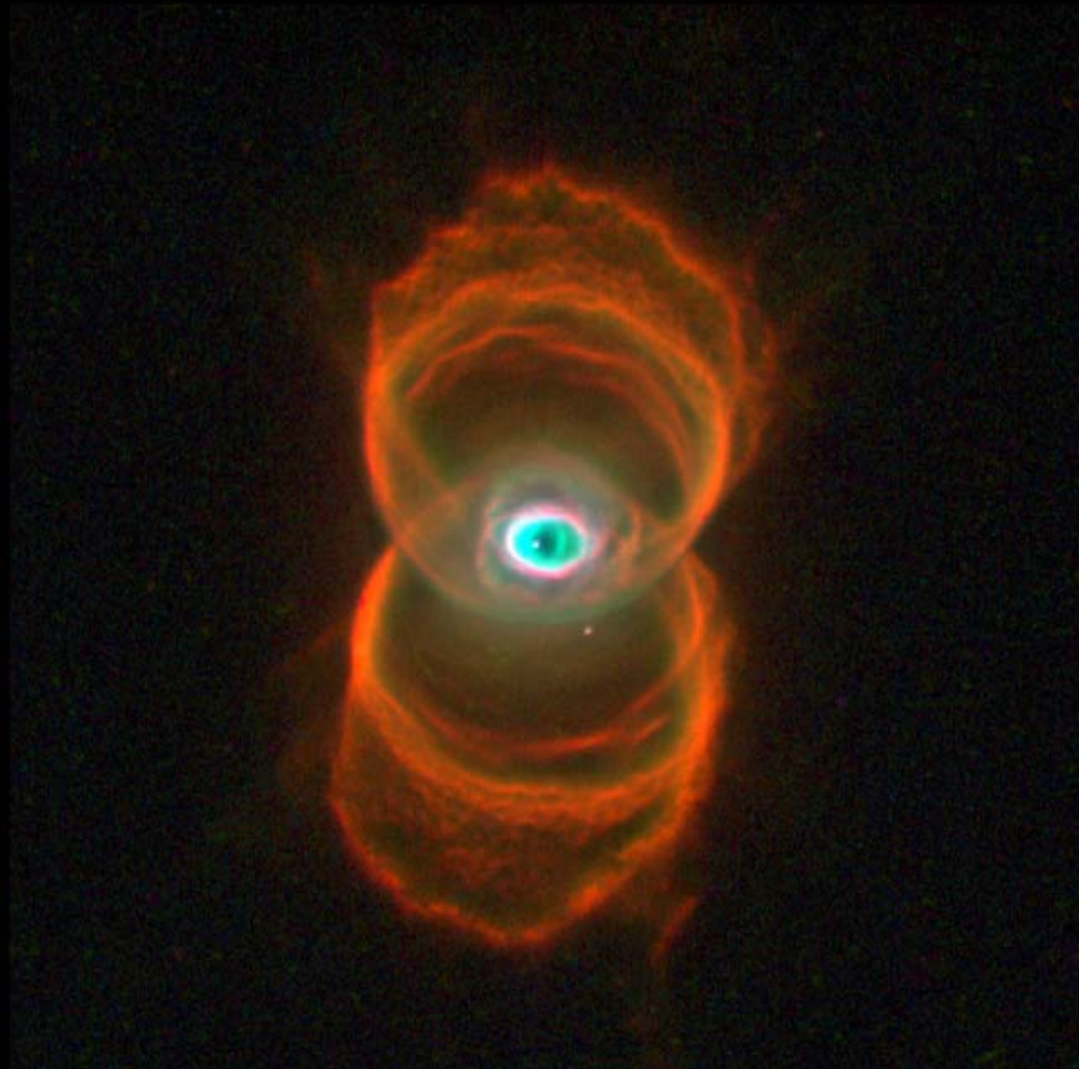
**Przykładowy wygląd „mgławicy planetarnej”.
W jej centrum pozostaje BIAŁY KARZEŁ” –
gorące jądro niedawnego olbrzyma**



Mgławice planetarne prezentują się niekiedy bardzo atrakcyjnie. Oto kilka przykładów



M57-Hole 200 in



Hourglass Nebula · MyCn18

HST · WFPC2

PRC96-07 · ST ScI OPO · January 16, 1996

R. Sahai and J. Trauger (JPL), the WFPC2 Science Team and NASA



NGC 2392 • “Eskimo” Nebula

HST • WFPC2

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

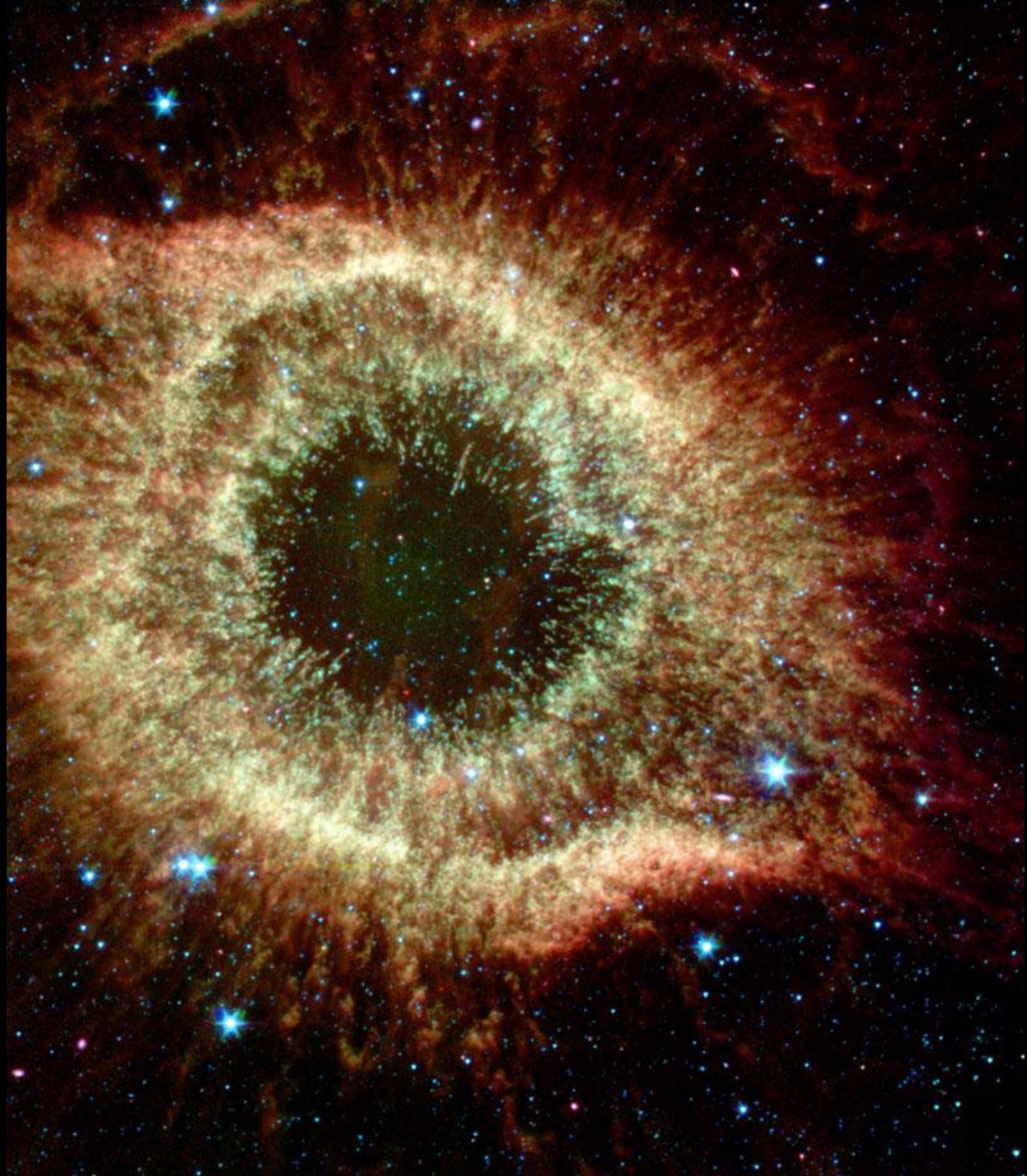


NGC 6543

PR95-01a · ST ScI OPO · January 1995 · P. Harrington (U.MD), NASA

HST · WFPC2

12/13/94 zgl





**W każdej galaktyce,
w wielkich obłokach materii
rodzą się gwiazdy**

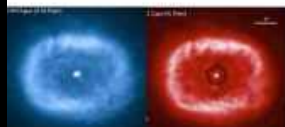


Z większości powstają mgławice planetarne ...



**... które rozwijają się,
świecą kolorowo,
aż rozpuł yną się
w kosmosie.**

Montaż:
Grażyna Sławińska



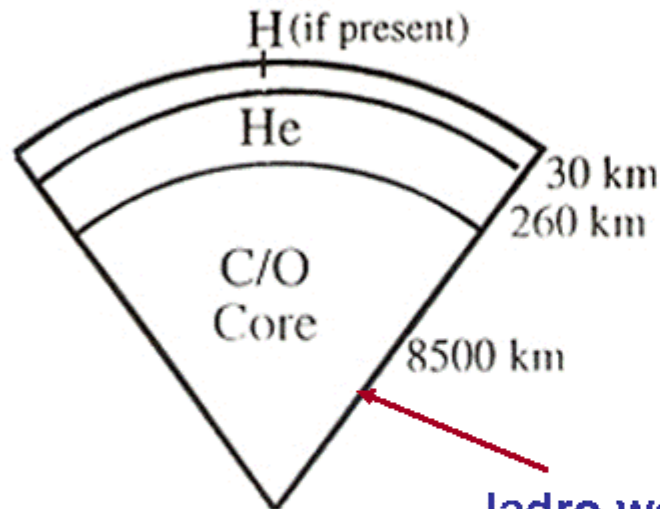
Biały karzeł

Biały karzeł stygnie i nie zmienia swoich rozmiarów.

