

*Elementy Astronomii i Astrofizyki*  
*- skrót z wykładu XV*

*Krzysztof Radziszewski*  
*Instytut Astronomiczny UWr*

*Wykład XV - Wrocław, 11 czerwca 2026 r.*

# Ewolucja gwiazd

Opuszczenie Cągu Głównego przez gwiazdę nie oznacza, że nie zachodzi w niej już przemiana wodoru w hel. Przenosi się ona jedynie do otoczki przylegającej do jądra, całkowicie już pozbawionego wodoru. Proces ten powoduje stopniowe zwiększanie się masy helowego jądra, co ułatwia osiągnięcie warunków sprzyjających do wykorzystania tego pierwiastka jako paliwa.

W związku ze zmianą składu chemicznego jądra ten obszar gwiazdy stopniowo się kurczy, co powoduje wzrost temperatury i gęstości.

Dlaczego więc na diagramie H-R wszystkie ścieżki ewolucyjne wędrują w prawo i do góry, co oznacza, że gwiazdy zwiększają swoje promienie, często nawet kilkadziesiąt razy, stając się czerwonymi olbrzymami?

Gdy jądro się kurczy, otoczka się rozdyma, gdy jądro się rozdyma, a będzie tak np. po „zapłonie” helu, otoczka się kurczy - jest to tzw. lustrzana reakcji otoczki na zachowanie się jądra.

Efekt ten jest spowodowany zmianami w energii grawitacyjnej jądra: w przypadku kurczenia - jest ona wykorzystywana na rozdęcie otoczki, w przypadku rozdymania się jądra - część energii nie dociera do otoczki, co wymusza jej skurczenie.

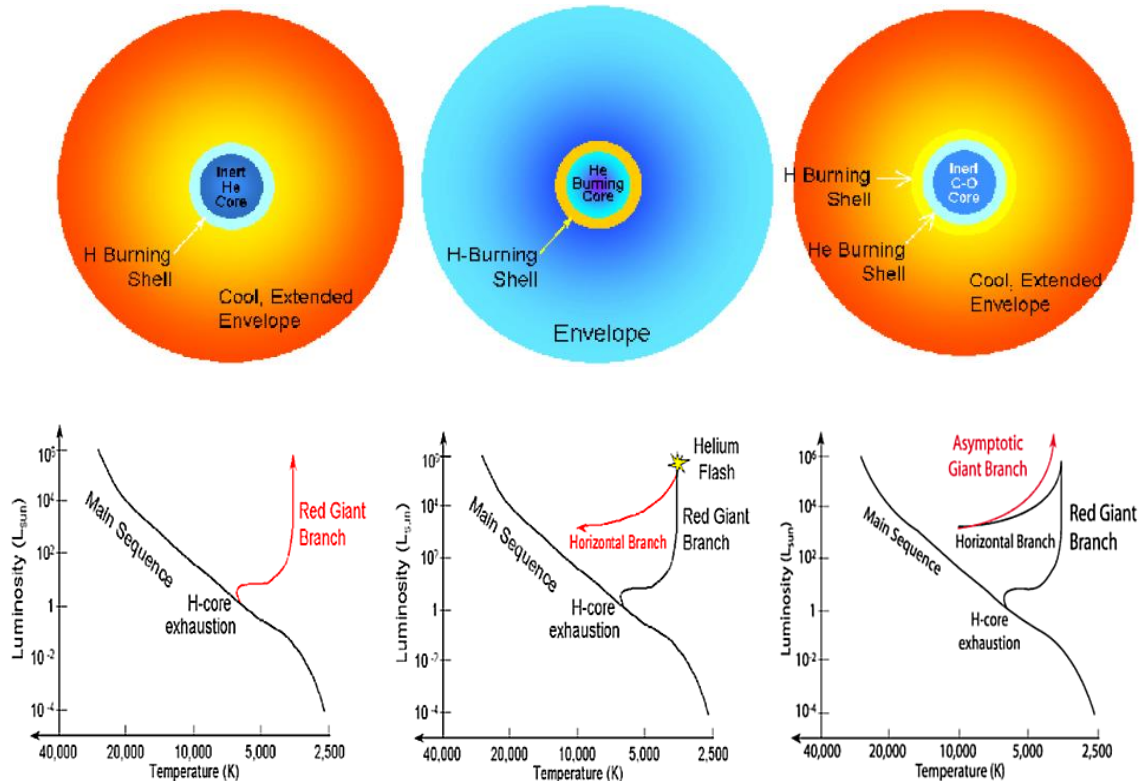
# Ewolucja gwiazd

Z chwilą zainicjowania cyklu  $3\alpha$  gwiazda przesuwa się na lewo na diagramie H-R zajmując miejsce na tzw. gałęzi horyzontalnej, ale po pewnym czasie przesuwa się znów na prawo i jeszcze wyżej niż to było przed „zapłonem” helu. Jest to tzw. asymptotyczna gałąź olbrzymów (*ang. AGB*).

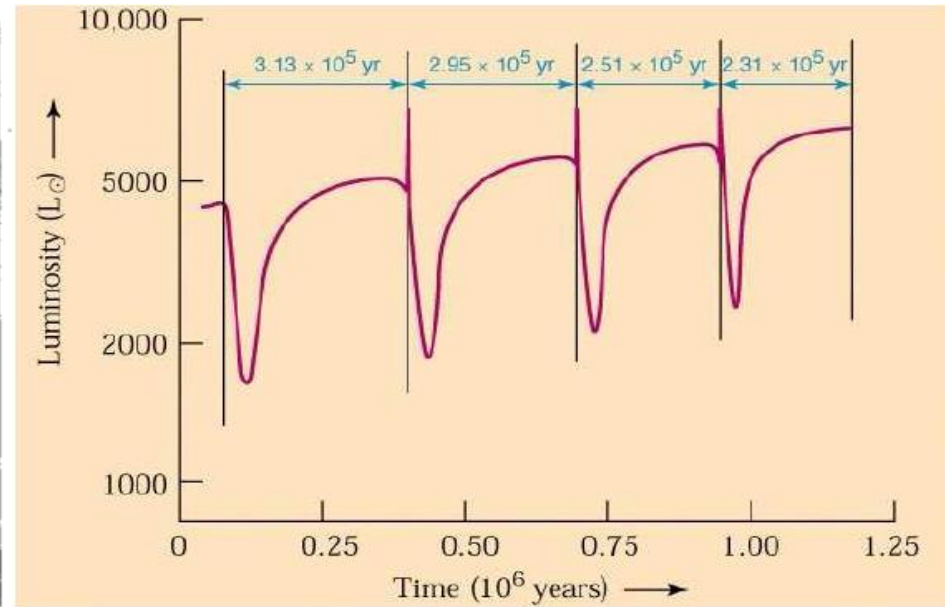
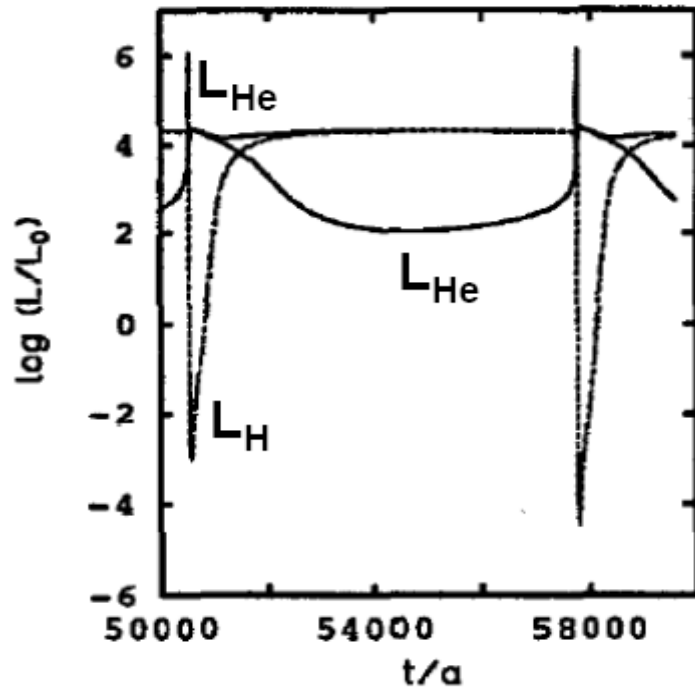
Zmiany w wyglądzie gwiazdy na tym etapie ewolucji odzwierciedlają zmiany zachodzące w jej środku.

Na asymptotycznej gałęzi olbrzymów można wyodrębnić już:

- węglowo-tlenowe jądro,
- powłokę, w której spalany jest hel,
- powłokę, w której spalany jest wodór
- otoczkę.



# Ewolucja gwiazd



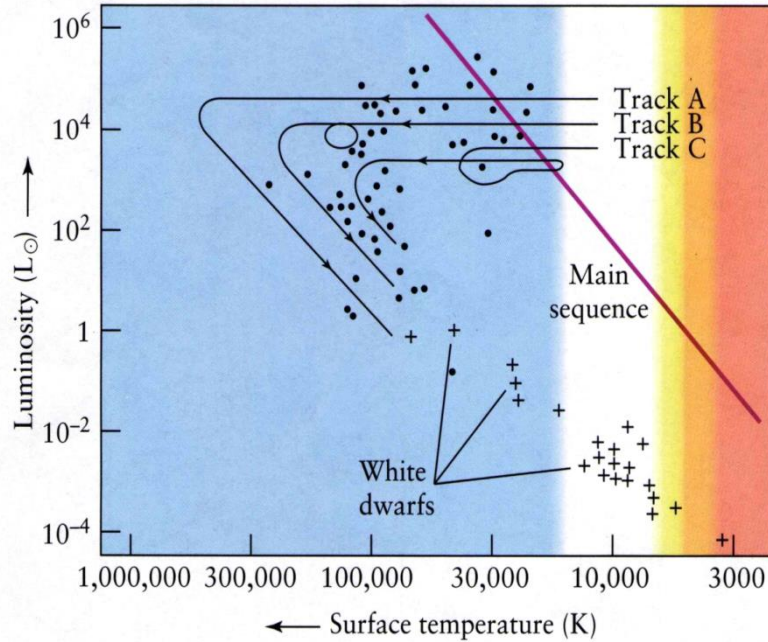
Fluri 2009

Tempo zachodzenia reakcji termojądrowych w obydwóch powłokach przylegających do jądra podlega powtarzającym się zmianom. Krótkotrwałym wzrostom towarzyszy gwałtowne rozprężenie ograniczające ilość reakcji, po czym stopniowa kontrakcja powoduje ponowne ich zwiększenie do poziomu skutkującego kolejnym rozprężeniem tej warstwy. Mówimy wtedy o powtarzających się pulsach termicznych.

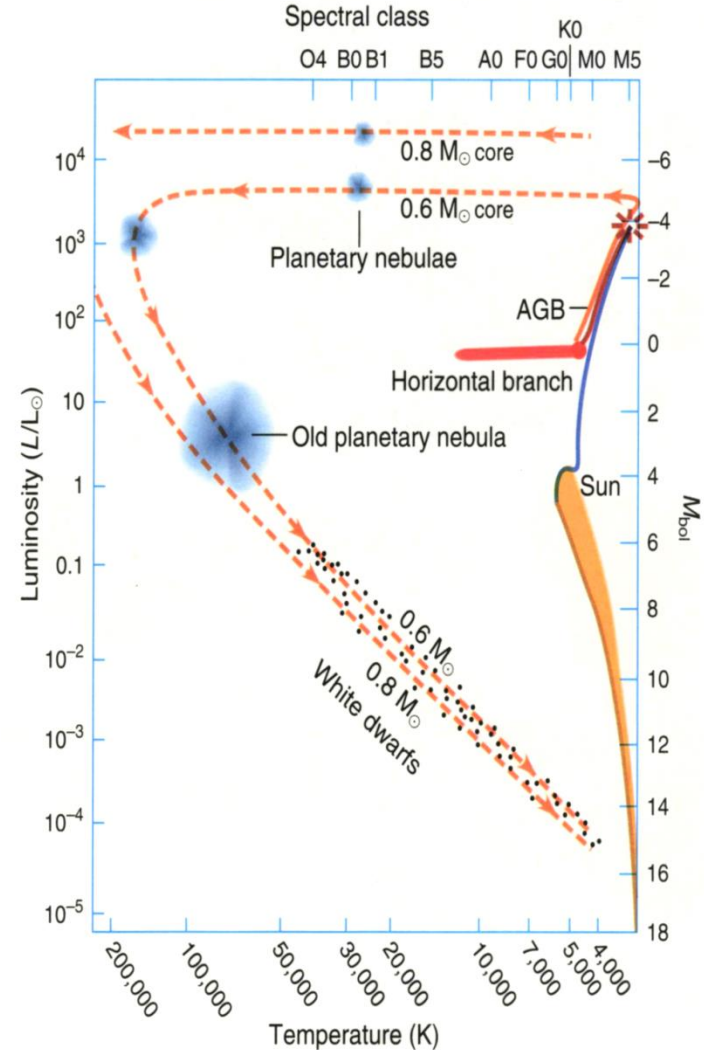
Zaburzenia przenoszą się do otoczki, gdzie ich amplituda zwiększa się. Skutkuje to cyklicznymi odrzuceniami zewnętrznych fragmentów otoczki. Gwiazda na tym etapie ewolucji zanurzona jest w chmurze materii, która stopniowo traci kontakt z macierzystą gwiazdą.

