GWIAZDY ZMIENNE

Tadeusz Smela

Prelekcja wygłoszona na VI Zlocie Miłośników Astronomii w Zatomiu 16 marca 2013

Kiedy patrzymy na pogodne niebo w nocy można odnieść wrażenie, że gwiazdy są niezmienne. Oprócz migotania wywołanego niestabilnością atmosfery, gwiazdy wydają się stałe.

Uważne obserwacje, wykonane nawet gołym okiem pokazują, że niektóre gwiazdy w rzeczywistości wykazują zmiany jasności.

Zmiany jasności niektórych gwiazd mają miejsce w ciągu kilku dni, podczas gdy zmienność innych daje się zauważyć w ciągu kilku godzin lub wielu miesięcy.

Inne, niespodziewanie pojawiają się na niebie, zwiększając wielokrotnie swoją jasność, po czym równie nieoczekiwanie znikają.

Na podstawowym poziomie wszystkie gwiazdy są zmienne. Gwiazdy ewoluują i zmieniają się w czasie, np. z gwiazdy ciągu głównego w czerwonego olbrzyma. Ponadto wszystkie gwiazdy wykazują drobne fluktuacje jasności, ale są one w większości przypadków praktycznie niezauważalne – na przykład jasność Słońca zmienia się o ok. 0,1% w cyklu 11-letnim.

Gwiazdy zmienne – to gwiazdy, które wykazują okresowe bądź nieprzewidywalne zmiany jasności wywoływane przez czynniki wewnętrzne bądź zewnętrzne.

Na prelekcji postaram się opowiedzieć o głównych typach gwiazd zmiennych, wykazujących zauważalne zmiany jasności, charakterze tych zmian oraz powodach i mechanizmach ich zmienności.

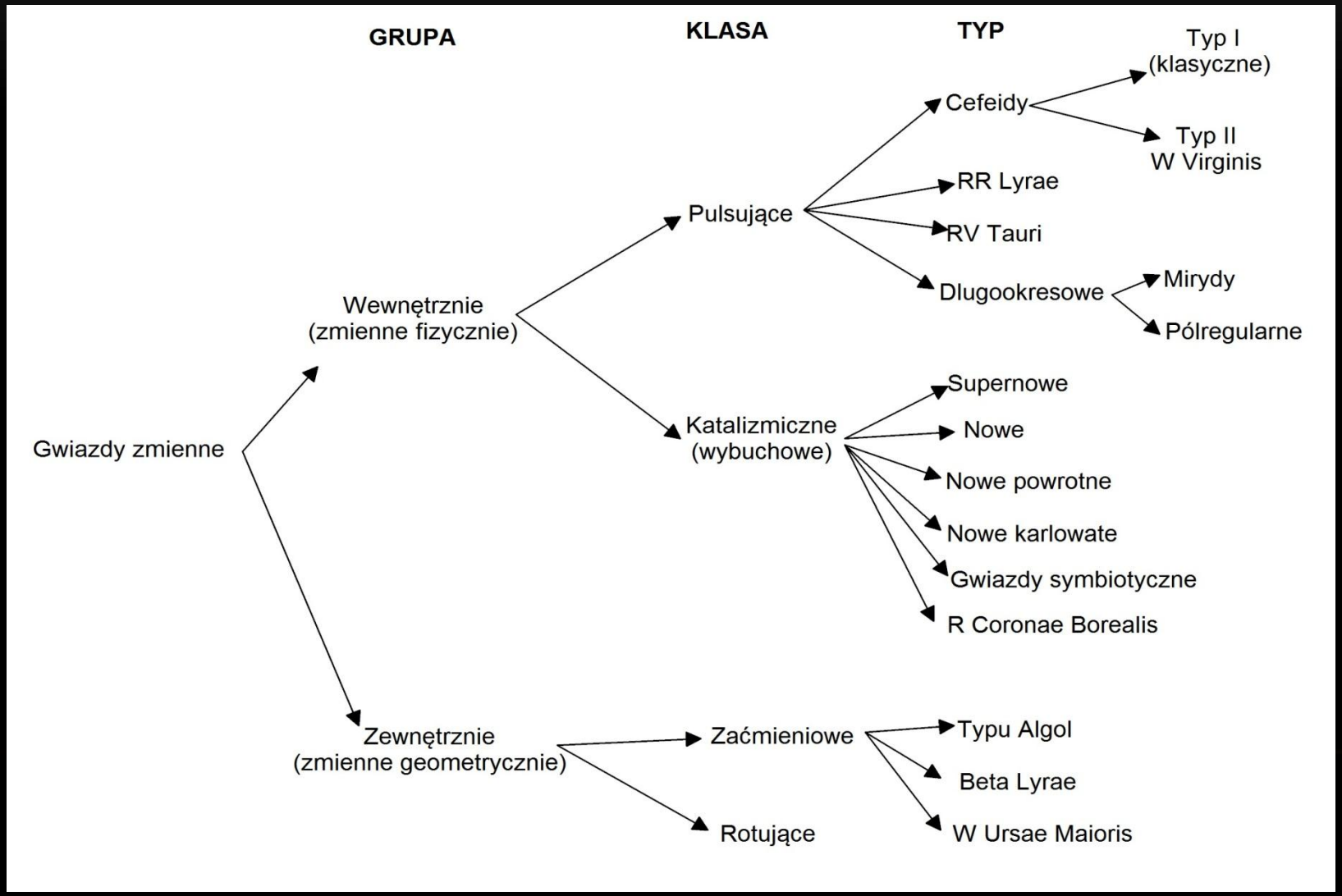
Opowiem też o szczególnym znaczeniu niektórych rodzajów gwiazd zmiennych.