Promień zbliżony do promienia Ziemi

Masa: **0,4 – 1,4 masy Słońca**

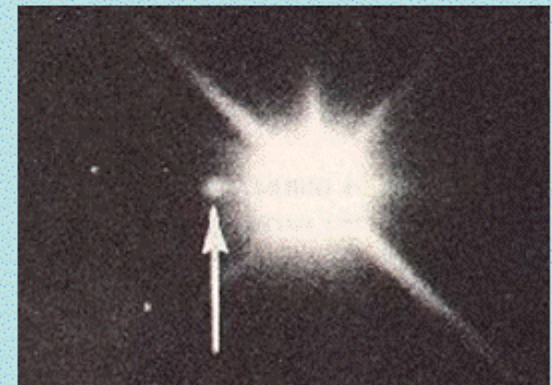
Gęstość: **10^6 g/cm^3**



Jądro węglowo-tlenowe

Cross Section of a Typical White Dwarf

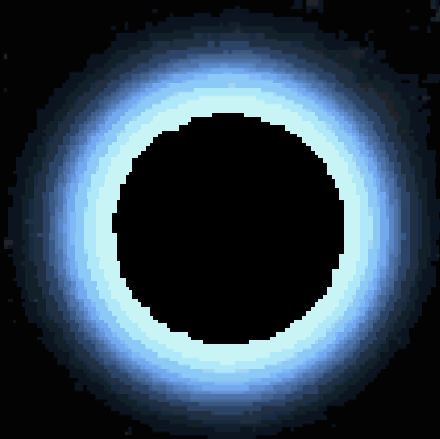
Budowa typowego białego karła



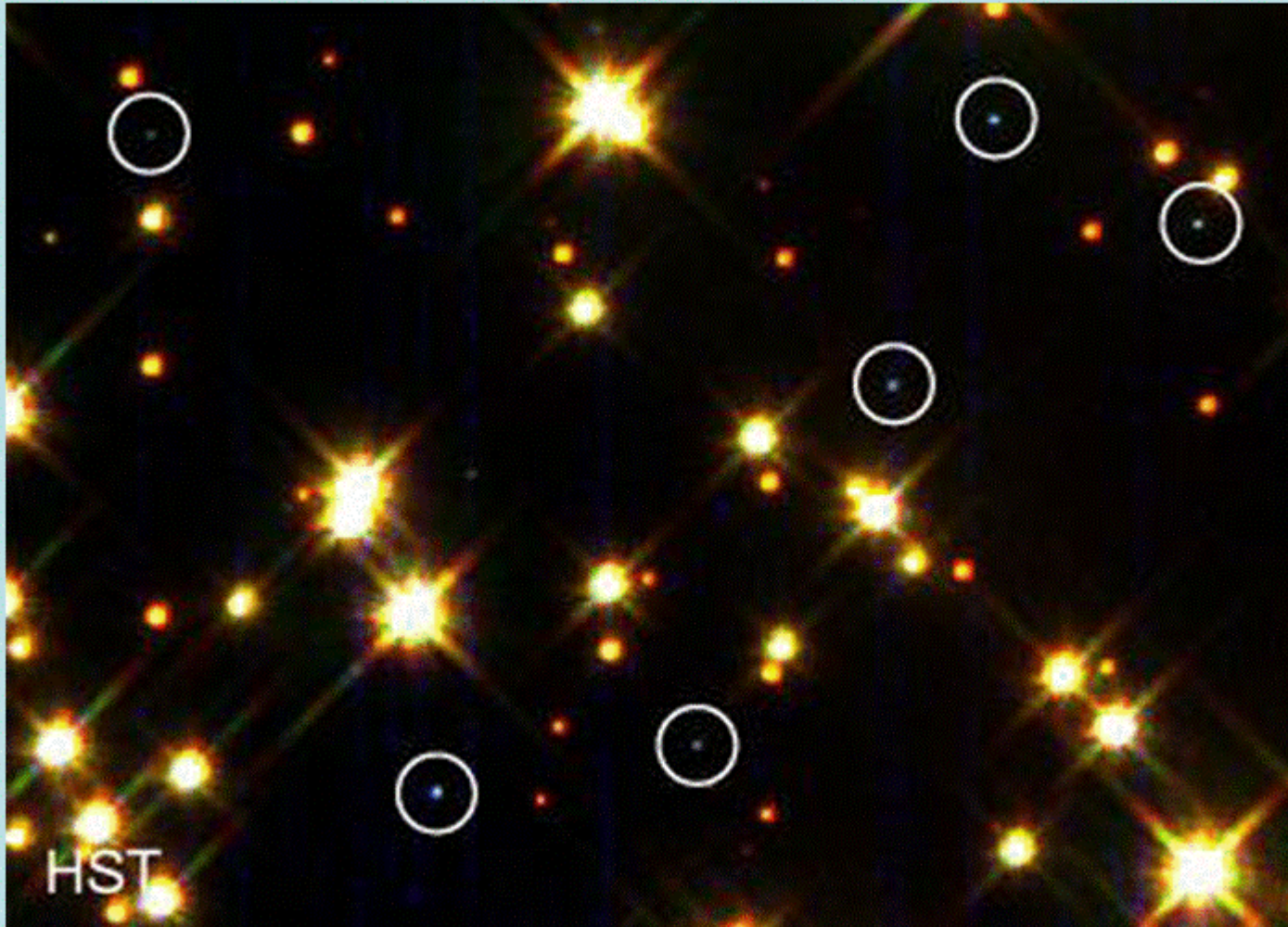
Syriusz B – biały karzeł

Syriusz – jedna z najbliższych Słońca gwiazd

SYRIUSZ B i ZIEMIA (porównanie rozmiarów)



Białe karły



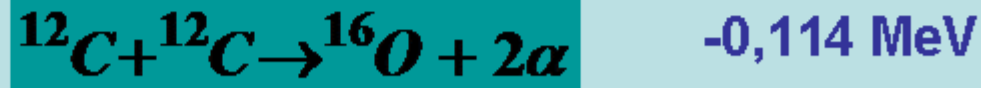
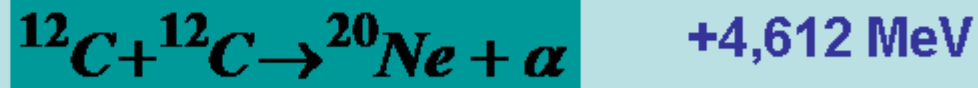
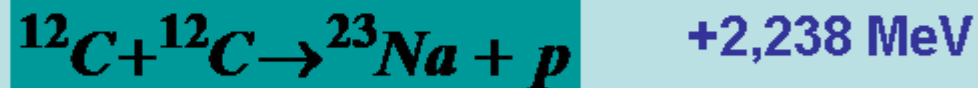
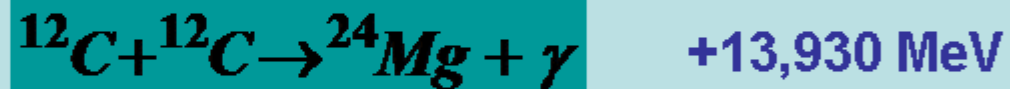
Zdjęcie z teleskopu Hubble'a przedstawiające mały obszar blisko centrum gromady gwiazd M4 w naszej Galaktyce z dużą koncentracją białych karłów (w kółkach)

Ewolucja gwiazd masywnych

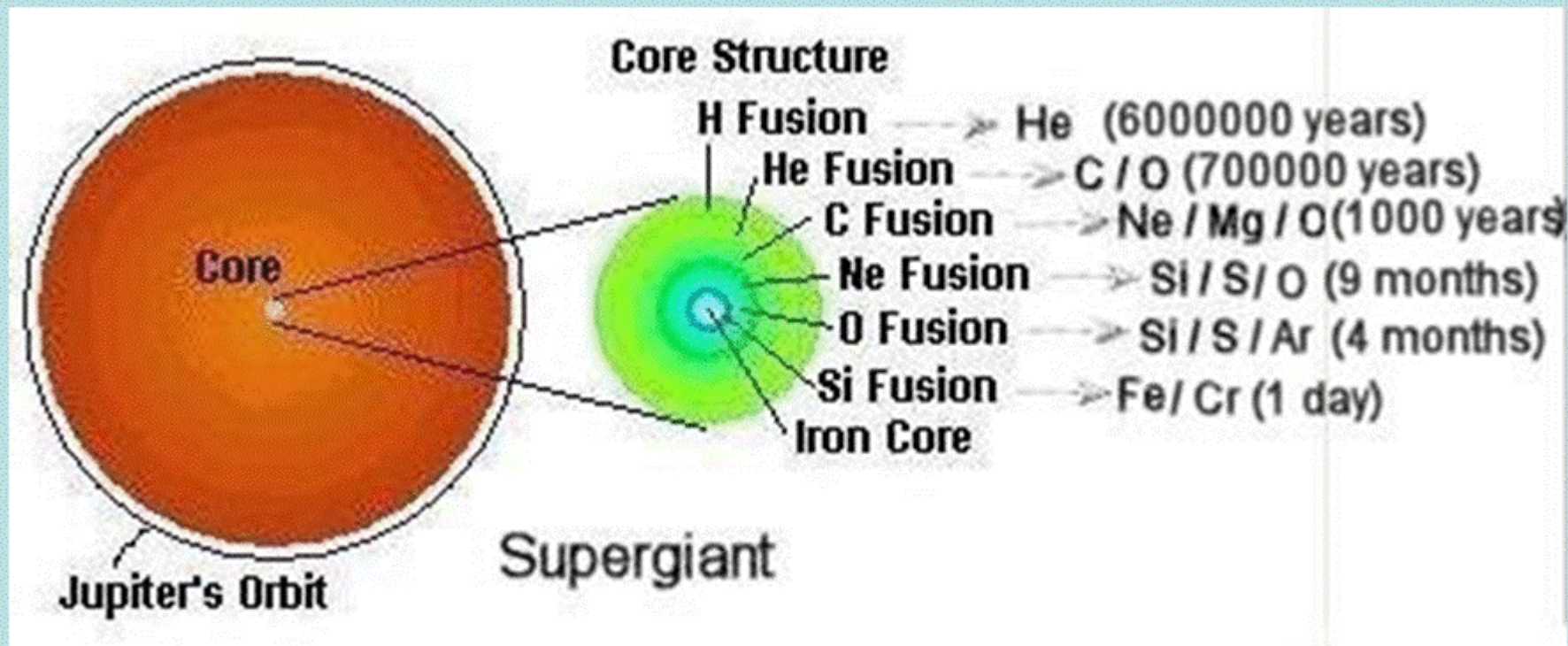
Gwiazdy o masach większych niż 3 masy Słońca

Nukleosynteza nie kończy się na węglu, jak dla gwiazd mniejszych.