# Ewolucja gwiazd

- przebieg ścieżki ewolucyjnej po odrzuceniu mgławicy planetarnej

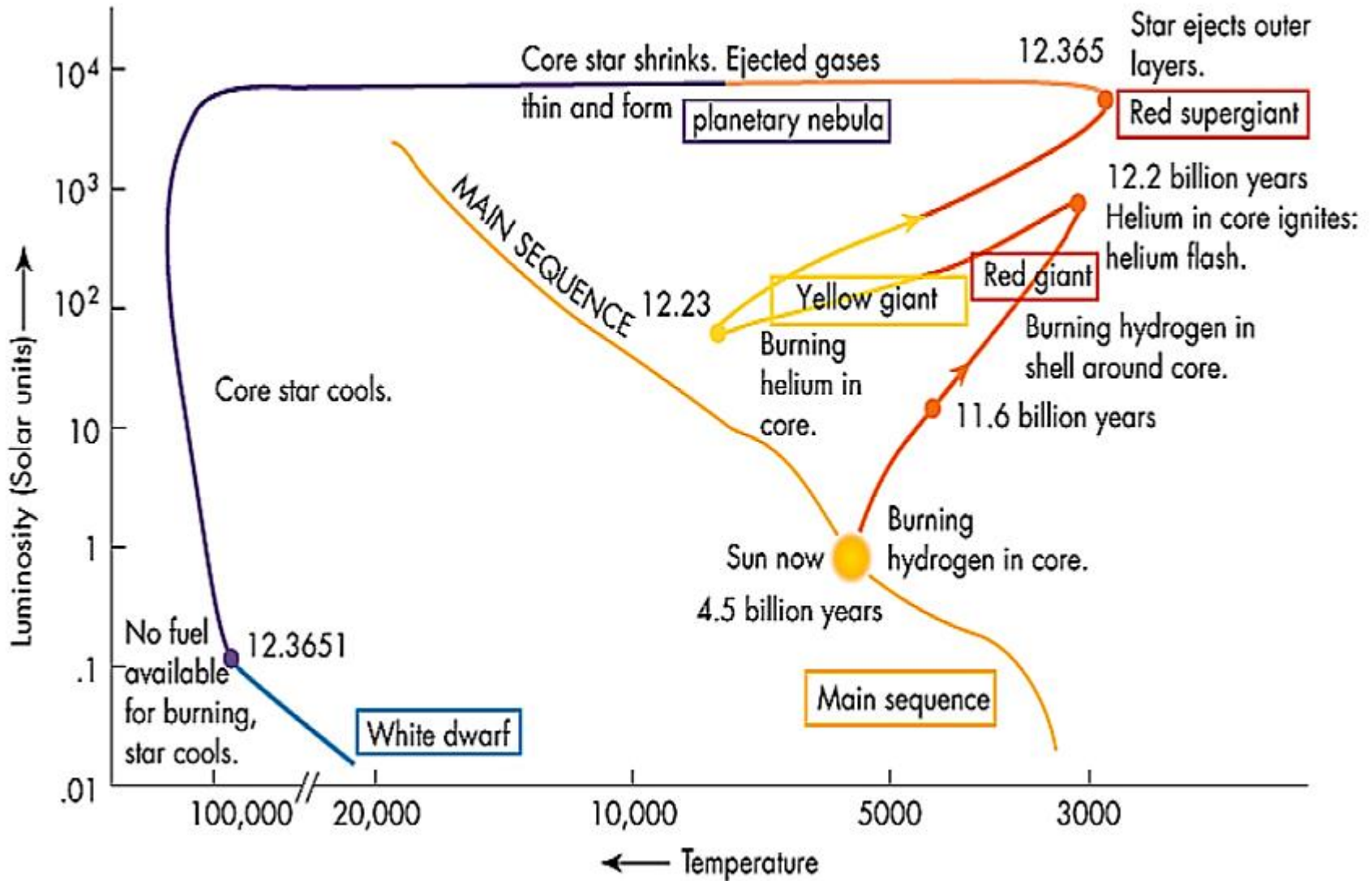


Evolutionary track	Mass ( $M_{\odot}$ )		
	Giant star	Ejected nebula	White dwarf
A	3.0	1.8	1.2
B	1.5	0.7	0.8
C	0.8	0.2	0.6



# Ewolucja gwiazd

- ścieżka ewolucyjna gwiazdy typu słonecznego

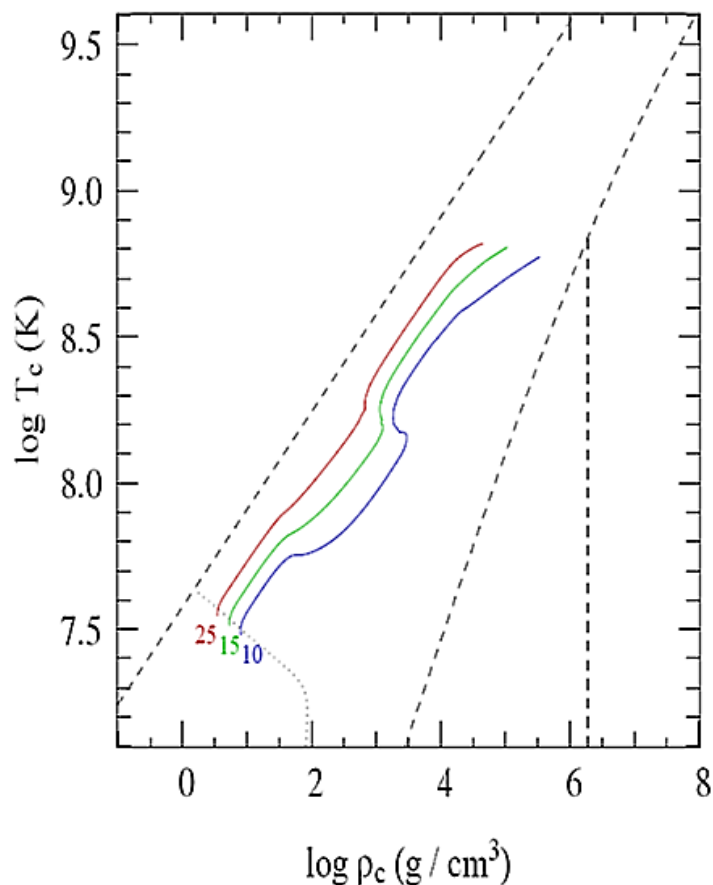
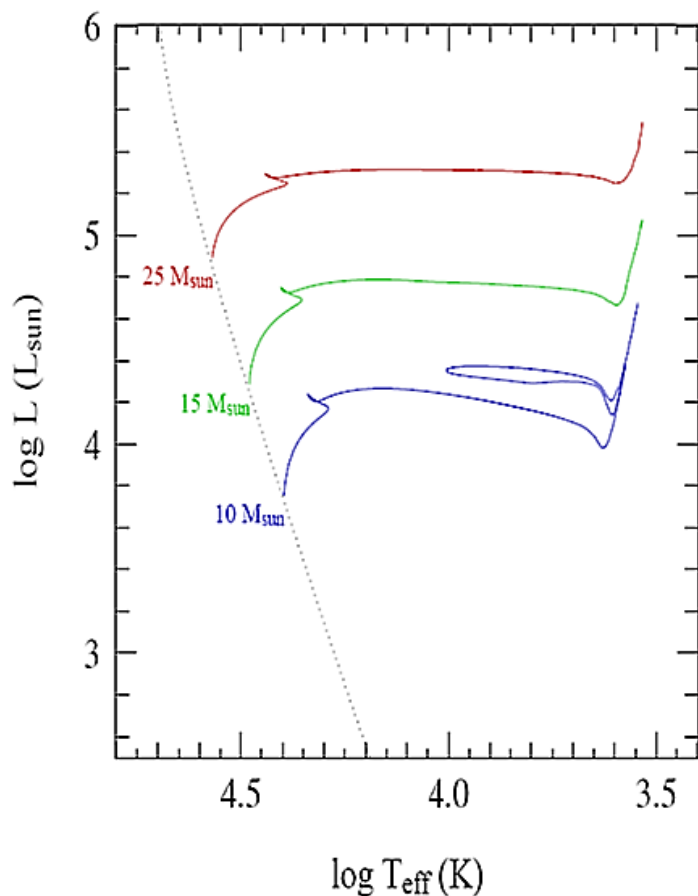


[ => ang. billion = 1 000 000 000 ]

# Ewolucja gwiazd masywnych ( $> 10 M_{\odot}$ )

Trzy ścieżki ewolucyjne gwiazd o masach początkowych 10, 15 i 25  $M_{\odot}$ . Jądra gwiazd nie ulegają degeneracji, co pozwala gwiazdom na wytwarzanie odpowiednio wysokiej temperatury umożliwiającej syntezowanie kolejnych pierwiastków.

Przejście na nowe paliwo nie stwarza problemów o związanych z błyskiem helowym.



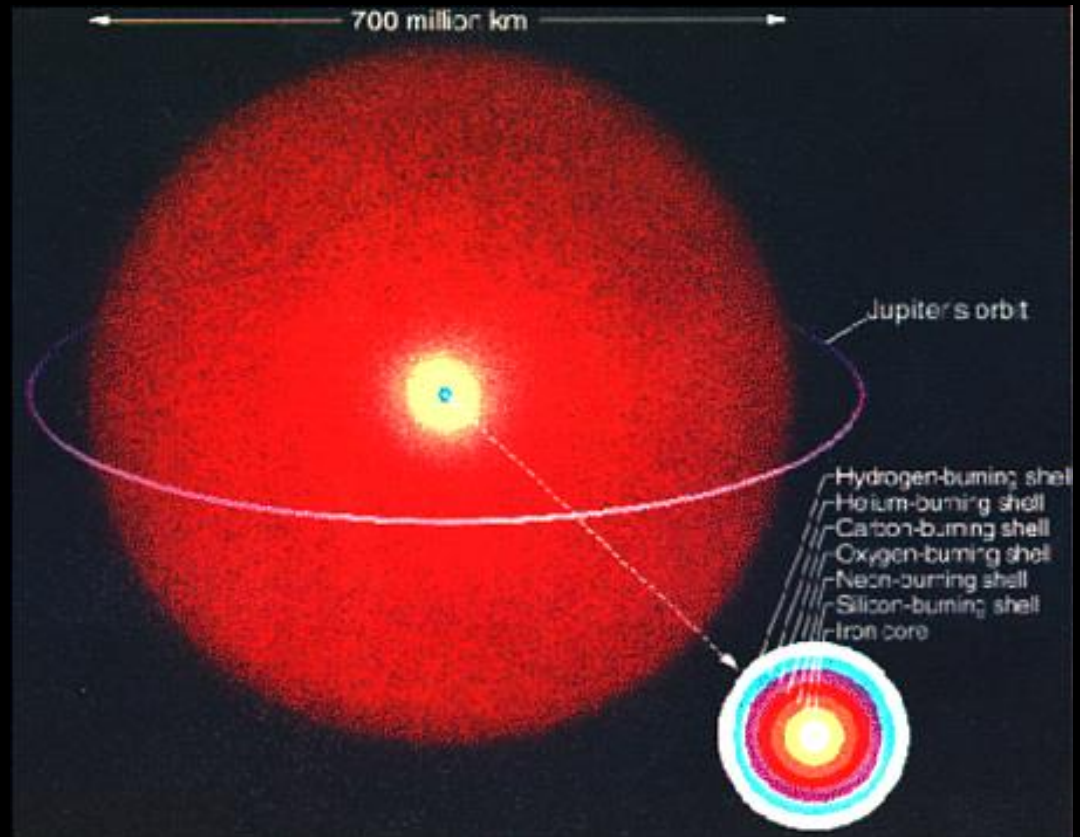
# Gwiazda o masie $22 M_{\odot}$

Schematyczny wygląd gwiazdy o masie początkowej  $22 M_{\odot}$  w chwili, gdy w jej centralnej części zaczyna się odkładać żelazo. Jądro wykazuje wtedy charakterystyczną strukturę cebulową, w której wyróżniamy szereg koncentrycznych powłok różniących się rodzajem zachodzących w nich reakcji termojądrowych: im bliżej centrum, tym syntezowane są cięższe pierwiastki. Całość zanurzona jest w rozległej, stosunkowo chłodnej otoczce wodorowej, dzięki której gwiazda uzyskała miano czerwonego nadolbrzyna.

Gwiazda, która osiągnęła to stadium ewolucji, nie może czerpać energii z syntezy pierwiastków cięższych niż żelazo. Ponadto, reakcje zachodzące w przylegających powłokach powodują wzrost żelazowego centrum.