Najogólniej mówiąc obserwowane zmiany jasności mogą wynikać z dwóch powodów:

- Z powodu procesów zachodzących na zewnątrz gwiazd - zmian geometrycznych (zmiana wzajemnych położeń gwiazd względem obserwatora). Zmiana jasności spowodowana jest zaćmieniami dwóch lub więcej gwiazd lub rotacją.

- Z powodu zmian wewnętrznych - fizycznych zmian w samych gwiazdach, powodujących zmianę mocy promieniowania gwiazdy w czasie.

KLASYFIKACJA GWIAZD ZMIENNYCH



ZMIENNE ZAĆMIENIOWE

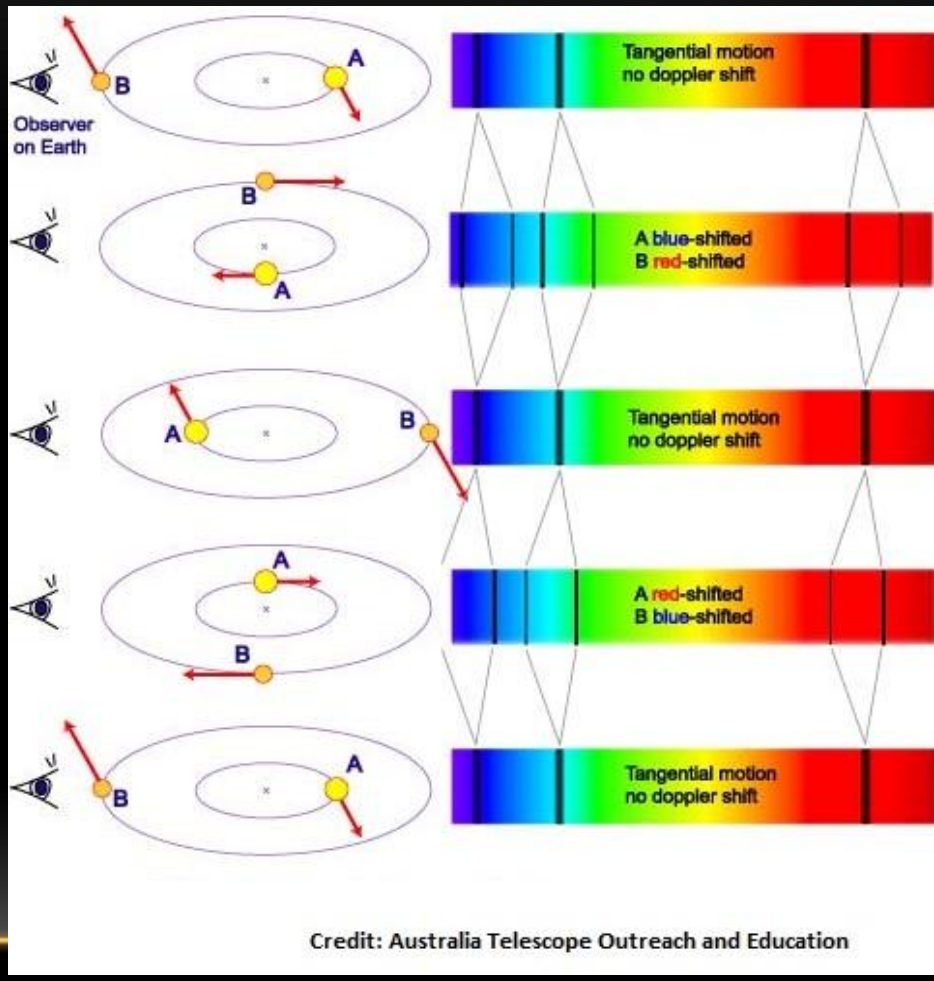
- Gwiazdę zmienną zaćmieniową tworzą dwie lub więcej gwiazd powiązanych grawitacyjnie, krążących wokół środka masy
- Jeżeli kąt nachylenia orbity gwiazdy podwójnej względem kierunku Ziemi jest bliski 0 to powierzchnia każdego składnika układu podwójnego ulega w regularnych odstępach czasu częściowemu lub całkowitemu przesłonięciu.
- Skutkiem tego są regularne osłabienia blasku takiego układu
- Z reguły odległości pomiędzy gwiazdami są bardzo małe i na ogół nie widzimy poszczególnych składników tworzących układ zaćmieniowy

Niżej podany link prowadzi do animacji, obrazującej zachowanie się układu dwóch gwiazd zaćmieniowych

http://astro.unl.edu/naap/ebs/animations/ebs.html

ZMIENNE ZAĆMIENIOWE

- Obserwacje tego rodzaju gwiazd dostarczają cennych informacji astrofizycznych.
- Okres obiegu daje się dokładnie wyznaczyć.
- Jeżeli gwiazda jest na tyle jasna, że daje się wyznaczyć jej widmo, to badając przesunięcie dopplerowskie z dużą dokładnością można wyliczyć prędkość orbitalną, znając prędkość i okres - promień orbity i fizyczne rozmiary samych składników.
- Znając te parametry można w dalszej kolejności wyznaczyć masę całego układu i stosunek mas składników.
- Znając masę i rozmiary można wyznaczyć gęstość.