Gdy wyczerpią się zapasy helu, jądro gwiazdy kurczy się i osiąga temperaturę ($T > 600$ mln K), przy której dochodzi do **zapalenia węgla**:



Ewolucja gwiazd masywnych

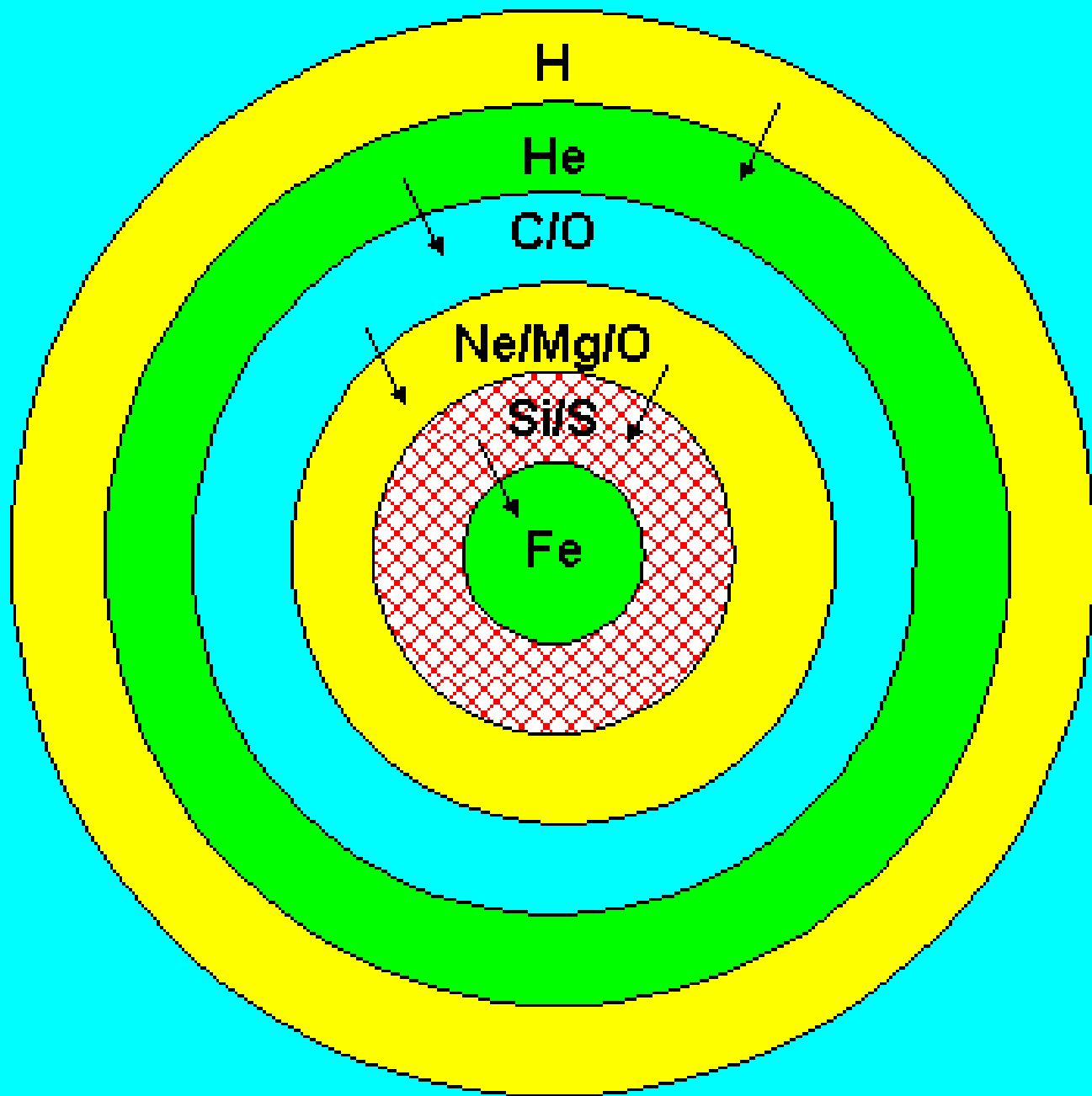


Synteza coraz cięższych jąder trwa coraz krócej!

Podczas syntezy żelaza
jądro traci energię



Jądro zaczyna się zapadać i
ogrzewać.

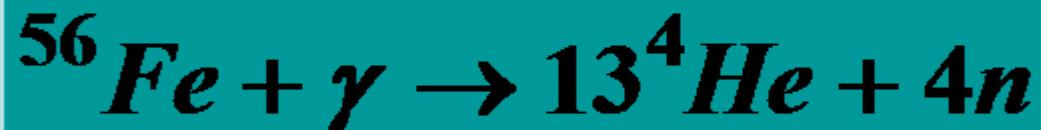


**JĄDRO
MASYWNEJ
GWIAZDY
TUŻ PRZED
KOLAPSEM**

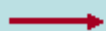
Ewolucja gwiazd masywnych

Podczas zapadania jądro przechodzi przez fazę podobną do białego karła jednak jego masa jest większa niż $1,44 \cdot M_{\odot}$ i ciśnienie zdegenerowanego gazu nie może powstrzymać grawitacji.

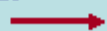
W temperaturze 5 – 10 mld K zaczyna się proces fotodezintegracji jąder atomowych:



Jądra atomowe
rozpadają się



W procesie tym pobierana
jest wielka energia



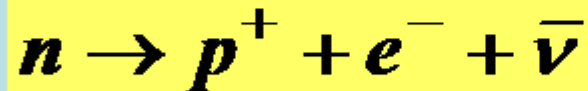
Jądro gwiazdy zapada się
coraz szybciej

Ewolucja gwiazd masywnych

Większość **protonów** zamienia się w **neutrony** w wyniku odwrotnego rozpadu beta:



Jest to proces nieodwracalny, ponieważ rozpady beta nie mogą zachodzić.



ze względu na degenerację gazu elektronowego

Powstawanie gwiazdy neutronowej

Powstaje **zdegenerowany gaz neutronowy** o olbrzymim ciśnieniu, które zatrzymuje proces kontrakcji.

Jądro staje się **gwiazdą neutronową**

Obiekt o **promieniu około 10 - 20 km**, masie równej **1 – 2 mas Słońca** i gęstości **miliarda ton na cm^3** !

Powstawanie gwiazdy neutronowej

Powstaje **zdegenerowany gaz neutronowy** o olbrzymim ciśnieniu, które zatrzymuje proces kontrakcji.

Jądro staje się gwiazdą neutronową

Obiekt o **promieniu około 10 - 20 km**, masie równej **1 – 2 mas Słońca** i gęstości **miliarda ton na cm^3** !

Największą masą gwiazdy neutronowej jest prawdopodobnie **1,5-2 masy Słońca** (*masa Oppenheimera-Volkoffa*)

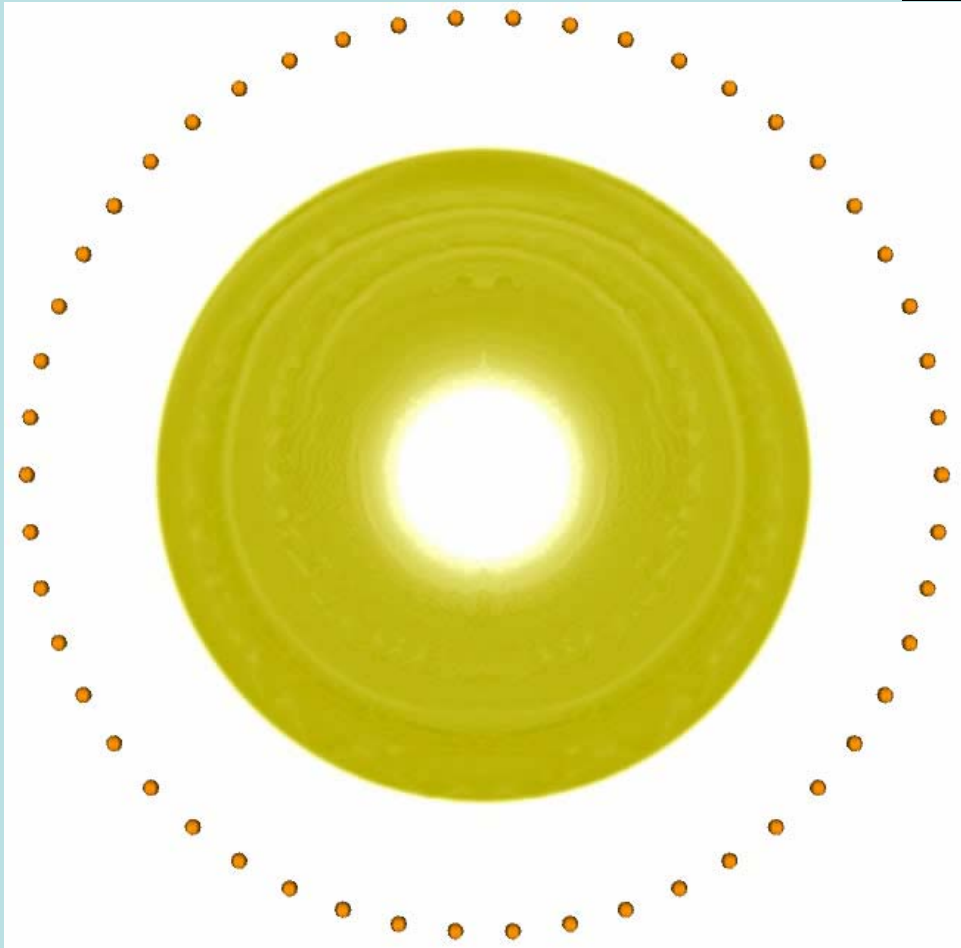
Gdy masa jądra żelaznego jest **większa**, ciśnienie zdegenerowanego gazu neutronowego nie może powstrzymać jego kontrakcji i gwiazda zapada się w **czarną dziurę**.

Supernowa

Jądro gwiazdy z materii neutronowej jest nieściśliwe.

Opadające na nie zewnętrzne warstwy gwiazdy gwałtownie odbijają się.

GWIAZDA WYBUCHA JAKO SUPERNOWA!!!