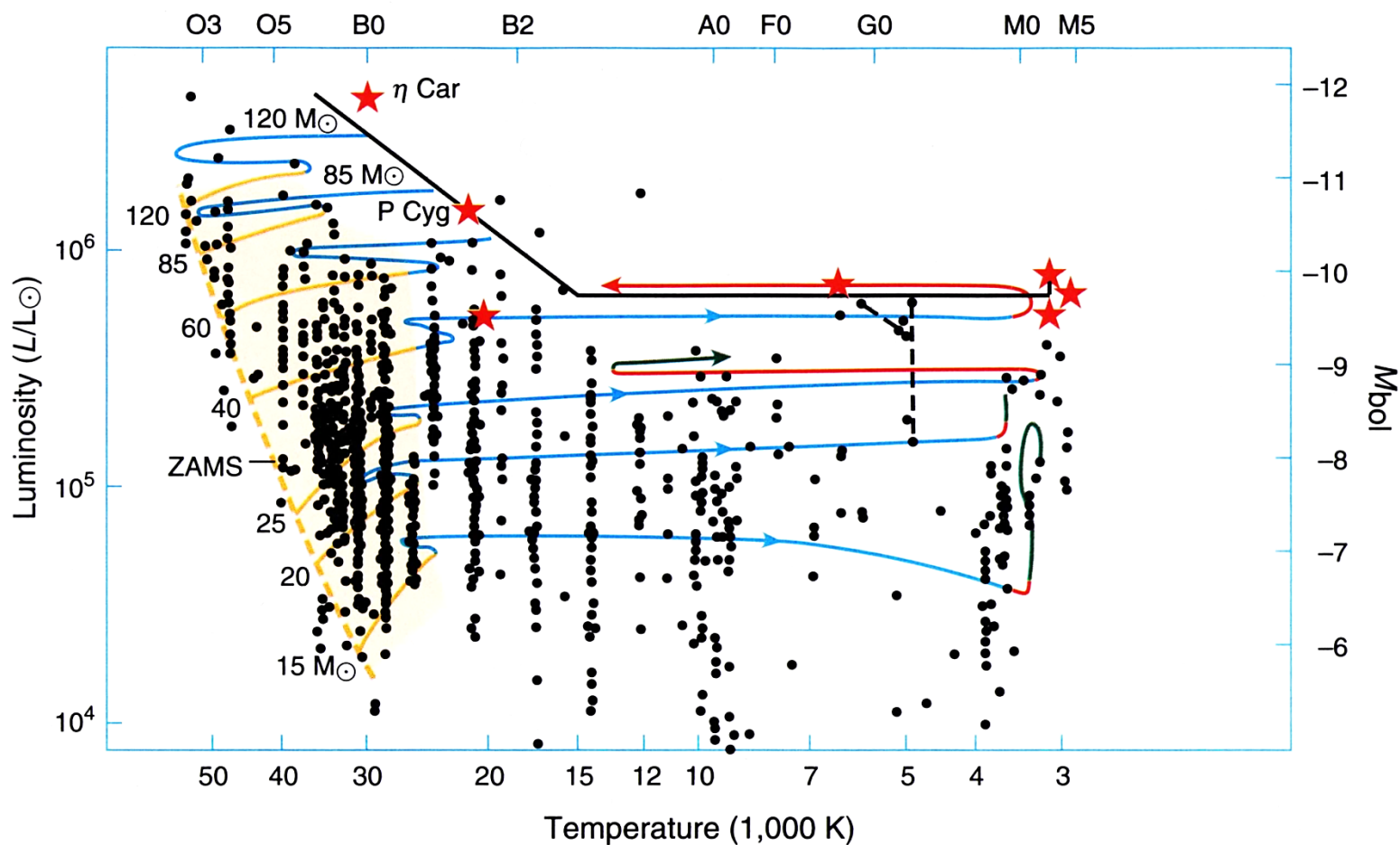
Ponadto, neutrina zaczynają unosić coraz więcej energii z jądra.

Załamaniem się równowagi hydrostatycznej jest już tylko kwestią czasu.



# Ewolucja gwiazd masywnych ( $> 15 M_{\odot}$ )

Ścieżki ewolucyjne gwiazd od  $15 M_{\odot}$  do  $120 M_{\odot}$  na diagramie H-R. Prawa, górna część diagramu jest niemal zupełnie pozbawiona gwiazd - jest to skutek bardzo intensywnego wiatru gwiazdowego, który powoduje, że jeszcze na Ciągu Głównym taka gwiazda traci duży procent swojej masy początkowej.



# Najbardziej typowe schematy przebiegu ewolucji, które kończą się kolapsem grawitacyjnym i wybuchem supernowej.

$M \lesssim 15 M_{\odot}$	MS (OB) $\rightarrow$ RSG ( $\rightarrow$ BSG in blue loop? $\rightarrow$ RSG) $\rightarrow$ SN II mass loss is relatively unimportant, $\lesssim$ few $M_{\odot}$ is lost during entire evolution
$15 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 25 M_{\odot}$	MS (O) $\rightarrow$ BSG $\rightarrow$ RSG $\rightarrow$ SN II mass loss is strong during the RSG phase, but not strong enough to remove the whole H-rich envelope
$25 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 40 M_{\odot}$	MS (O) $\rightarrow$ BSG $\rightarrow$ RSG $\rightarrow$ WNL $\rightarrow$ WNE $\rightarrow$ WC $\rightarrow$ SN Ib the H-rich envelope is removed during the RSG stage, turning the star into a WR star
$M \gtrsim 40 M_{\odot}$	MS (O) $\rightarrow$ BSG $\rightarrow$ LBV $\rightarrow$ WNL $\rightarrow$ WNE $\rightarrow$ WC $\rightarrow$ SN Ib/c an LBV phase blows off the envelope before the RSG can be reached

MS - ciąg główny; RSG - czerwony nadolbrzym; BSG - niebieski nadolbrzym; SN - supernowa;  
WNL, WNE, WC, WO - gwiazdy Wolfa-Rayeta; LBV - jasne, błękitne gwiazdy zmienne

Gwiazdy Wolfa-Rayeta są najbardziej typowymi przedstawicielkami wyewoluowanych, bardzo masywnych gwiazd. W ich widmach trudno jest wykryć wodór, bo cała zewnętrzna otoczka została przez gwiazdę „rozdmuchana” i obserwuje się świecenie warstwy o przeobrażonym (w wyniku reakcji termojądrowych) składzie chemicznym.

# Procesy bezpośrednio poprzedzające wybuch supernowej

Warunki panujące w jądrze żelazowym:  $T \sim 5.4 \cdot 10^9$  K,  $\rho \sim 3 \cdot 10^9$  g cm<sup>-3</sup> (materia zdegenerowana, bo dużą część energii odprowadzają neutrino). Pojawiają się reakcje, które destabilizują równowagę hydrostatyczną:

- fotodezintegracja jąder żelaza:  $^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13 \text{ } ^4\text{He} + 4n - 2 \text{ MeV}$

- fotodezintegracja jąder helu  $^4\text{He} + \gamma \rightarrow 2p + 2n - 7 \text{ MeV}$

- wychwytywanie elektronu (odwrotna przemiana beta):  $p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$

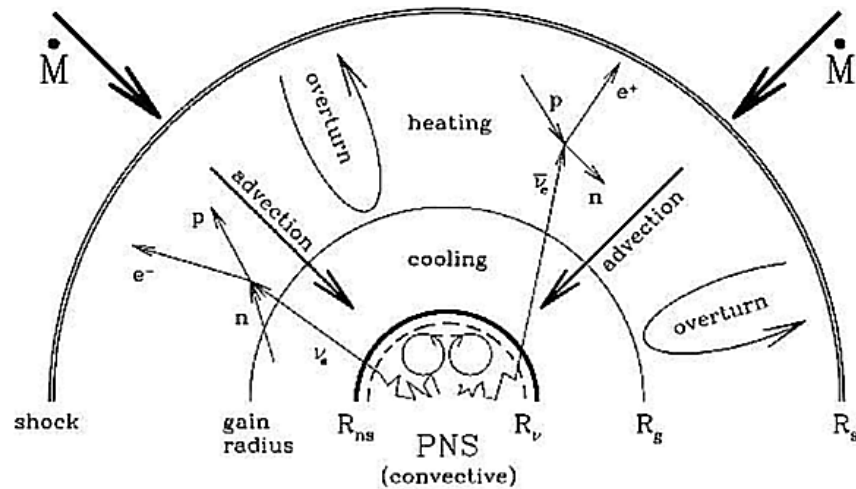
Kolaps grawitacyjny jądra żelazowego: spadek swobodny z prędkością  $0.25c$  trwający dziesiątki milisekund.

Kolaps ulega zatrzymaniu przez ciśnienie zdegenerowanych neutronów, gdy jądro ma rozmiary 10-100 km,  $T \sim 2 \cdot 10^{10}$  K,  $\rho \sim 10^{14}$  g cm<sup>-3</sup>. Powstaje zaczątek gwiazdy neutronowej.

Energia grawitacyjna wydzielona w wyniku kolapsu jądra:  $E_g > 3 \cdot 10^{46}$  J (mały ułamek tej energii wystarczy by implozję zamienić w eksplozję, ale:  $\sim 10\% E_g$  pochłania dezintegracja jąder żelaza, a niemal całą pozostałą energię zabierają neutrino (z tym, że dla  $\rho > 10^{12}$  g cm<sup>-3</sup> materia przestaje być przezroczysta dla neutrin i za odprowadzenie energii odpowiada konwekcja).

# Formowanie się gwiazdy neutronowej lub czarnej dziury

Formująca się gwiazda neutronowa relaksuje do większej objętości (tzw. odbicie jądra), ale ekspansję powstrzymuje napływ materii z otoczki: w pewnej odległości od centrum gwiazdy formuje się fala stojąca - miejsce dynamicznej równowagi pomiędzy eksplozją i implozją.



Janka 2007

Decydująca dla kierunku dalszej propagacji fali stojącej jest efektywność konwekcji w rejonie centrum gwiazdy:

- jeśli umożliwia ona neutronom zasilanie ekspansji, otoczka ulega odrzuceniu z prędkością  $\sim 10^4$  km/s i formuje się gwiazda neutronowa,
- jeśli energia pozostaje zamknięta w centralnej części gwiazdy, napływająca materia powoduje wzrost masy jądra neutronowego:  $M_c > 3 M_\odot$ , ciśnienie zdegenerowanych neutronów przestaje powstrzymać kolaps grawitacyjny i formuje się czarna dziura.

# Supernowe

Jasność supernowych w maksimum blasku staje się porównywalna z jasnością całych galaktyk, pomimo tego, że ~90% (lub więcej) energii kolapsu grawitacyjnego unoszą neutrino, a ~9% jest wydatkowane na odrzucenie zewnętrznych warstw gwiazdy.

Szacuje się, że w galaktyce o liczebności gwiazd porównywalną z naszą Galaktyką, jeden wybuch supernowej powinien następować co kilkadziesiąt lat. Jednak brak zgodności z obserwacjami tłumaczy się dużą absorpcją promieniowania w płaszczyźnie Galaktyki, w której koncentruje się większość zjawisk tego typu.

Historyczne supernowe w naszej Galaktyce =>

Rok	Pozostałość	Gwiazdozbiór
185	MSH 15-52 (?)	Centaur
393	CTB 37	Niedźwiadek
1006	PKS 1459-41	Wilk
1054	M1 (Krab)	Byk
1181	3C 58	Kasjopea
1572	3C 10 (Tycho)	Kasjopea
1604	3C 358 (Kepler)	Wężownik

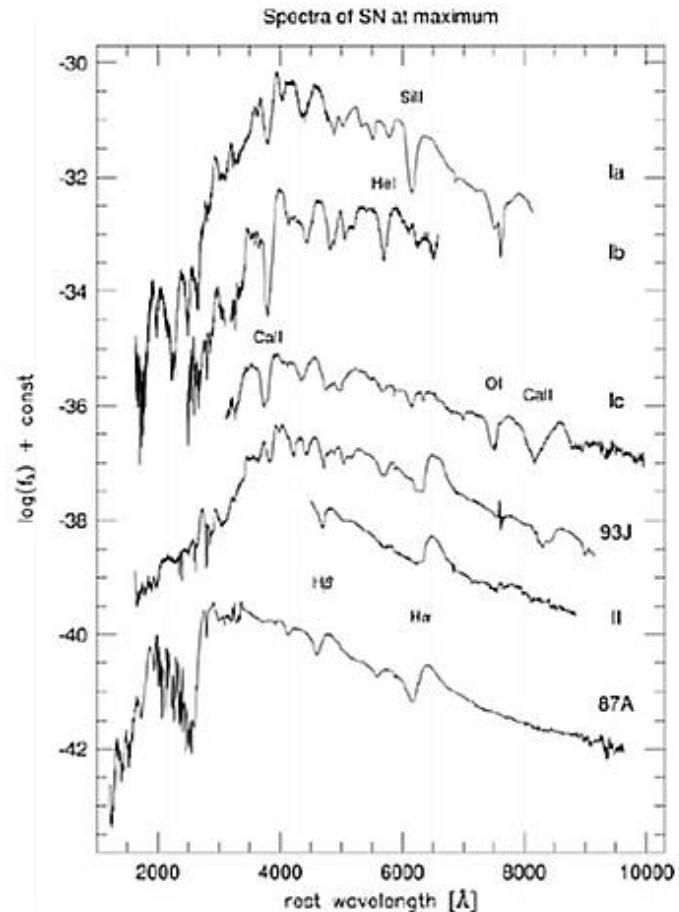
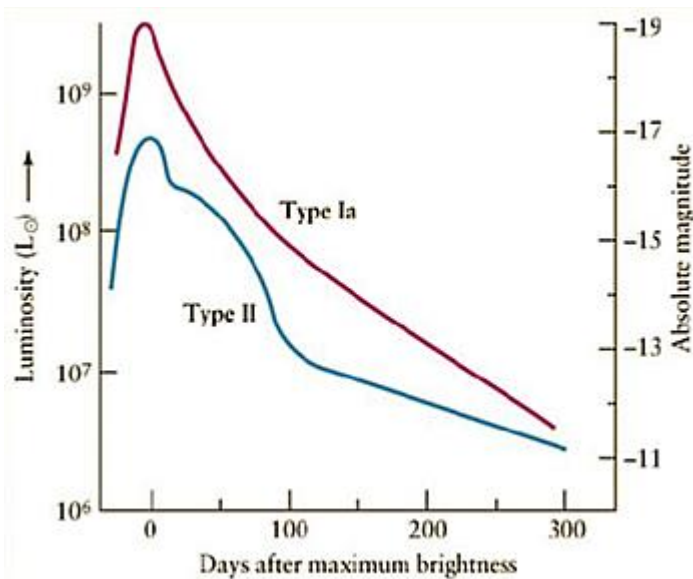
# Supernowe

Schemat klasyfikacyjny supernowych opracowany na podstawie ich widm w zakresie promieniowania widzialnego, wyróżnia następujące główne typy: Ia, Ib, Ic i II.