ZMIENNE ZAĆMIENIOWE

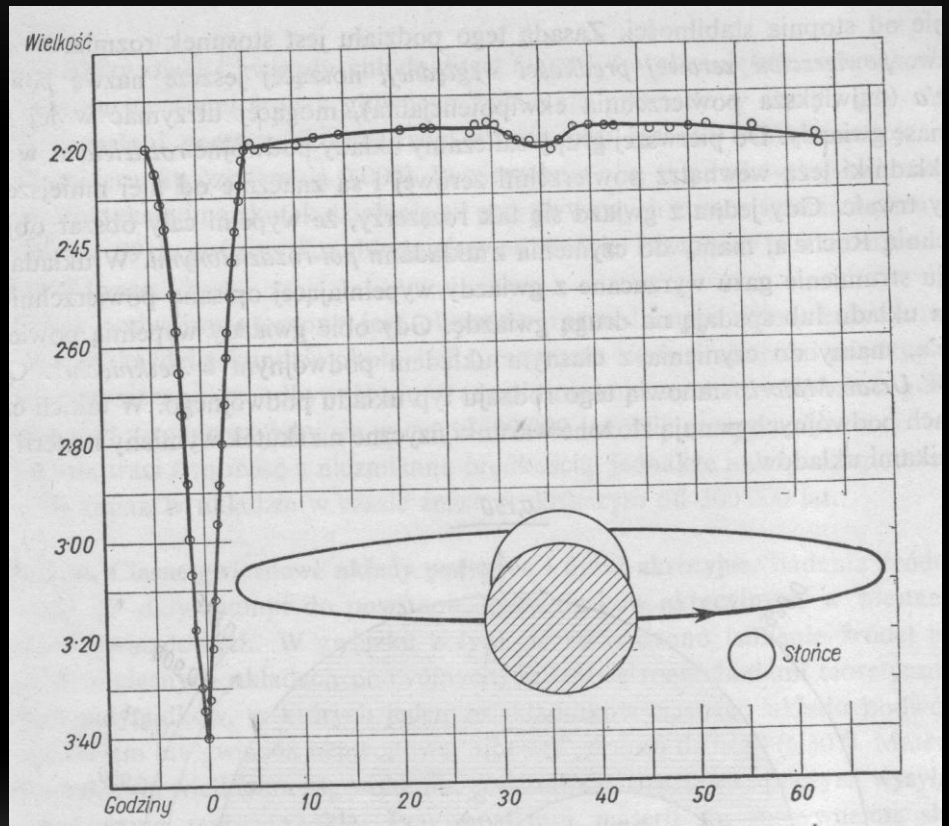
Gwiazdy typu Algola

- Są to układy złożone z dwóch gwiazd prawie kulistych, znajdujących się w dość dużych odległościach w porównaniu z ich rozmiarami.
- Tego typu gwiazdy są najliczniejsze wśród gwiazd zaćmieniowych

ZMIENNE ZAĆMIENIOWE

Gwiazdy typu Algola

- U gwiazd typu Algola występują zazwyczaj dwa zaćmienia blasku: główne, gdy jaśniejszy składnik zasłaniany jest przez ciemniejszy składnik i wtórne, gdy jaśniejszy składnik zasłania ciemniejszy składnik.
- Większość gwiazd typu Algola ma okres pomiędzy dwoma minimami głównymi rzędu kilku dni. (Algol 2,87 doby)



Ryc. 162. Krzywa zmian blasku Algola

- Gwiazda typu Algola o najkrótszym okresie to HV Virginis ~2:48 godzin,
- Gwiazda typu Algola o najdłuższym okresie to epsilon Aurigae 9892 dni (27 lat)
- Gwiazda z największą zmianą blasku 3.4 MAG to V342 Aquilae (Orzeł)

ZMIENNE ZAĆMIENIOWE

Układy podwójne Beta Lyrae składają się z dwóch elipsoidalnych gwiazd nierównych rozmiarów.

Elipsoidalny kształt wynika z grawitacyjnego oddziaływania pomiędzy składnikami. Dodatkowo układ ten jest zanurzony we wspólnej otoczce materii, która wypływa z obu gwiazd.