Supernowa

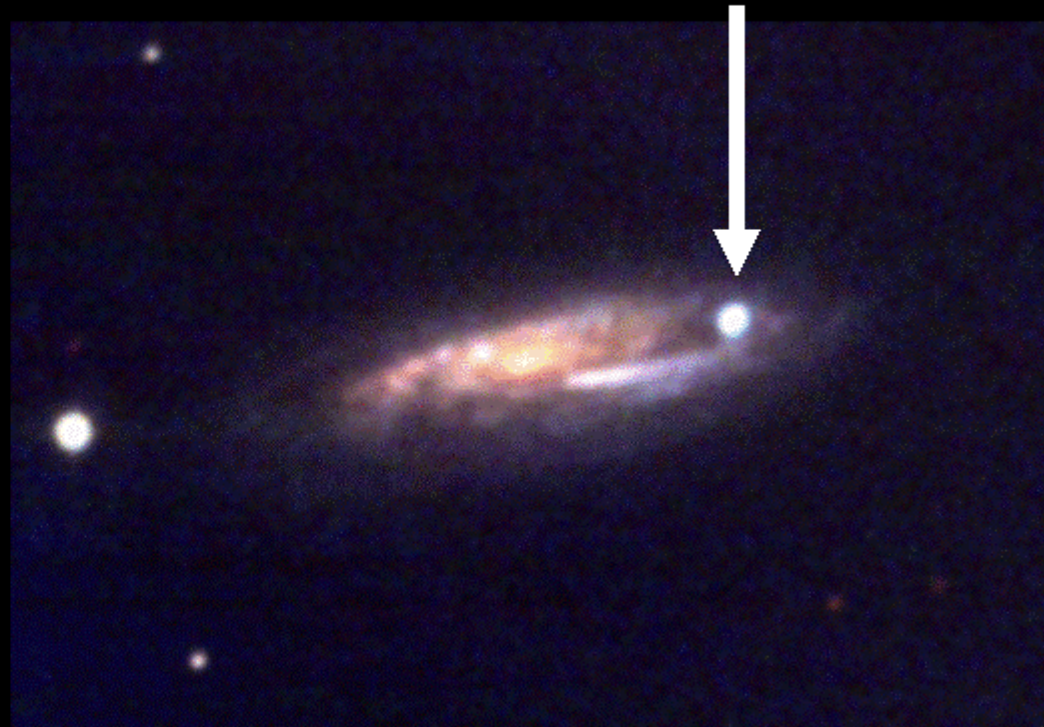
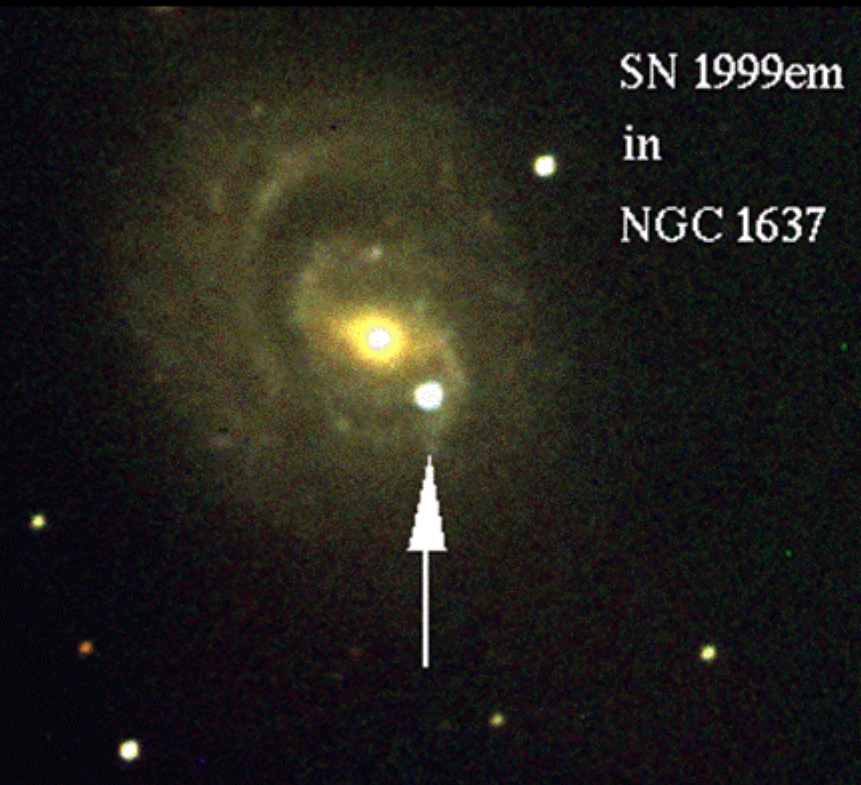
Gdy gwiazda wybucha jako supernowa to:

Emituje tyle energii, ile mała galaktyka (miliardy gwiazd)

W czasie wybuchu zachodzą szybkie reakcje **syntezy ciężkich pierwiastków** (cięższych od żelaza).



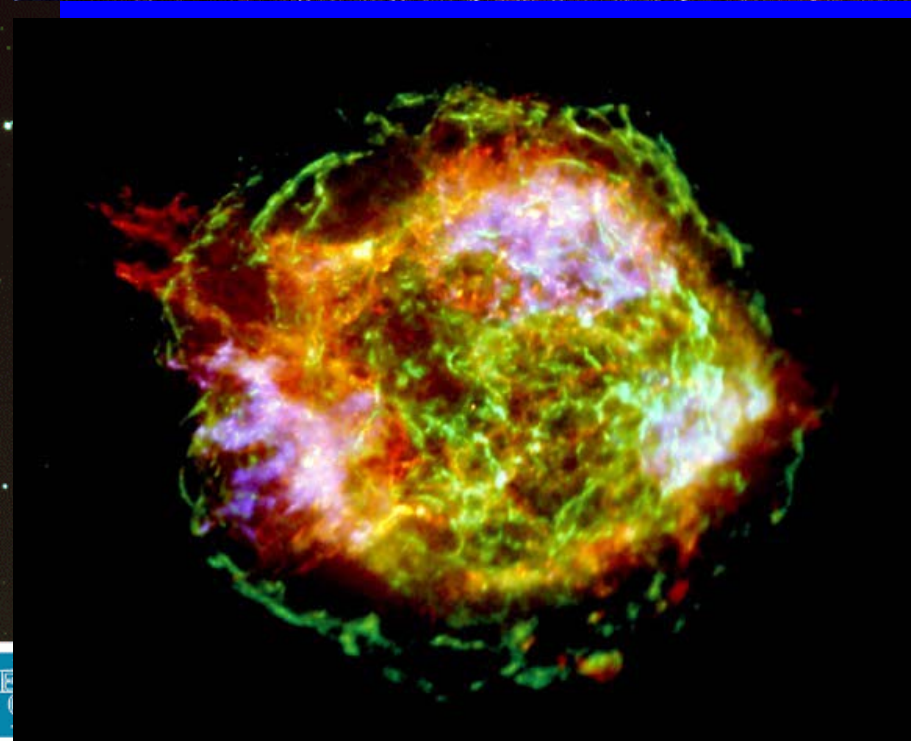
WYBUCHY SUPERNOWYCH WIDOCZNE W INNYCH GALAKTYKACH

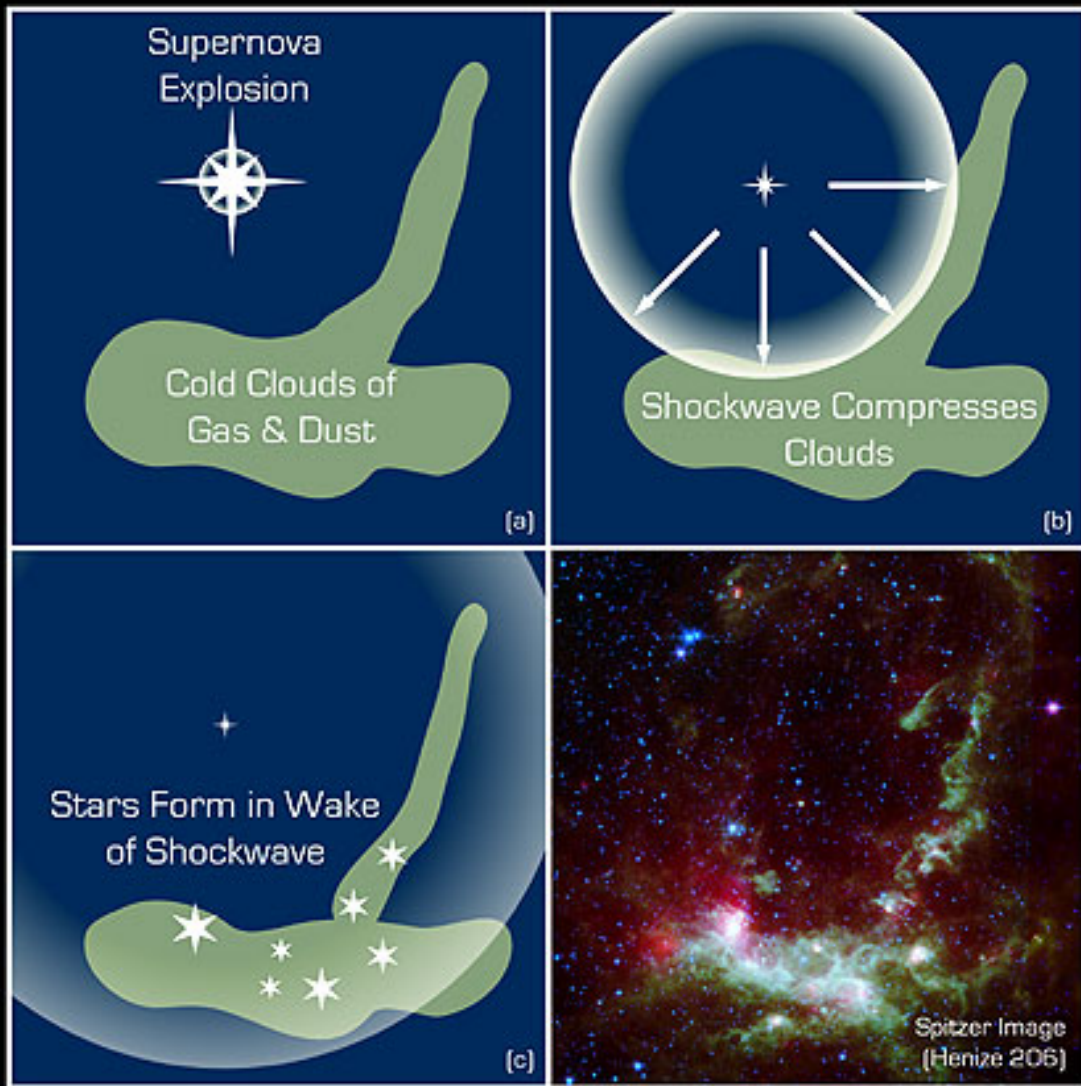


TAK WYGLĄDA OBRAZ PO WYBUCHU SUPERNOWEJ



The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORS2)





Spitzer Space Telescope • esc2004-0-1b

EKSPLOZJE GWIAZD SUPERNOWYCH MOGĄ SPRZYJAĆ POWSTAWANIU ZAGĘSZCZEŃ W OBŁOKACH MIĘDYGWIAZDOWYCH PRZYSPIEWSZAJĄC PROCESY KONDENSACJI

UMIERAJĄC WYBUCHOWO MASYWNA GWIAZDA MOŻE WIĘC UŁATWIAĆ POWSTAWANIE KOLEJNEGO POKOLENIA GWIAZD.