Jedynie typ Ia nie jest związany z kolapsem grawitacyjnym masywnej gwiazdy.

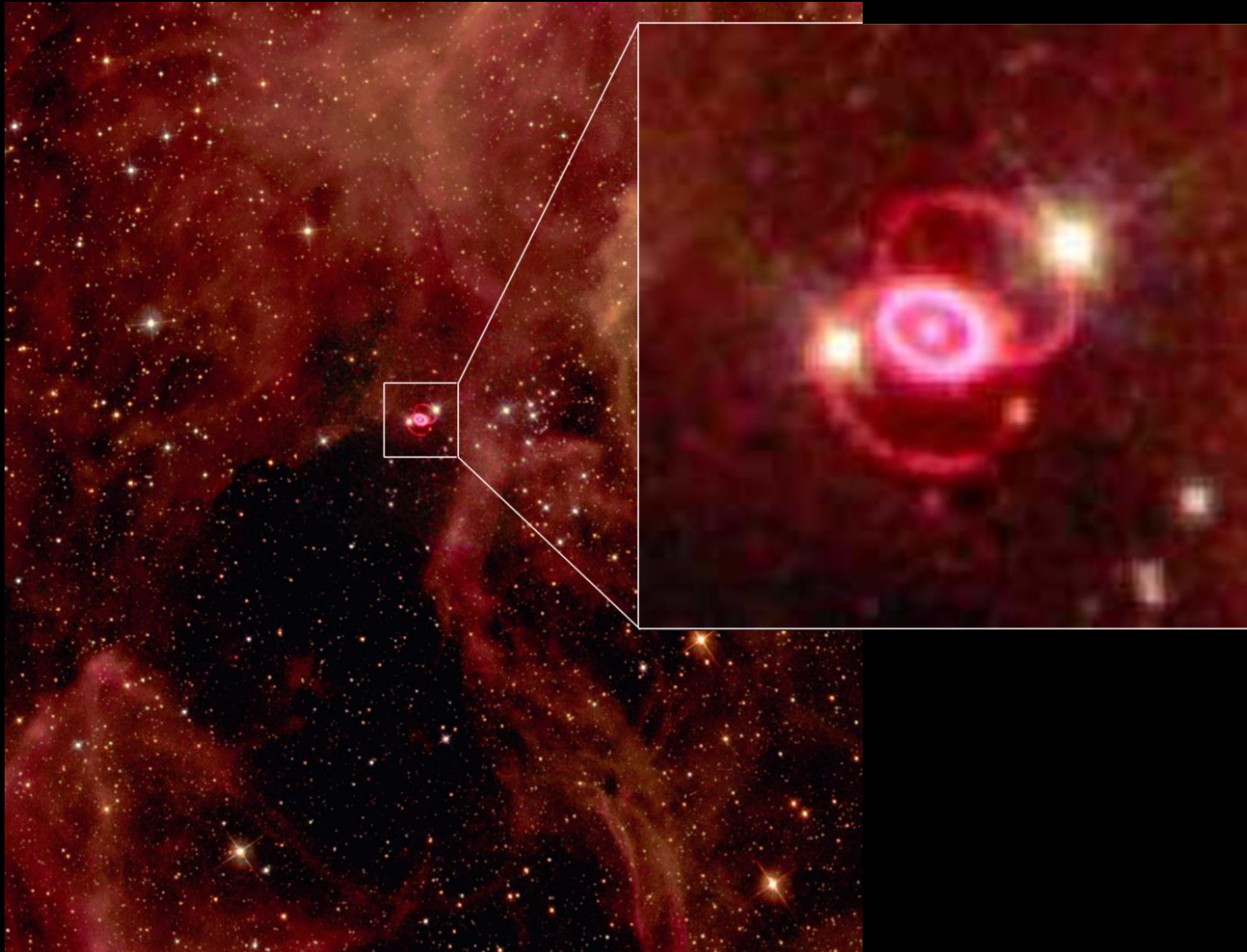
Typy Ib i Ic łączymy z gwiazdami Wolfa-Rayeta, a typ II z czerwonymi nadolbrzymami.

Hydrogen present? No: Type I  
Silicon? Yes: Ia  
No: Helium? Yes: Ib  
No: Ic  
Yes: Type II (II-L, II-P, IIn, Peculiar)



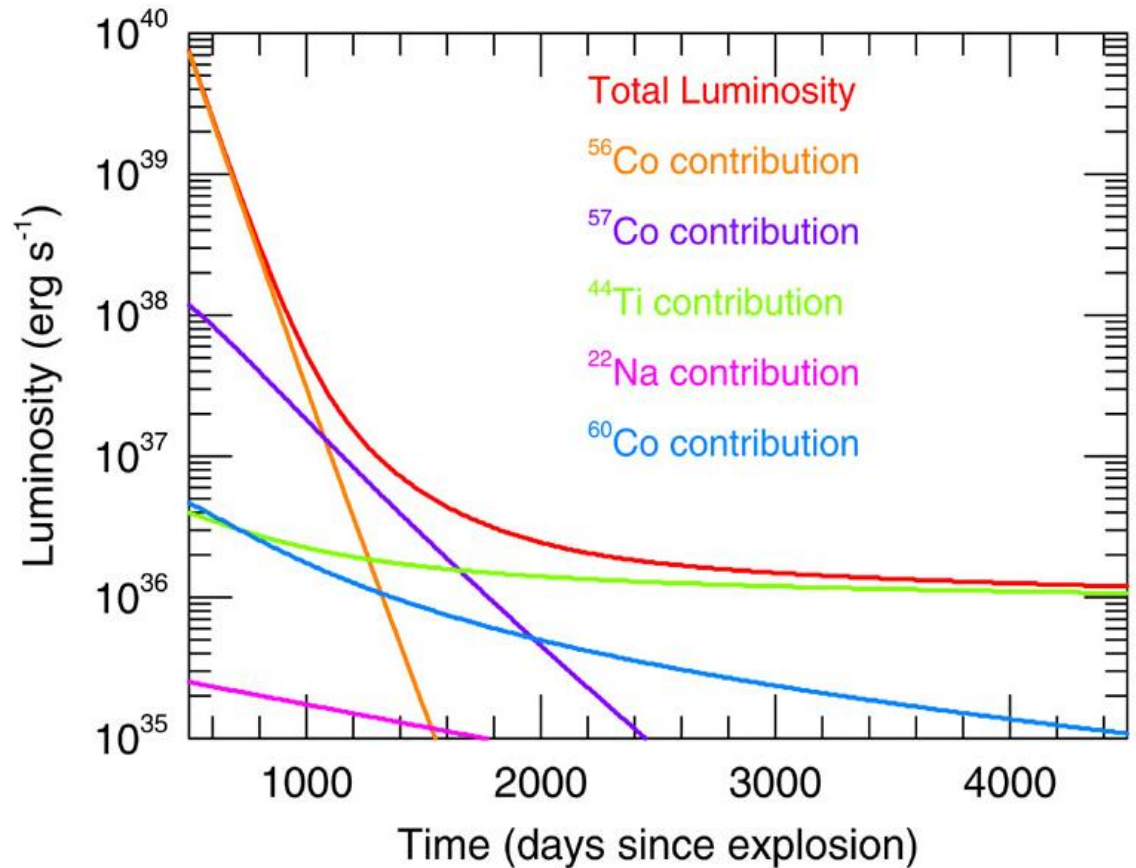
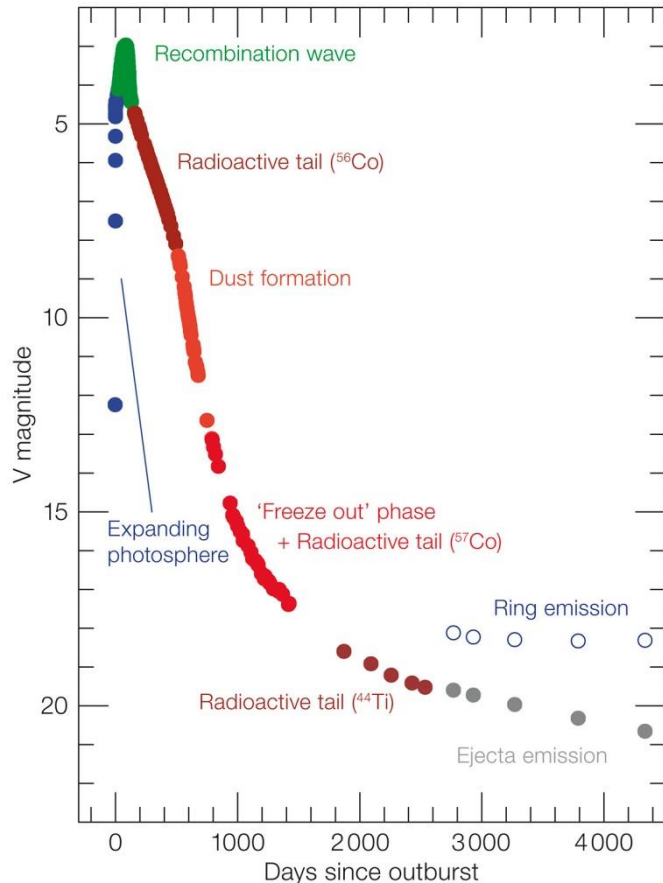
# Supernowa SN 1987A

Jak na razie jedyną supernową, która w czasach współczesnych wybuchła w stosunkowo niedużej odległości, jest supernowa SN 1987A (23/24 II 1987, typ II,  $D \sim 50$  kpc), która została zaobserwowana w Wielkim Obłoku Magellana.



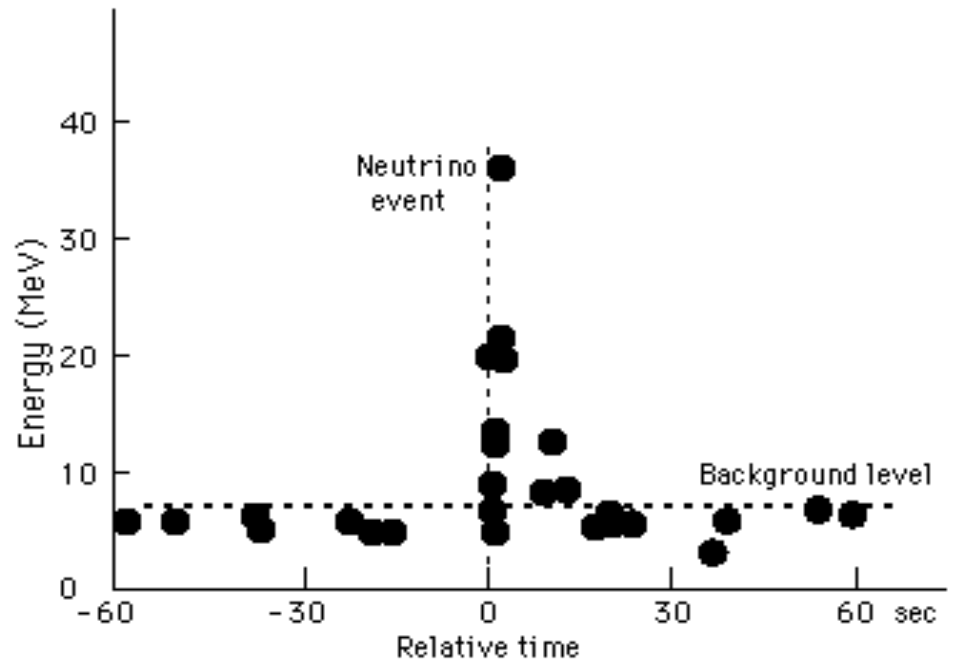
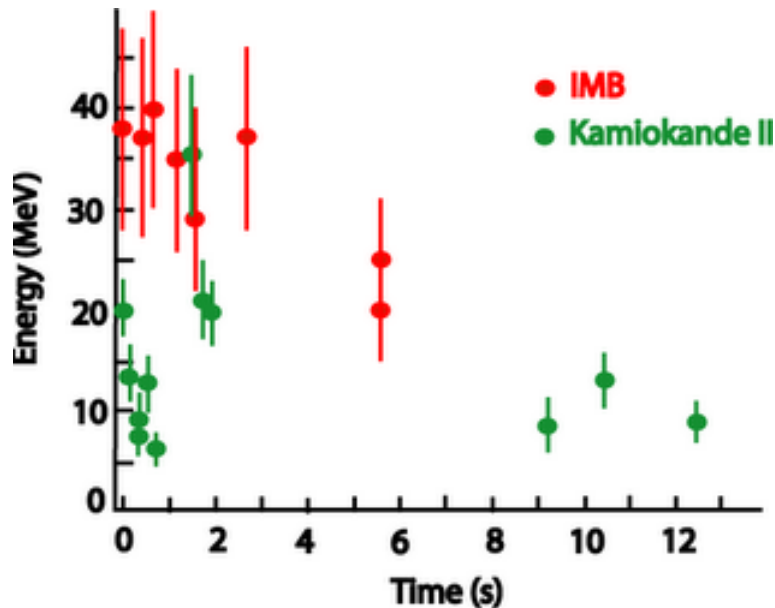
# Supernowa SN 1987A

Krzywa blasku supernowej prezentuje (z lewej na dole). Na podstawie tempa spadku jasności możliwe było nawet zidentyfikowanie niektórych izotopów promieniotwórczych wytworzonych w trakcie wybuchu (z prawej na dole).