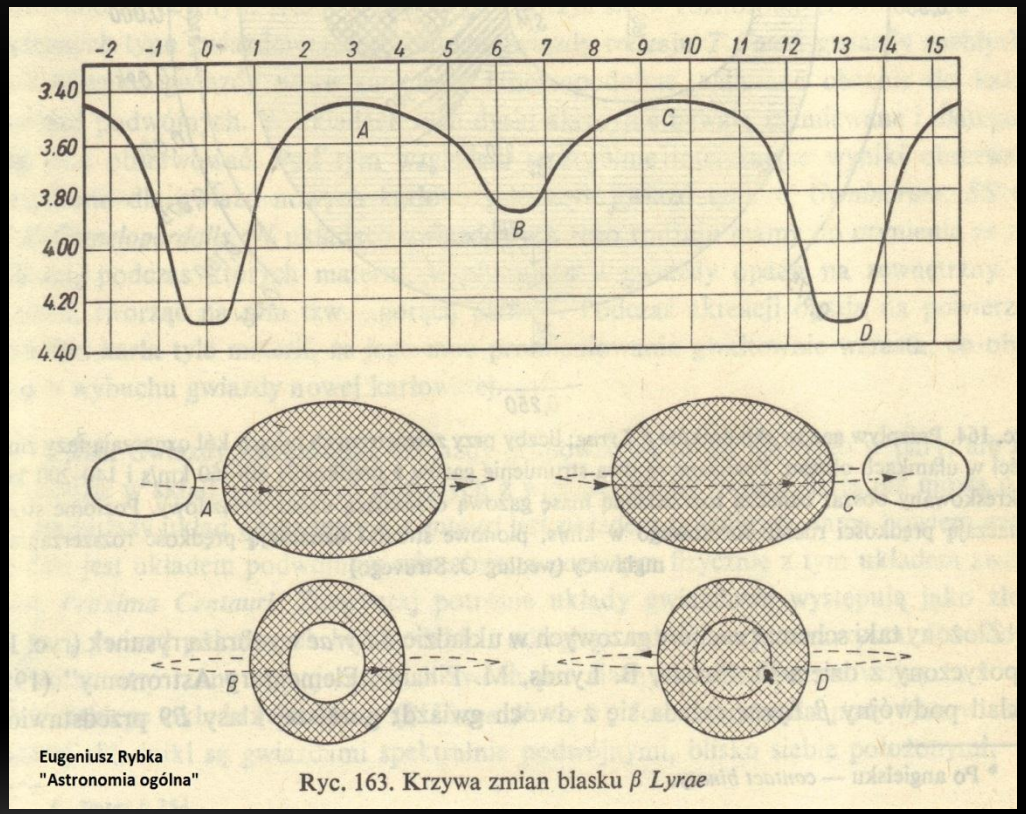
ZMIENNE ZAĆMIENIOWE

Gwiazdy typu ß Lyrae

Z powodu małej odległości między składnikami i elipsoidalnego kształtu składników, w żadnej fazie układ nie wykazuje stałego blasku.

Okres zmienności gwiazd tego typu wynosi od kilku do kilkunastu dni.