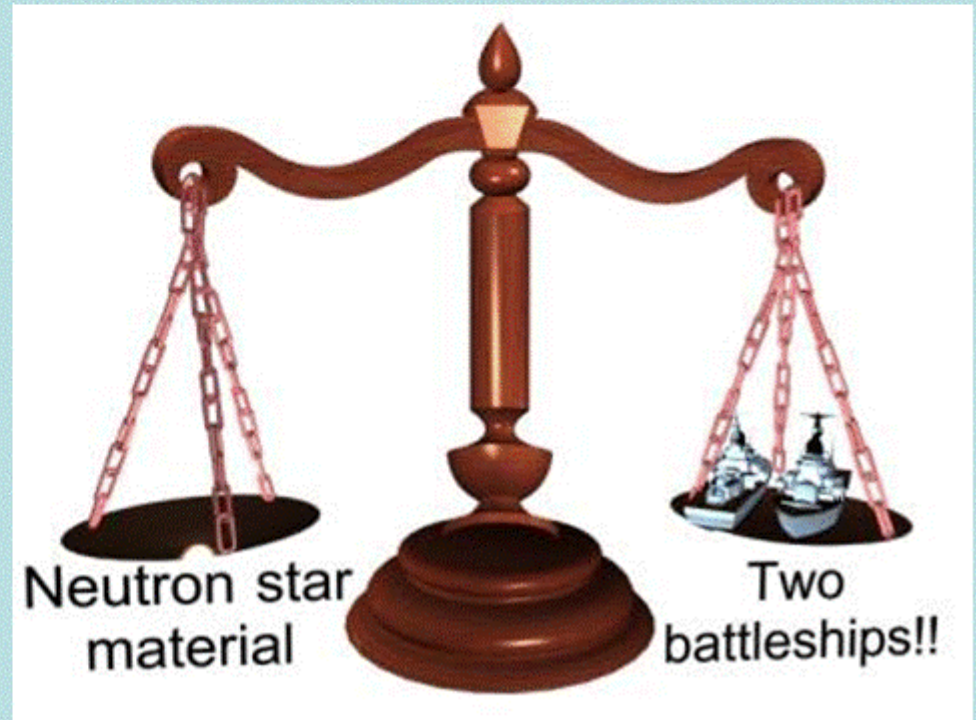
MY TEŻ ISTNIEJEMY DZIĘKI WYBUCHAJĄCYM GWIAZDOM SUPERNOWYM.

Gwiazdy neutronowe



Porównanie wielkości gwiazdy neutronowej i białego karła.

Gęstość gwiazdy neutronowej jest ogromna!



Gwiazdy neutronowe i pulsary

W czasie kurczenia jądra zostaje zachowany **moment pędu**.

Wielokrotne zmniejszenie promienia powoduje znaczny **wzrost prędkości rotacji**.

Gwiazdy neutronowe mają bardzo **silne, dipolowe pola magnetyczne**. Bieguny magnetyczne nie muszą znajdować się na osi rotacji.

Gwiazdy neutronowe i pulsary

W czasie kurczenia jądra zostaje zachowany **moment pędu**.

Wielokrotne zmniejszenie promienia powoduje znaczny **wzrost prędkości rotacji**.

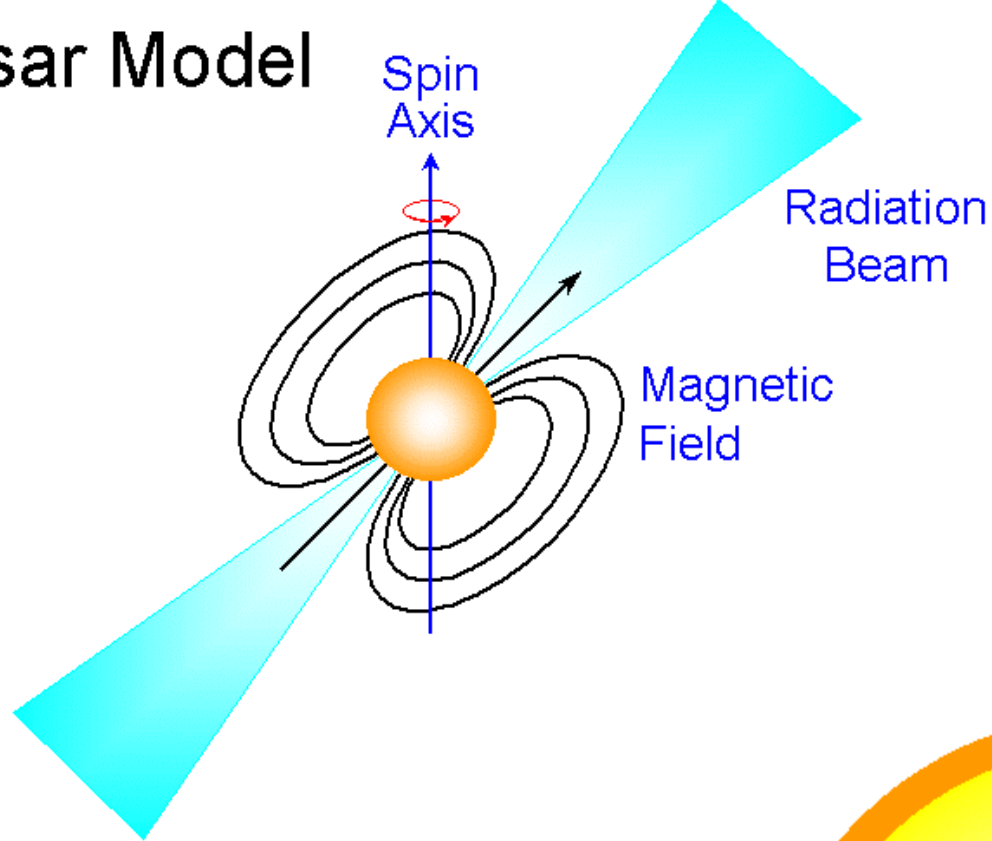
Gwiazdy neutronowe mają bardzo **silne, dipolowe pola magnetyczne**. Bieguny magnetyczne nie muszą znajdować się na osi rotacji.

Niektóre gwiazdy neutronowe obserwujemy jako **pulsary**. Pulsary wysyłają krótkie błyski o **częstościach radiowych**, powtarzające się z zegarową dokładnością z okresem od milisekund do sekund.

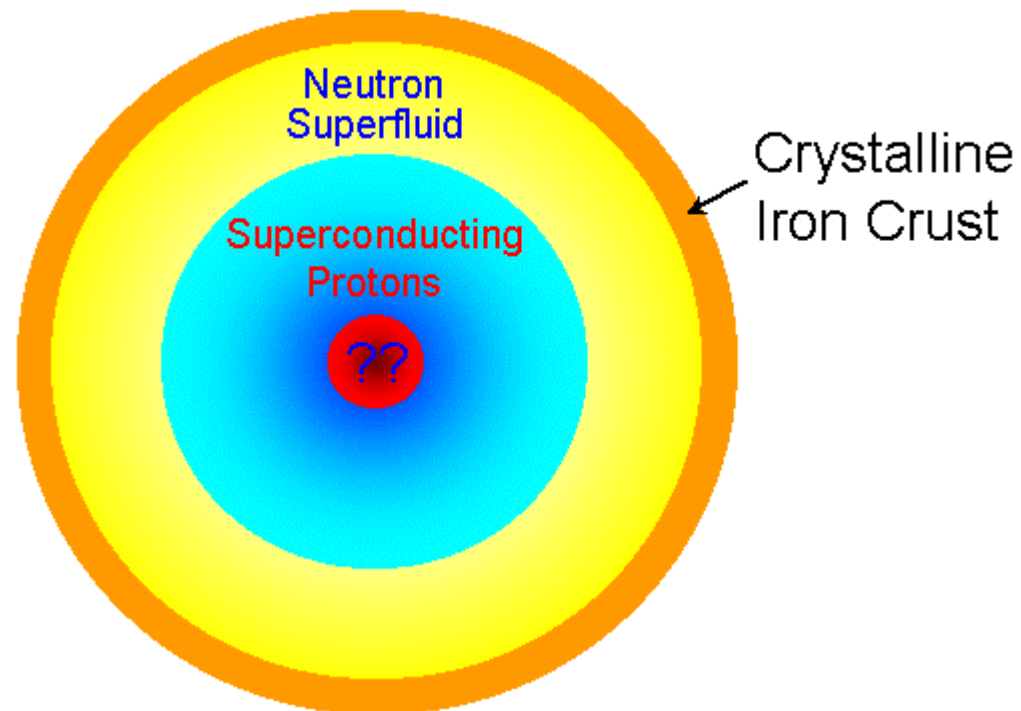
Fale radiowe generowane są przez relatywistyczne elektrony, krążące wokół linii sił pola magnetycznego.

Kierunek emisji promieniowania ograniczony jest do **wąskiego stożka** w przestrzeni, który szybko **rotuje** wraz z gwiazdą.