# Supernowa SN 1987A

Przebieg błysku neutrinowego, który poprzedził pierwsze symptomy wzrostu jasności gwiazdy. Traktujemy to jako dowód, że w jądrze zainicjowane zostały na dużą skalę reakcje wychwyty elektronów przez protony, co doprowadziło do utraty równowagi hydrostatycznej i kolapsu grawitacyjnego.



## Etap III

# Gwiazda świeci na koszt energii wewnętrznej

Gwiazda może zakończyć swoją ewolucję jako jeden z trzech rodzajów obiektów: biały karzeł, gwiazda neutronowa lub czarna dziura. Wybór jest w dużym stopniu zdeterminowany przez początkową wartość masy.

- Białe karły - gwiazdy, w których grawitacyjne kurczenie się zostało zatrzymane przez ciśnienie zdegenerowanych elektronów. Takimi obiektami stają się gwiazdy o początkowej masie mniejszej niż 8 (10) mas Słońca. W dalekiej przyszłości biały karzeł może zostać czarnym karłem (po „wychłodzeniu”).

- Gwiazdy neutronowe - gwiazdy, w których grawitacyjne kurczenie się zostało zatrzymane przez ciśnienie zdegenerowanych neutronów. Taki scenariusz przewidziany jest dla obiektów o początkowej masie z przedziału między 8-10 a 25-40 mas Słońca.

- Czarne dziury - obiekty, w których grawitacja doprowadziła do skupienia całej masy w jednym punkcie, zwanym centralną osobliwością. Taki jest kres ewolucji gwiazd o największej masie początkowej przekraczającej 25-40 mas Słońca. Według teorii Hawkinga czarne dziury mogą w bardzo długim zakresie czasu „wyparować”.

*[Czarna dziura o masie 10 mas Słońca powinna wyparować w ciągu  $10^{70}$  -  $10^{71}$  lat, przy czym obecny wiek Wszechświata to  $1.38 \cdot 10^{10}$  lat].*

# Biały karzeł - Syriusz B

## Syriusz B:

$$m = 8 m_{\odot}$$

$$D = 2.64 \text{ pc} \rightarrow L = 0.026 L_{\odot}$$

typ widmowy: A0

$$T_{\text{eff}} = 25\,200 \text{ K}$$

$$\rho = 2.5 \cdot 10^6 \text{ g cm}^{-3}$$

$$\log g = 8.57 \rightarrow 3\,700 \text{ km s}^{-2}$$

$$R \approx 5\,800 \text{ km}$$

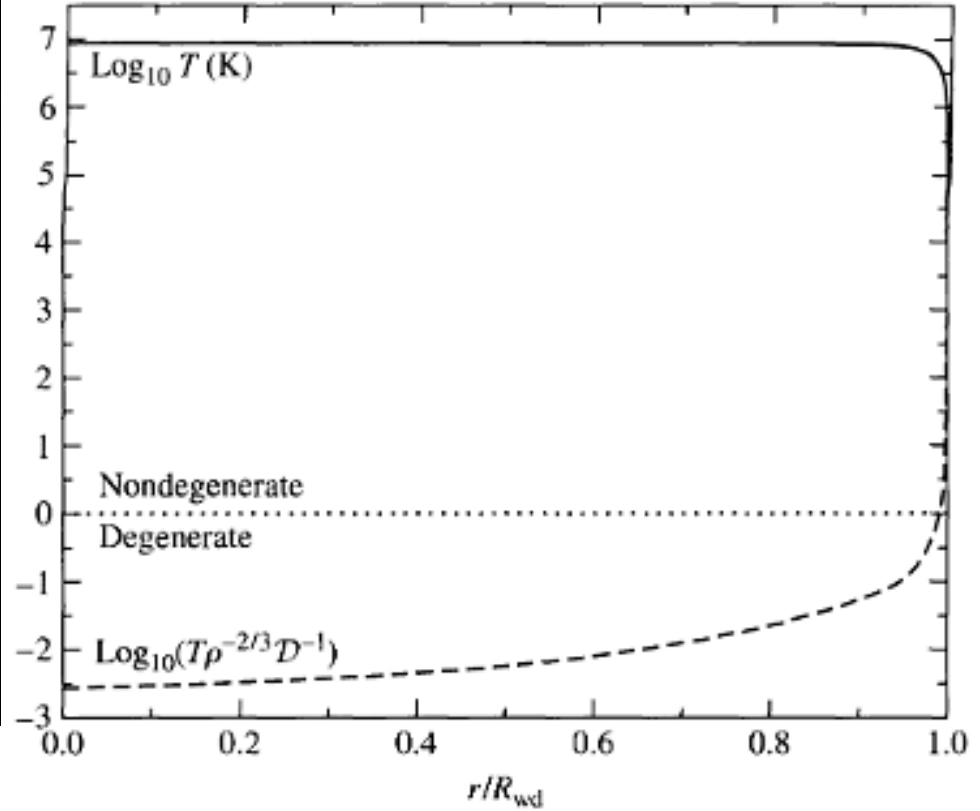
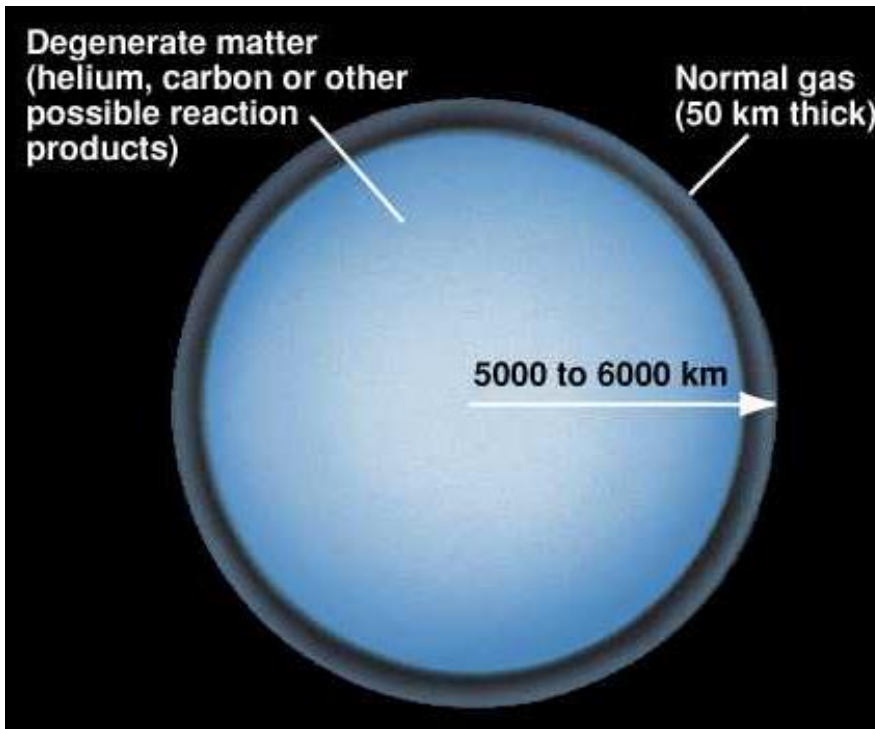
$$M \approx 1 M_{\odot}$$

Ziemia



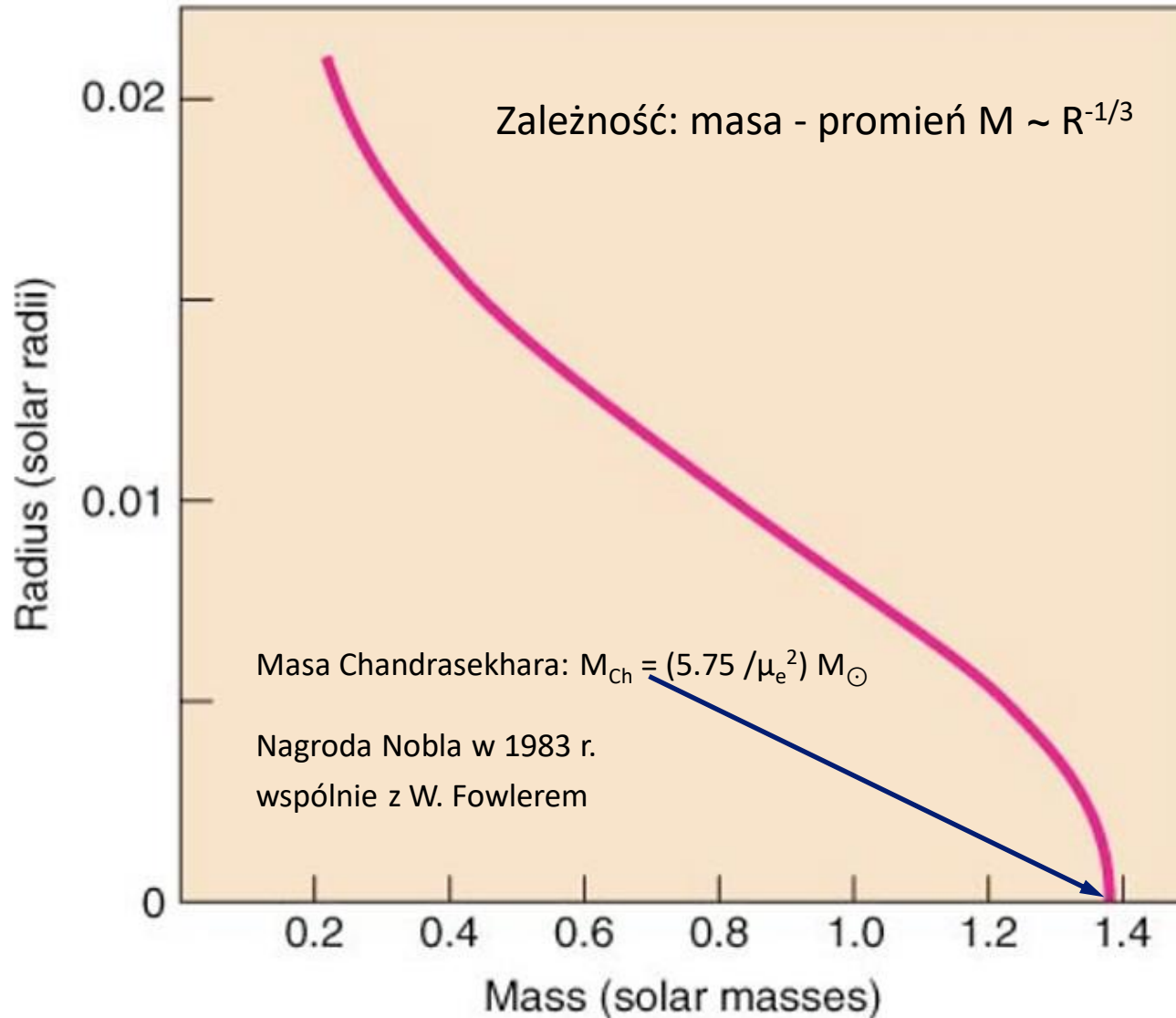
# Biały karzeł

W 1931 r. Subrahmanyan Chandrasekhar przedstawił model budowy wewnętrznej białych karłów - pokazał, że spełniają one zależność masa-promień i wyznaczył górną granicę ich masy, zwaną obecnie masą Chandrasekhara.