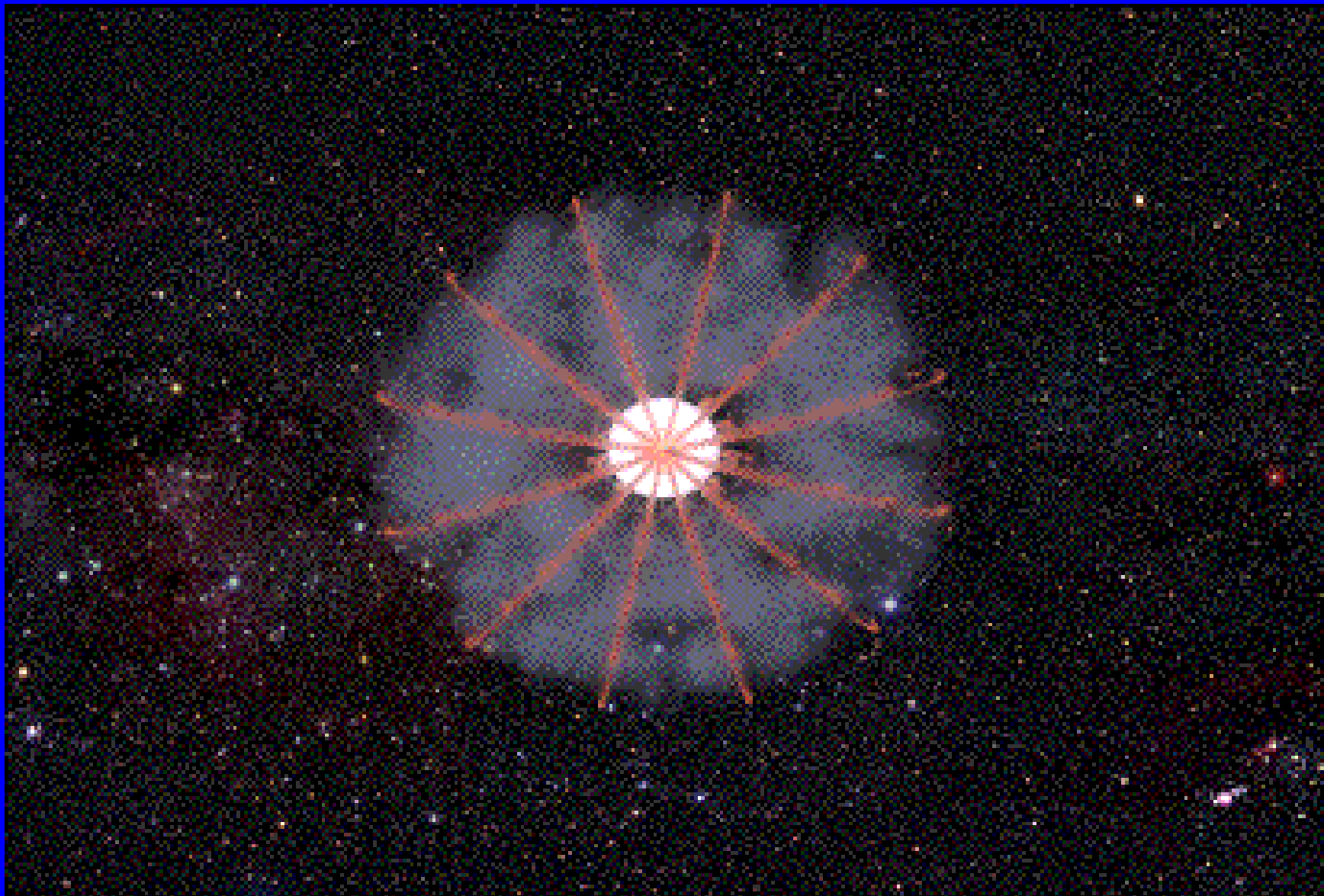
Pulsar Model



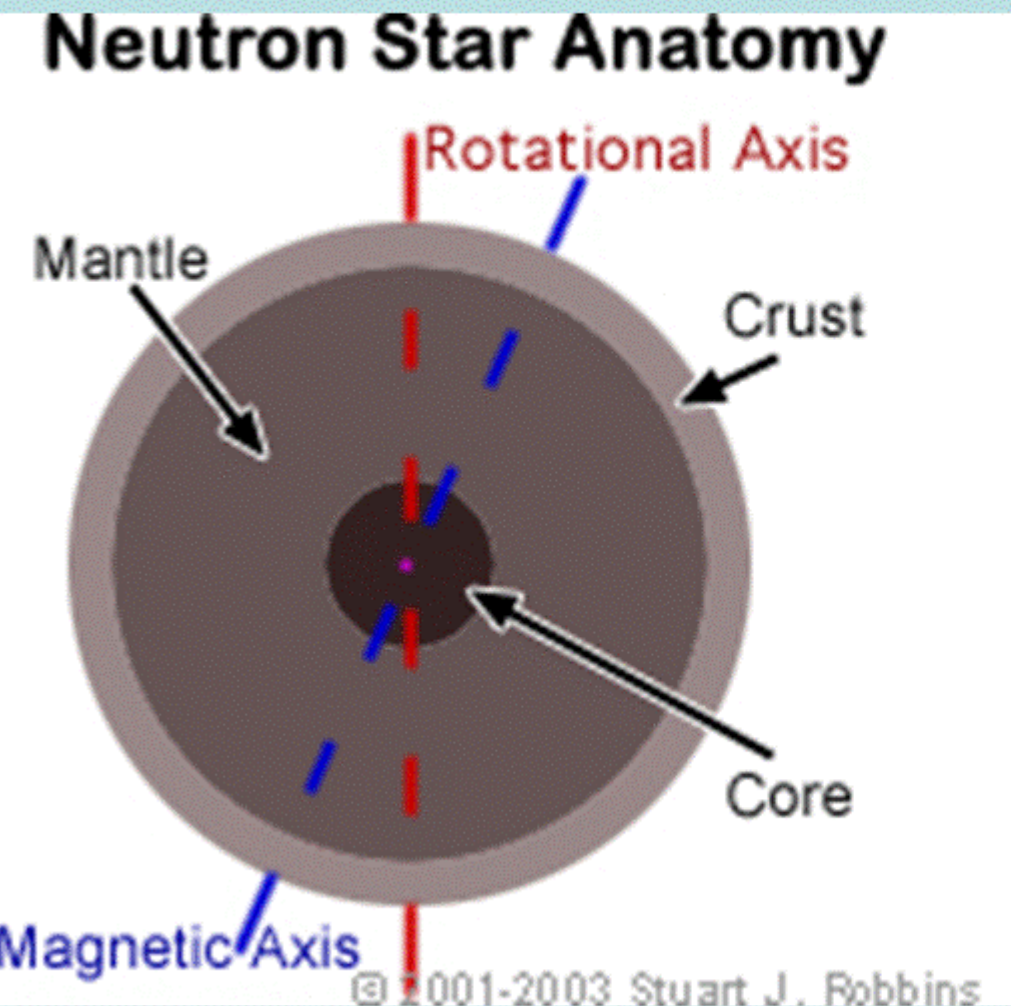
GWIAZDA NEUTRONOWA I JEJ STRUKTURA WEWNĘTRZNA



ANIMACJA ILUSTRUJĄCA IDEĘ PULSARA

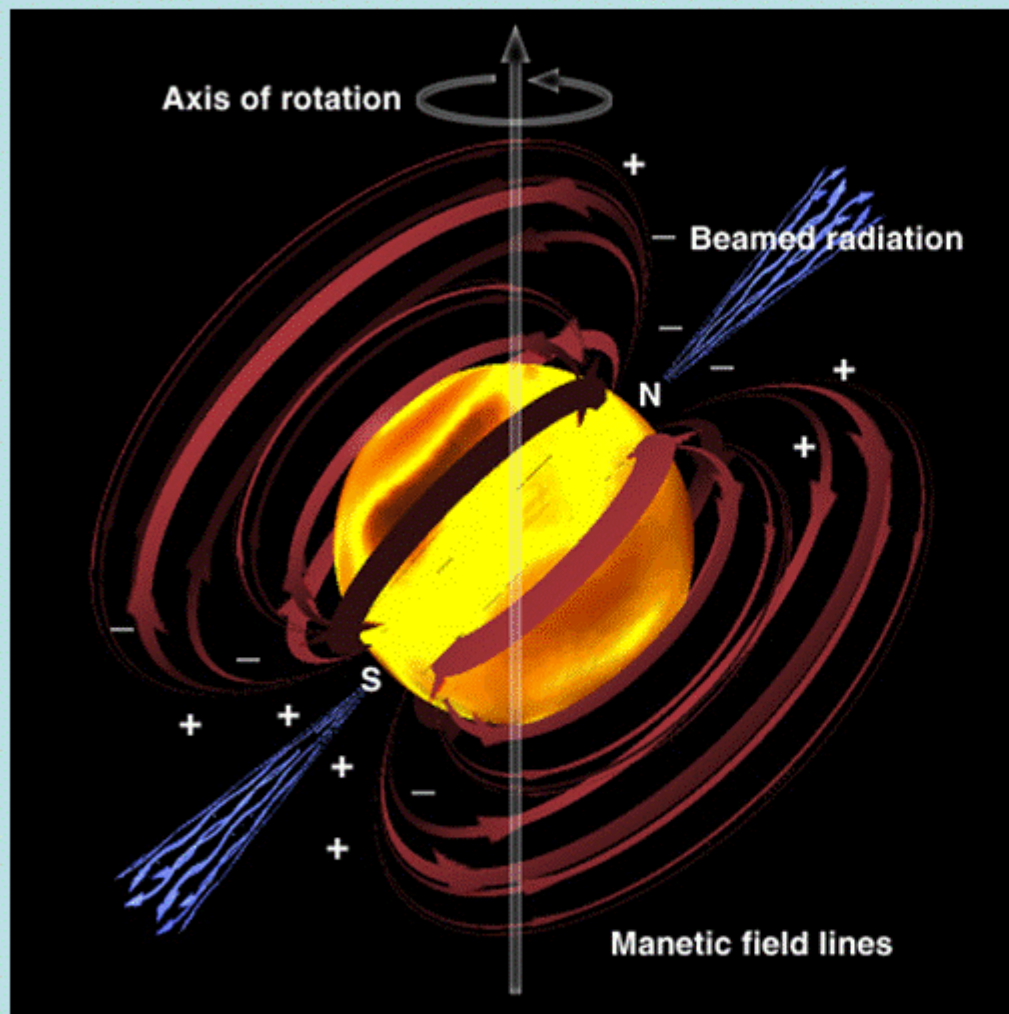


Promieniowanie pulsarów



W czasie grawitacyjnego **zapadania gwiazdy** zachowywany jest strumień pola magnetycznego. Ponieważ zapadająca się gwiazda neutronowa zmniejsza rozmiar około milion razy, jej pole powierzchni zmniejsza się 10^{12} razy. Tak więc gwiazdy neutronowe obdarzone są **gigantycznymi polami magnetycznymi**.