# Biały karzeł

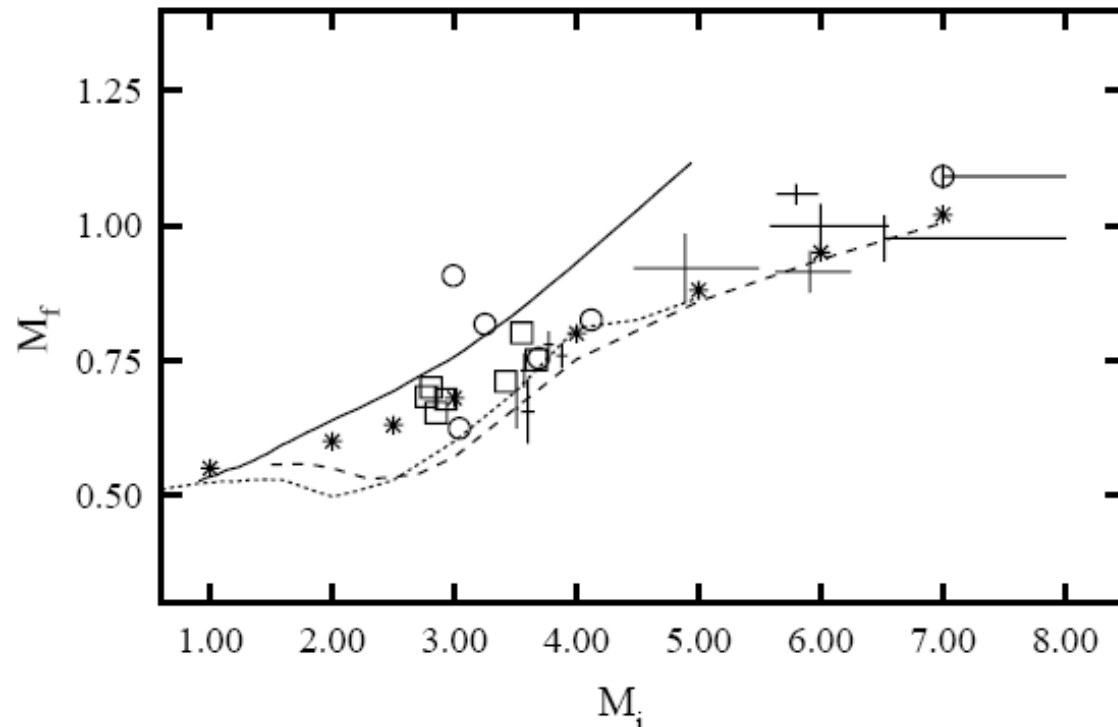
Im większą masę ma biały karzeł, tym mniejszy jest jego promień.



# Biały karzeł

Jeżeli we wzorze na masę Chandrasekhara wstawić wartość średniego ciężaru cząsteczkowego w przeliczeniu na jeden elektron,  $\mu_e=2$ , to otrzymamy wynik  $1.44 M_{\odot}$ . W białych karłach o większej masie ciśnienie zdegenerowanych elektronów nie jest w stanie powstrzymać kolapsu grawitacyjnego.

Relacja pomiędzy masą gwiazdy na Ciągu Głównym i masą powstałego z niej białego karła. Im gwiazda jest masywniejsza, tym większej części swojej masy pozbywa się na etapie odrzucenia mgławicy planetarnej.



# Gwiazda neutronowa

Istnienie gwiazd neutronowych, w odróżnieniu od białych karłów, najpierw zostało przewidziane na drodze teoretycznej, a dopiero odkrycie pulsarów udowodniło, że nie mamy do czynienia jedynie z wymysłem teoretyków.

Wciąż trwają intensywne prace nad opracowaniem modelu gwiazdy neutronowej, który możliwie najwierniej odtwarzałby dane obserwacyjne, ale także wykorzystywał powiększającą się wiedzę o egzotycznych stanach materii.

Nie wchodząc w szczegóły, można mówić o dwóch klasach modeli:

- minimalnych
- egzotycznych

Należy zauważyć, że w obydwóch przypadkach wyróżnia się skorupę, płaszcz i jądro, a głównym składnikiem gwiazdy jest zdegenerowana ciecz neutronowa wykazująca cechy nadciężkości.

Modele te pokazują jakie rozkłady gęstości umożliwiają „upchnięcie” masy porównywalnej z masą Słońca w kuli o promieniu kilkunastu kilometrów.

# Gwiazda neutronowa

Modele „minimalne”:

- równanie stanu uwzględnia jedynie nukleony (neutrony i protony) oraz leptony (elektrony i miony).

5 różnych modeli teoretycznych:

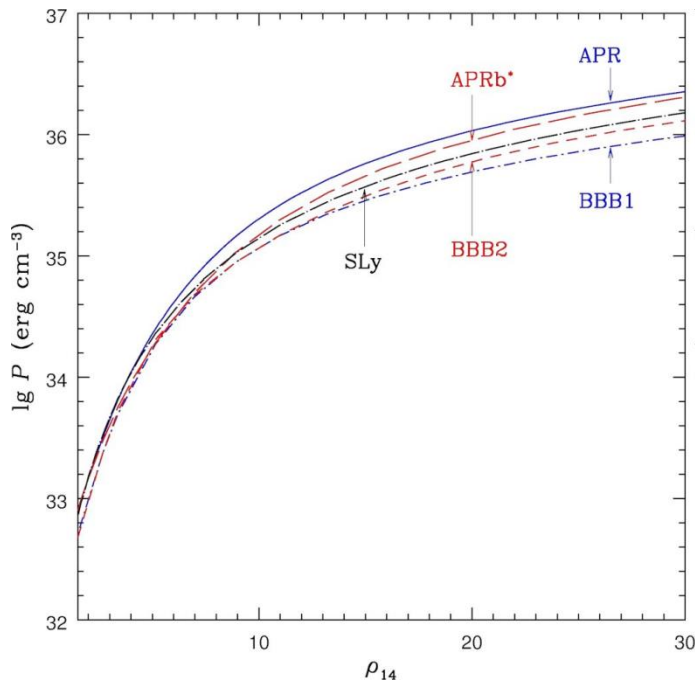
APR - Niebieska linia ciągła (najwyższe ciśnienie dla danej gęstości, tzw. "sztywne" równanie stanu).

APRb\* - Czerwona linia przerywana, przebiegająca tuż pod linią APR.

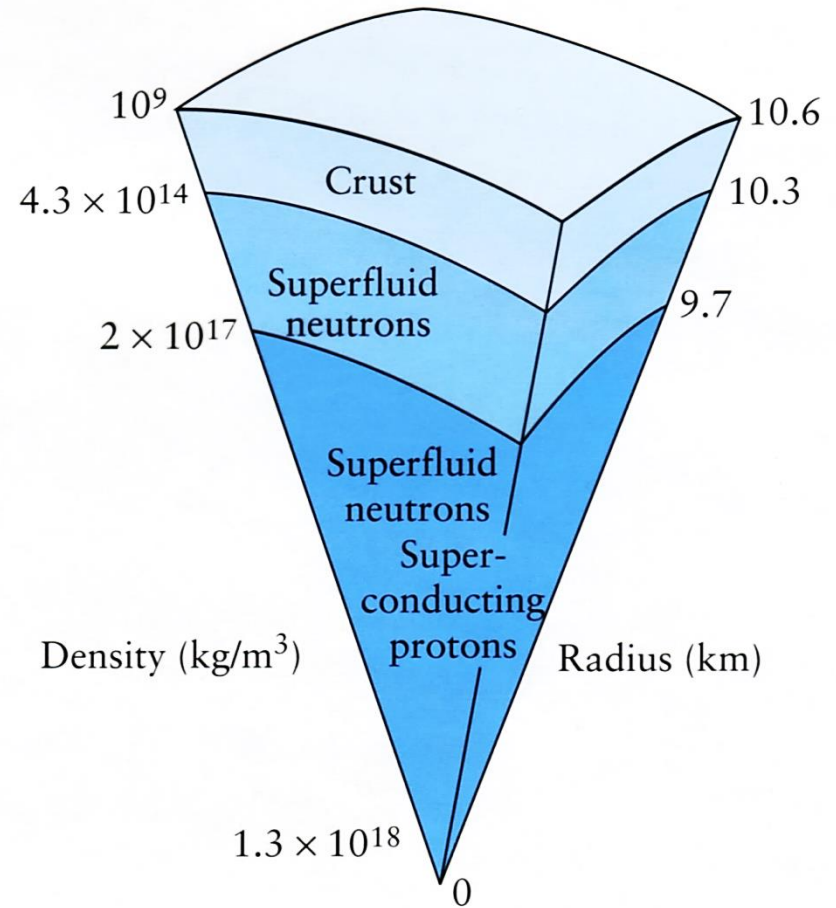
SLy - Czarna linia przerywana z dodatkowym punktem pomiarowym/znacznikiem.

BBB2 - Czerwona linia kropka-kreska.

BBB1 - Niebieska linia z dwoma kropkami i kreską (najniższe ciśnienie dla danej gęstości, tzw. "miękkie" równanie stanu).



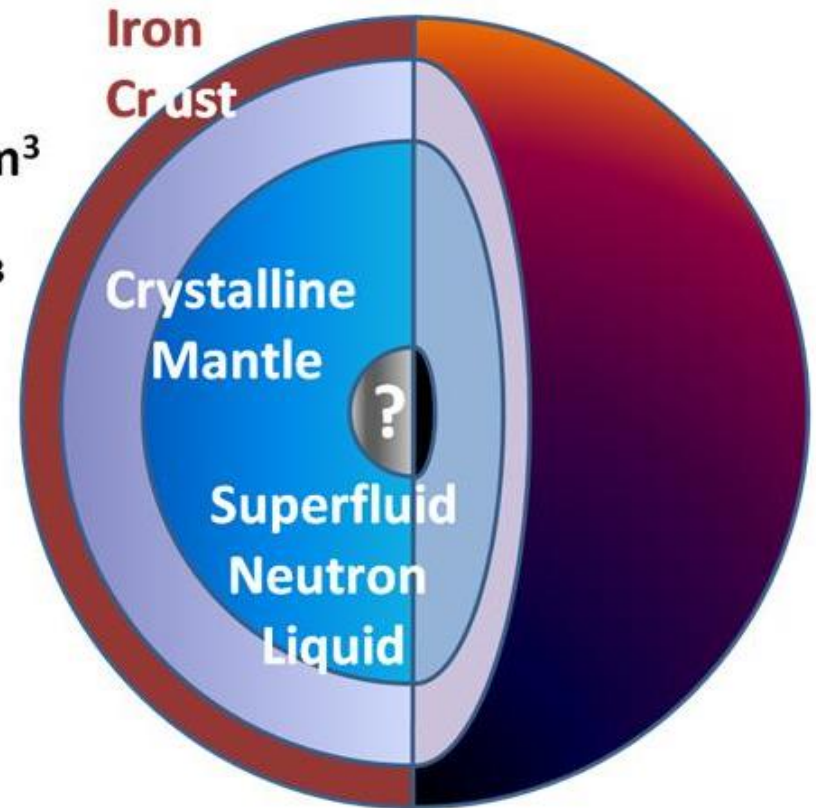
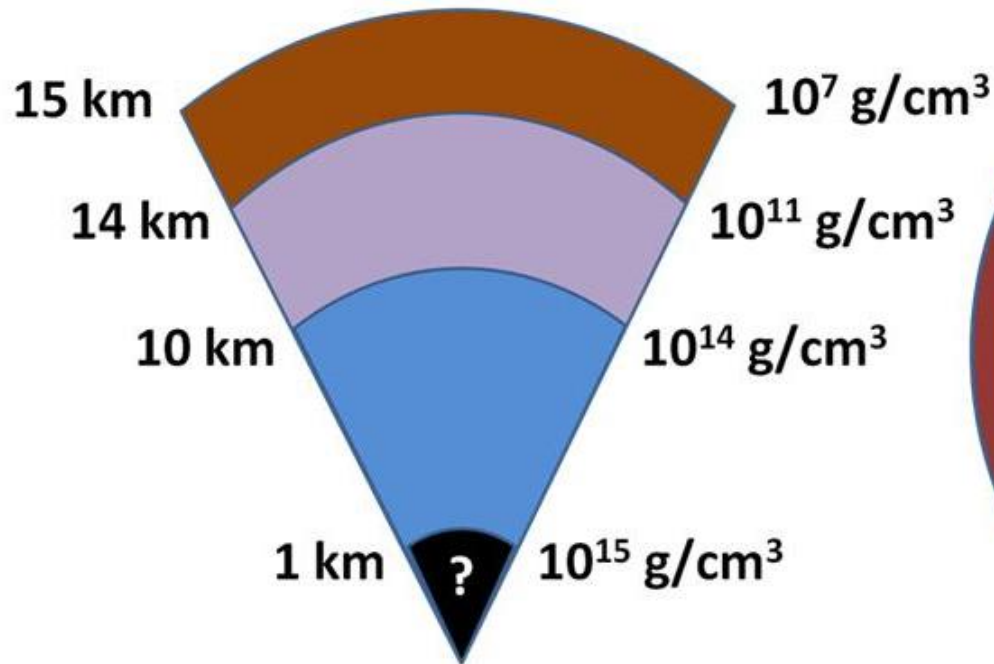
Haensel i in. (2006)



<http://crab0.astr.nthu.edu.tw>

# Gwiazda neutronowa

Modele „egzotyczne”: rdzeń hiperonowy, kondensat pionowy, kondensat kaonowy, plazma kwarkowa