Promieniowanie pulsarów

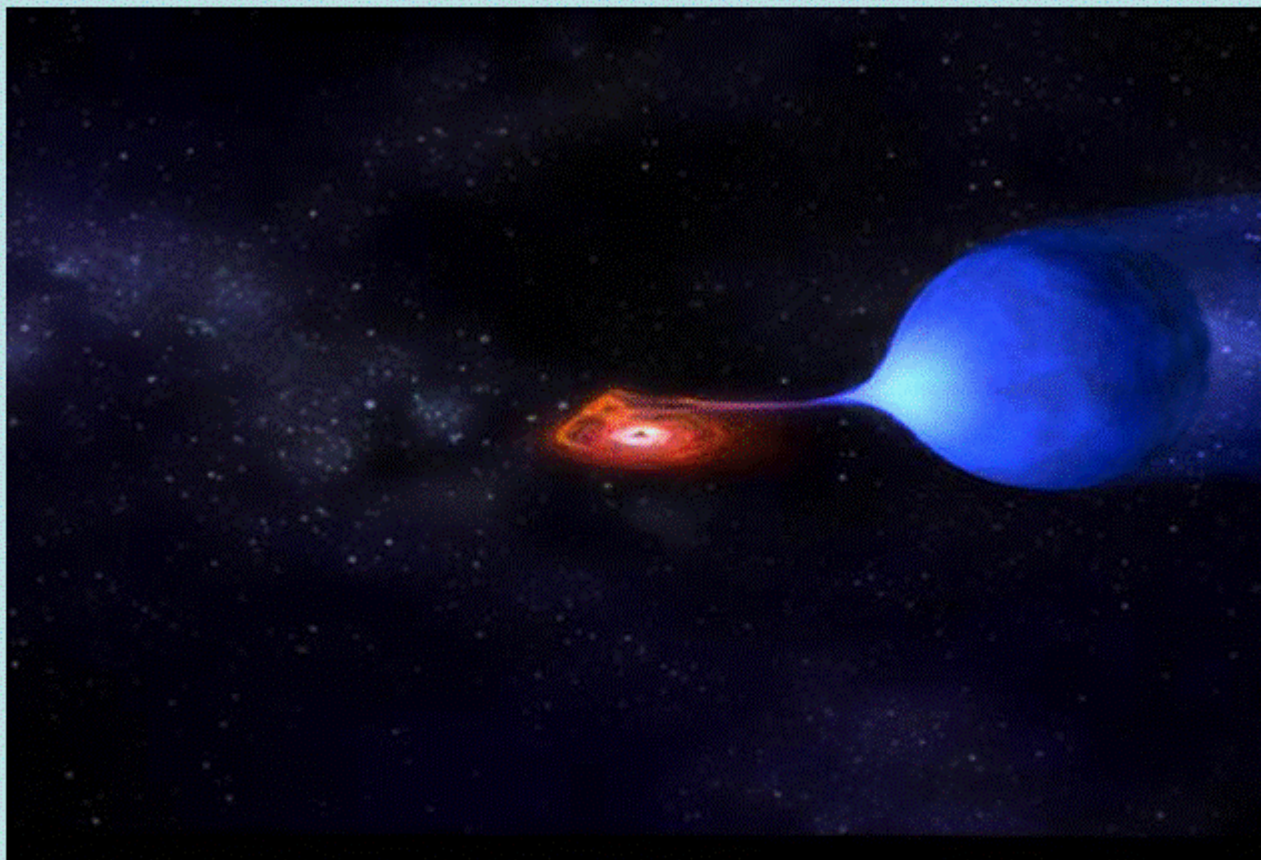


Bieguny magnetyczne zwykle nie leżą na osi rotacji.

Wiązka promieniowania wiruje wokół osi obrotu gwiazdy – **efekt latarni morskiej**.

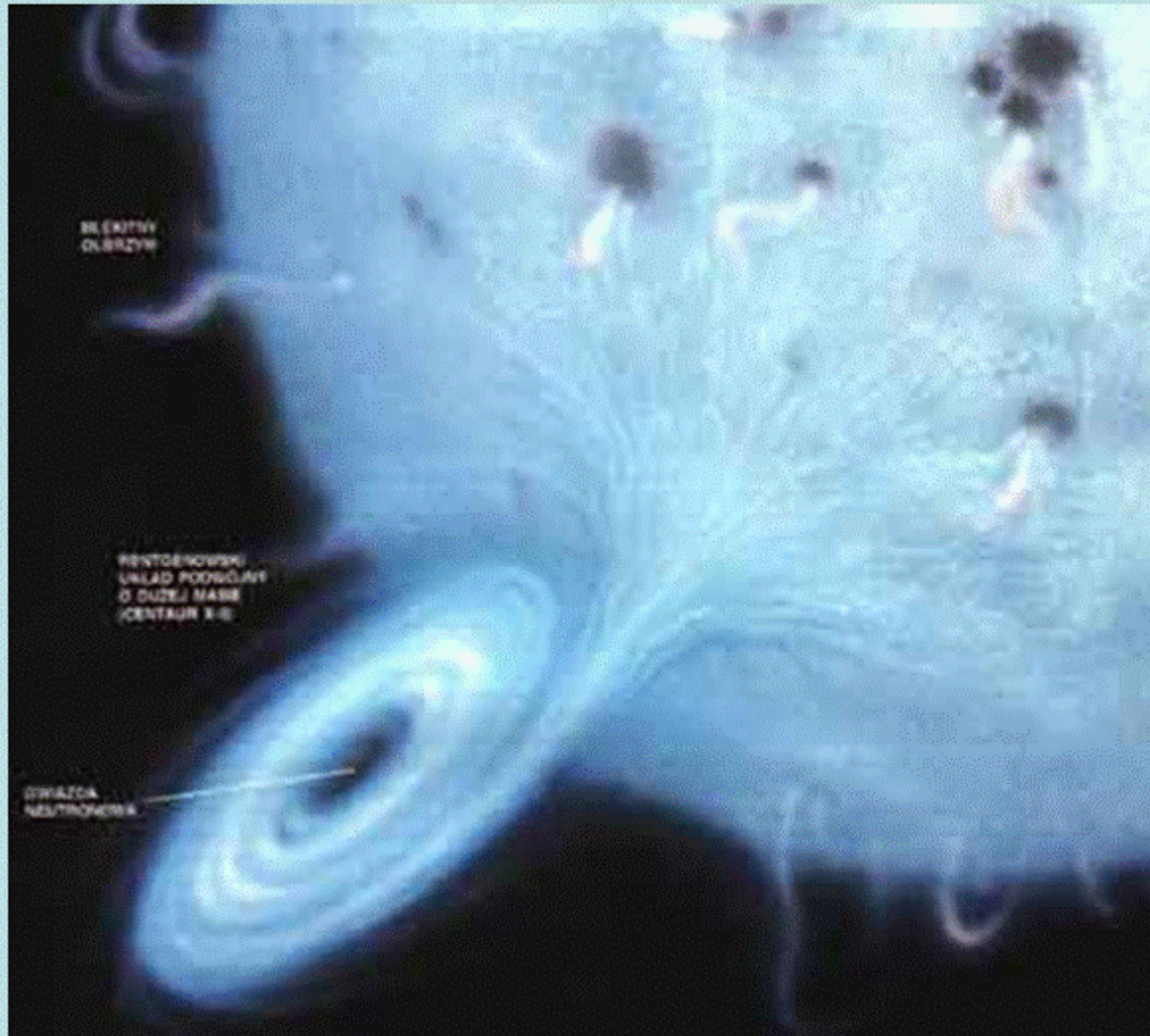
Wiele gwiazd neutronowych nie obserwujemy w postaci pulsarów, ponieważ ich wiązki radiowe nigdy nie trafiają w Ziemię.

Gwiazdy neutronowe



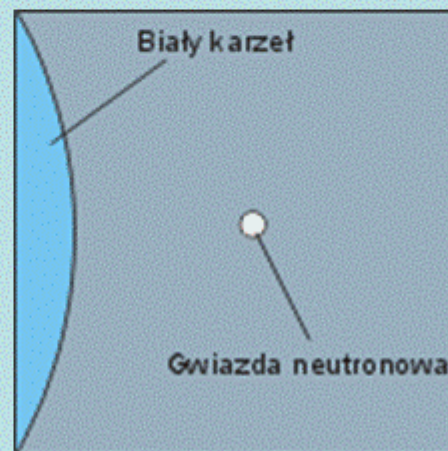
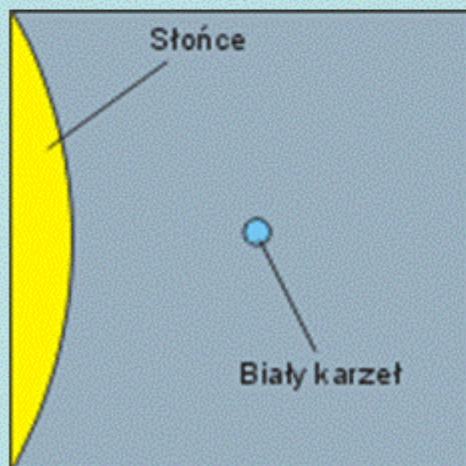
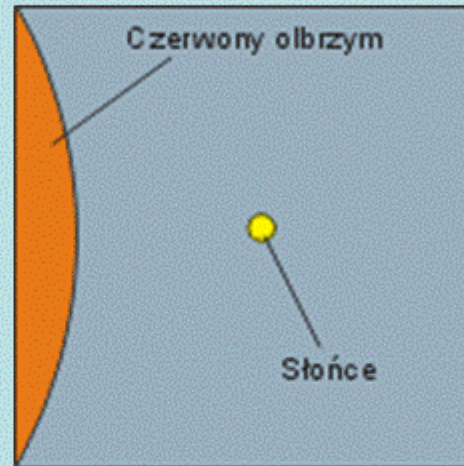
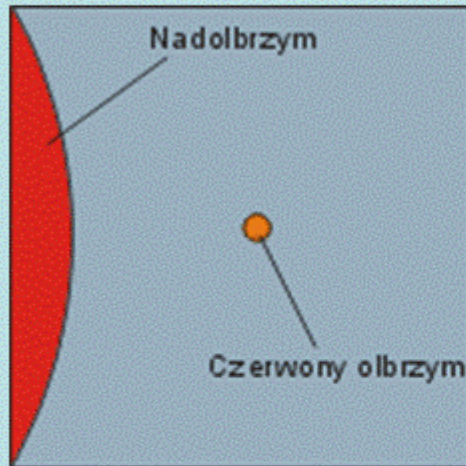
Często gwiazdy neutronowe występują w układach podwójnych. Gaz z pobliskiego sąsiada może opadać na gwiazdę neutronową, przyciągany przez jej silne pole grawitacyjne. Gaz opada po spirali w środku, której znajduje się gwiazda neutronowa. Podczas opadania gaz tworzy dysk akrecyjny.

Gwiazdy neutronowe

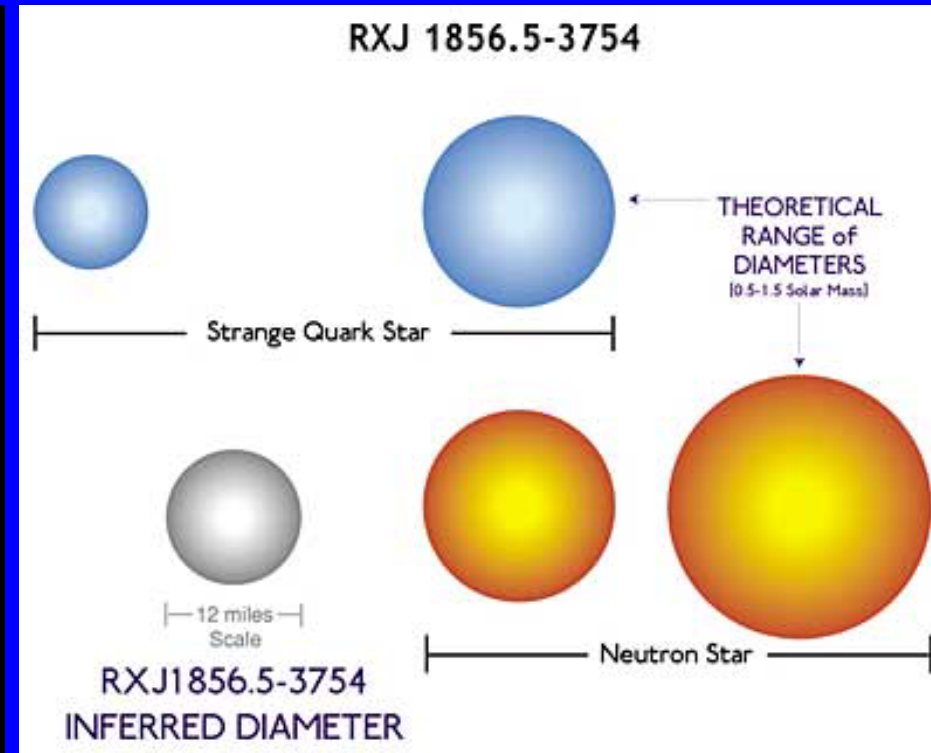
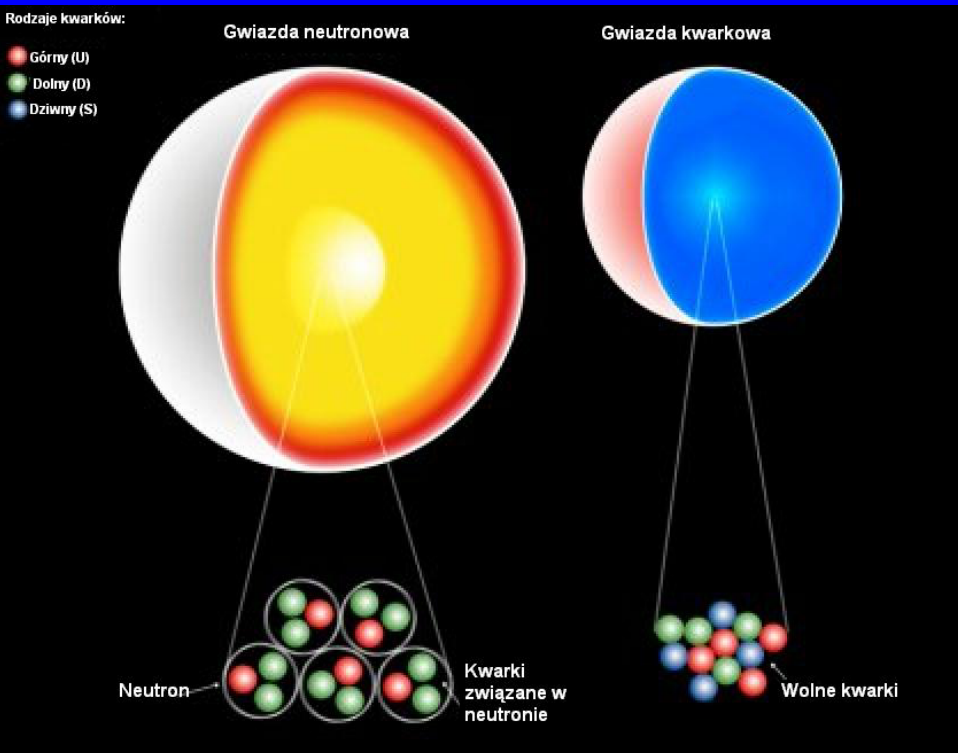


Centaur X-3. Rentgenowski układ podwójny gwiazdy neutronowej i błękitnej gwiazdy o masie 10 - 40 mas Słońca. *Świat Nauki*, styczeń 1994

Wielkości gwiazd na różnych etapach ewolucji - porównanie



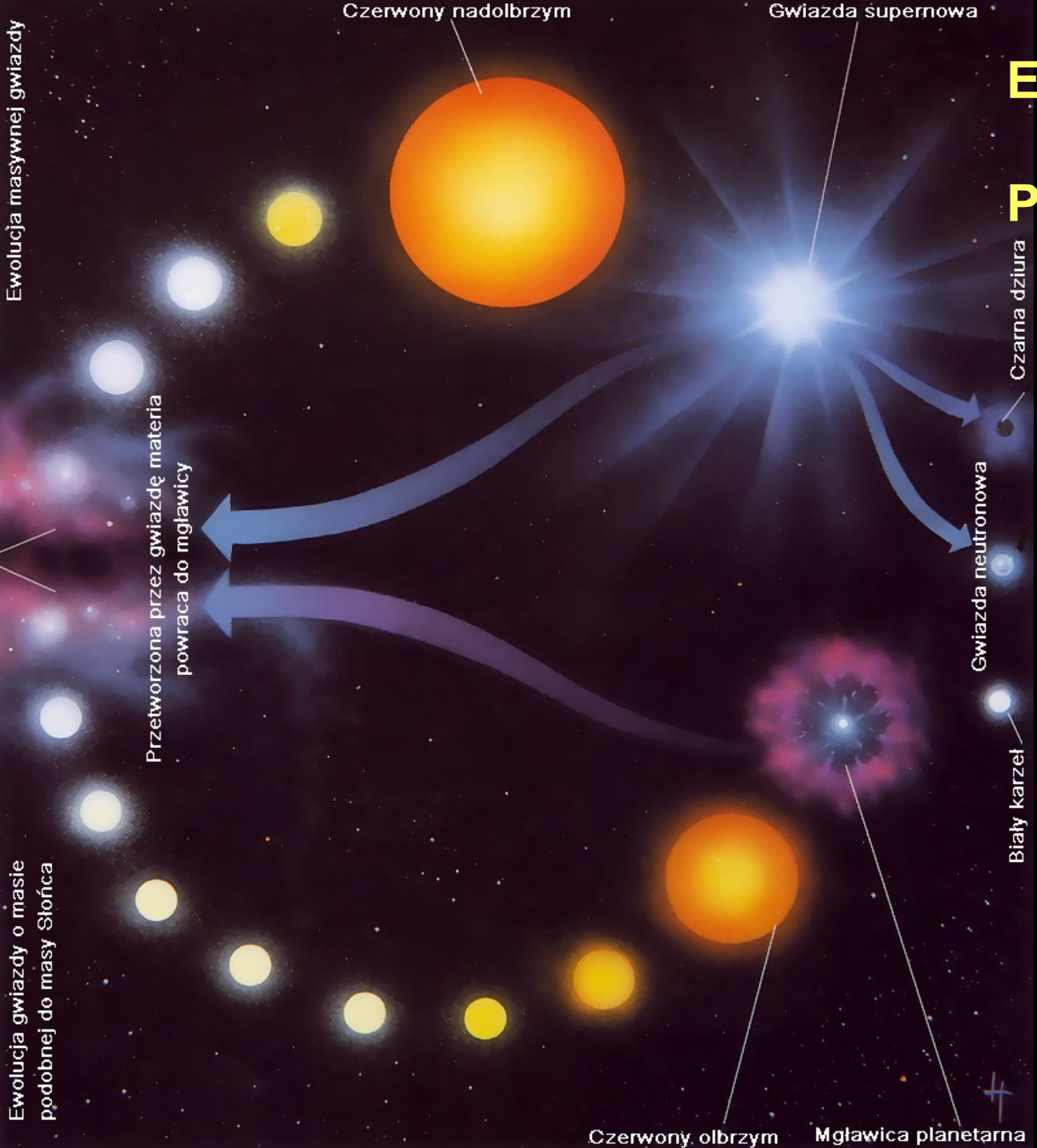
OBECNIE ROZWAŻA SIĘ TAKŻE MOŻLIWOŚĆ POWSTANIA JESZCZE BARDZIEJ EGZOTYCZNYCH TWORÓW - GWIAZD KWARKOWYCH.



EWOLUCJA GWIAZD

(GŁÓWNE ETAPY)

- 0. Materia międzygwiazdowa - obłoki pyłowo – molekularne (budulec)**
- 1. Protogwiazda**
- 2. Gwiazda „ciągu głównego” – jasność i temperatura zależne od masy, termojądrowe „spalanie” wodoru**
- 3. Faza czerwonego olbrzyma i nadolbrzyma – termojądrowe „spalanie” helu i ew. cięższych nuklidów**
- 4a. Utrata znacznej części masy (wiatr gwiazdowy oraz faza mgławicy planetarnej), przejście do fazy białego karła i jego stygnięcie**
- 4b. Dla gwiazd znacznie masywniejszych od Słońca
wybuch supernowej; z części centralnej powstaje gwiazda neutronowa lub czarna dziura**



EWOLUCJA GWIAZD

PODSUMOWANIE

J. Sikorski, IFD.
Uniwersytet Gdański