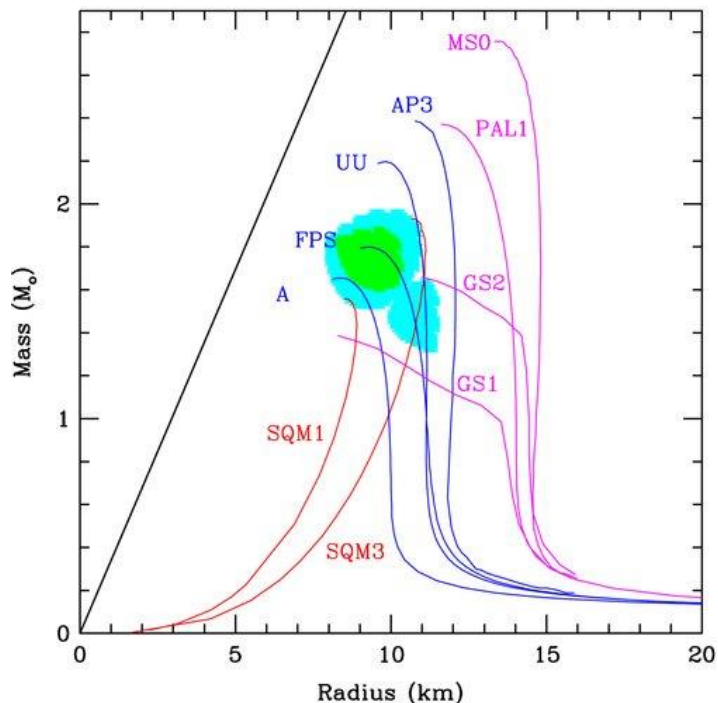


# Gwiazda neutronowa

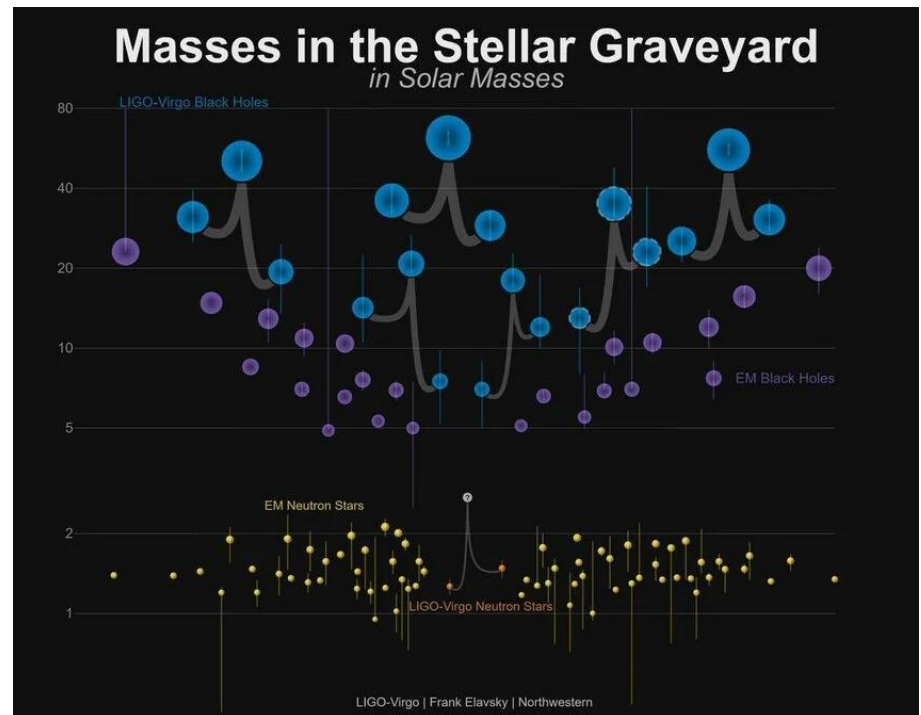
Podobnie jak białe karły, gwiazdy neutronowe wykazują zależność masa-promień, co oznacza istnienie maksymalnej masy, zwanej masą Tolmana-Oppenheimera-Volkoffa (TOV), po przekroczeniu której następuje kolaps do osobliwości.

Większość pomiarów lokuje gwiazdy neutronowe w zakresie 1-2 mas Słońca, ale pojedyncze obserwacje sugerują istnienie gwiazd neutronowych o masach dochodzących do 3 mas Słońca i dopiero odkrycie obiektu przekraczającego tę wartość traktuje się za dowód na istnienie czarnej dziury.

FPS, UU, AP3, MS0, etc. - reprezentują inne **równanie stanu**

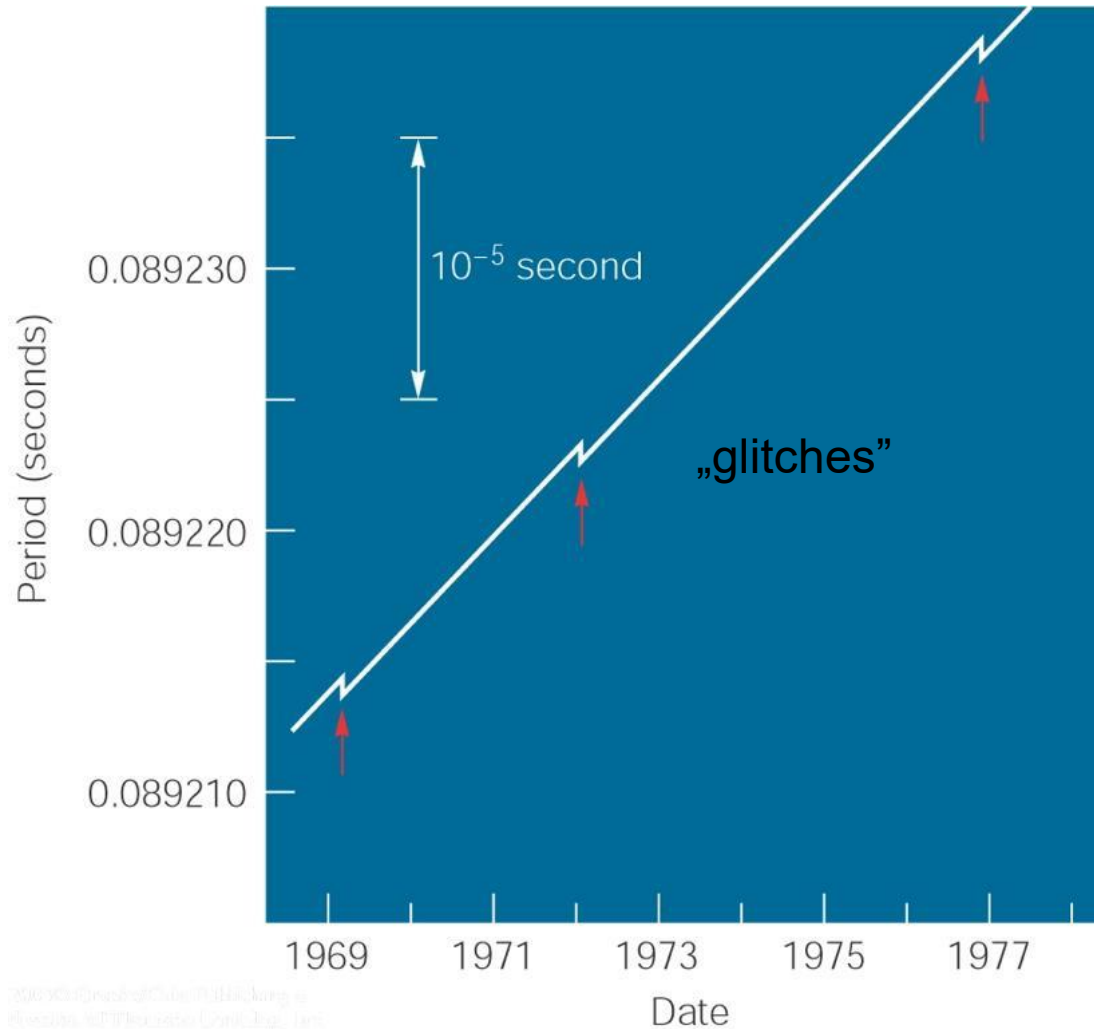


kolor niebieski - czarne dziury wykryte za pomocą fal grawitacyjnych przez LIGO-Virgo  
kolor fioletowy - czarne dziury z obserwacji prom. elektromagn.



# Gwiazda neutronowa

PSR B0833-45 (pulsar Vela)



$$dP/dt \sim 10^{-15}$$

$$\Delta P/P \sim 10^{-7} - 10^{-8}$$

obserwowane dla  
około 30 pulsarów,  
głównie bardzo  
młodych



# Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.*\*

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of  $1.0 \times 10^{-21}$ . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than  $5.1\sigma$ . The source lies at a luminosity distance of  $410_{-180}^{+160}$  Mpc corresponding to a redshift  $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$ . In the source frame, the initial black hole masses are  $36_{-4}^{+5} M_{\odot}$  and  $29_{-4}^{+4} M_{\odot}$ , and the final black hole mass is  $62_{-4}^{+4} M_{\odot}$ , with  $3.0_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot} c^2$  radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

Strona tytułowa artykułu o odkryciu pierwszego potwierdzonego przypadku bezpośredniej detekcji fal grawitacyjnych.

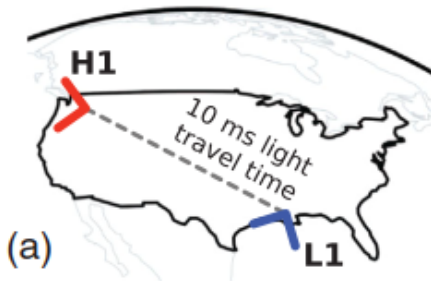
Pomiar został wykonany w ramach eksperymentu LIGO, w którym dzięki wieloletnim testom udało się zmierzyć względne zmiany w odległości aparatury pomiarowej, spowodowane przejściem fali grawitacyjnej, na poziomie  $10^{-21}$ , tj. 10000 x mniejszej niż średnica protonu.

# Fale grawitacyjne

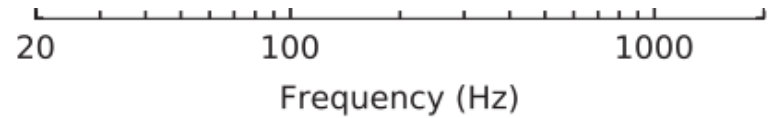
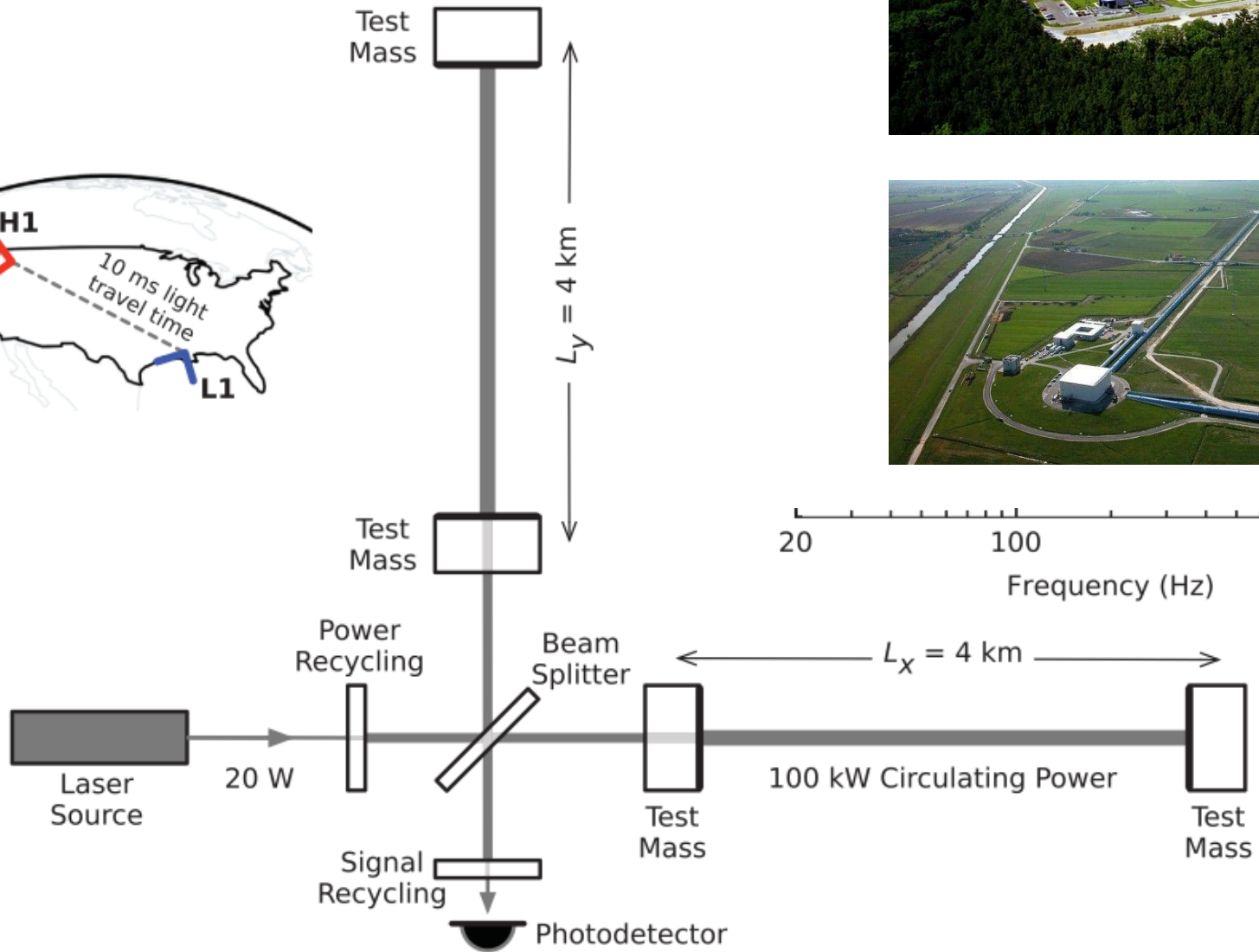
LIGO



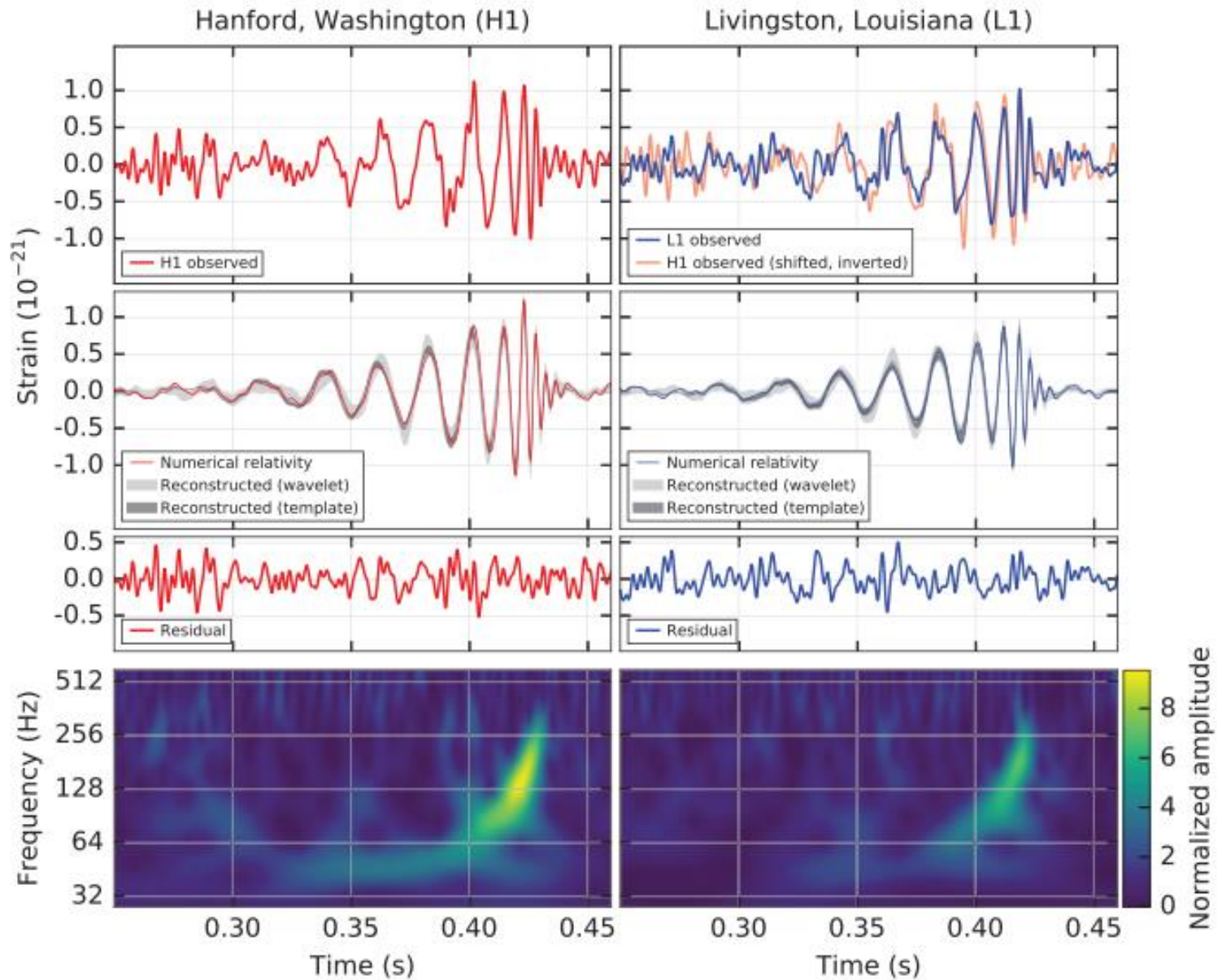
VIRGO



(a)



# Fale grawitacyjne



# Fale grawitacyjne

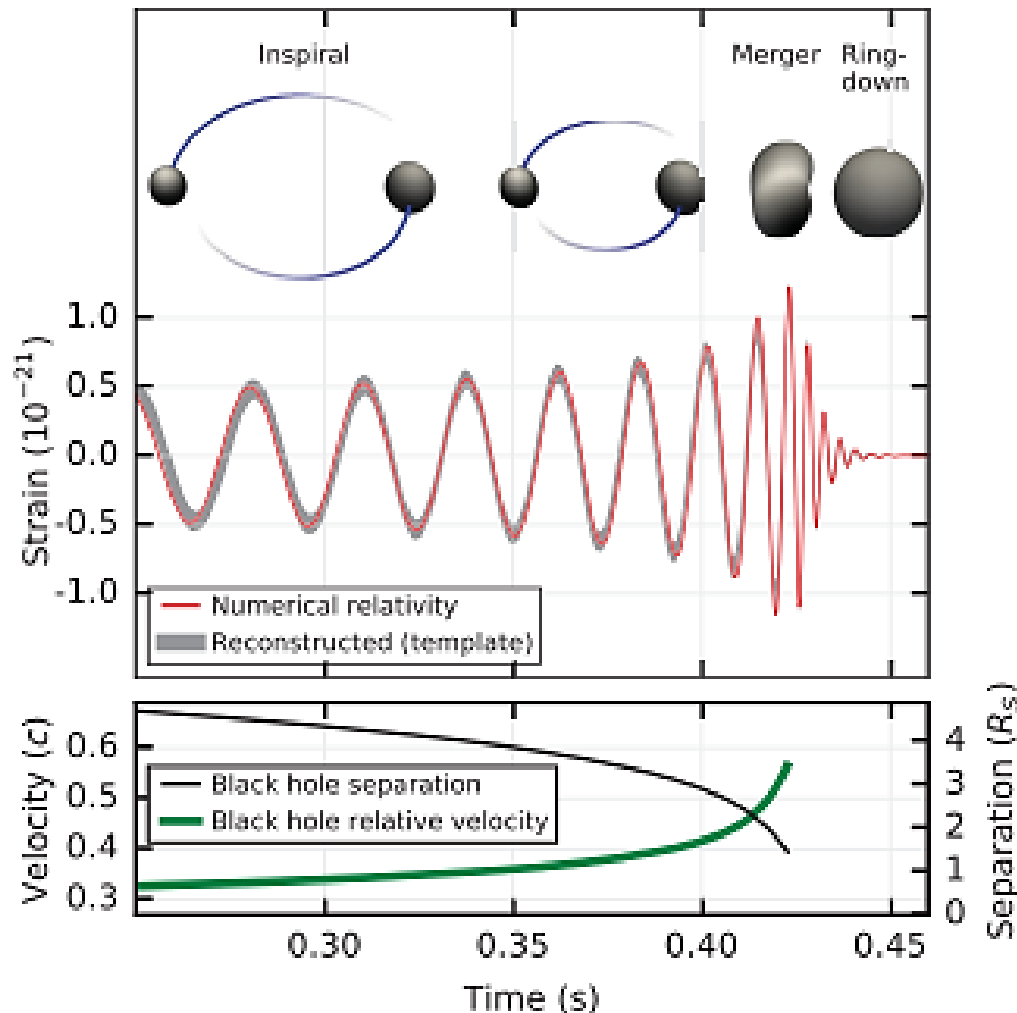


TABLE I. Source parameters for GW150914. We report median values with 90% credible intervals that include statistical errors, and systematic errors from averaging the results of different waveform models. Masses are given in the source frame; to convert to the detector frame multiply by  $(1+z)$  [90]. The source redshift assumes standard cosmology [91].

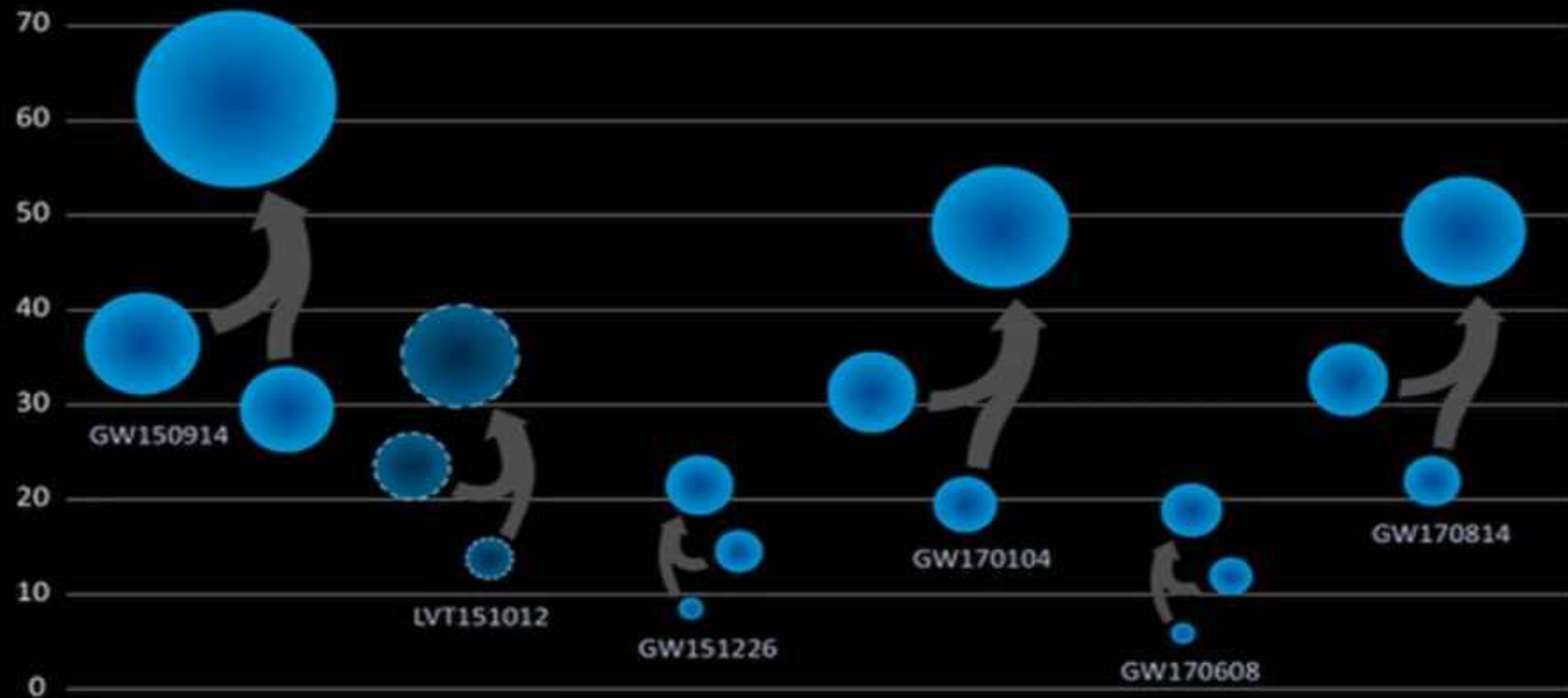
Primary black hole mass	$36_{-4}^{+5} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29_{-4}^{+4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62_{-4}^{+4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67_{-0.07}^{+0.05}$
Luminosity distance	$410_{-180}^{+160}$ Mpc
Source redshift $z$	$0.09_{-0.04}^{+0.03}$

Inspiral (Zbliżanie spiralne) - czarne dziury krążą wokół wspólnego środka masy. Emitują fale grawitacyjne, tracą energię i zbliżają się do siebie. Amplituda i częstotliwość sygnału gwałtownie rosną (efekt chirp).

Merger (Fuzja) - horyzonty zdarzeń obu obiektów łączą się w jeden. Sygnał osiąga swoje maksymalne odkształcenie czasoprzestrzeni (Strain).

Ring-down (Wygasanie) - nowo powstała, zniekształcona czarna dziura gwałtownie wibruje. Emituje reszkowe fale grawitacyjne, szybko stabilizując swój kształt.

# Fale grawitacyjne



Zderzenia czarnych dziur wykryte podczas wspólnych obserwacji LIGO/Virgo do listopada 2017 roku. Niebieskie kręgi ilustrują masy czarnych dziur biorących udział w zdarzeniach, wyrażone jako wielokrotności masy Słońca.