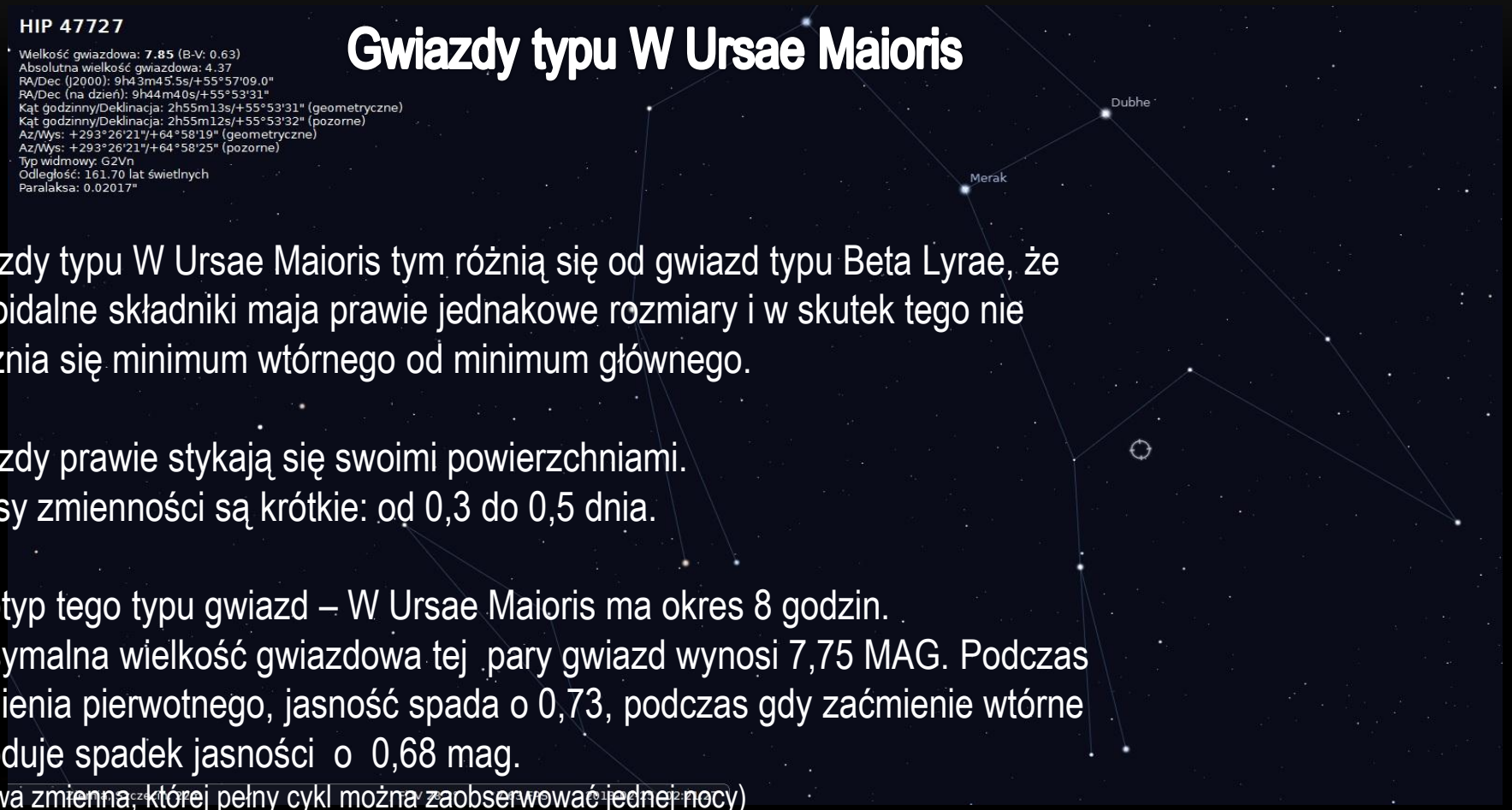
Prototyp tego typu zmiennych ma okres 12,91 dnia



Eugeniusz Rybka
"Astronomia ogólna"

Ryc. 163. Krzywa zmian blasku β *Lyrae*

ZMIENNE ZAĆMIENIOWE



Gwiazdy typu W Ursae Maioris tym różnią się od gwiazd typu Beta Lyrae, że elipsoidalne składniki maja prawie jednakowe rozmiary i w skutek tego nie odróżnia się minimum wtórnego od minimum głównego.

Gwiazdy prawie stykają się swoimi powierzchniami.
Okresy zmienności są krótkie: od 0,3 do 0,5 dnia.

Prototyp tego typu gwiazd – W Ursae Maioris ma okres 8 godzin.
Maksymalna wielkość gwiazdowa tej pary gwiazd wynosi 7,75 MAG. Podczas zaćmienia pierwotnego, jasność spada o 0,73, podczas gdy zaćmienie wtórne powoduje spadek jasności o 0,68 mag.
(ciekawa zmienna, której pełny cykl można zaobserwować jednej nocy)

ZMIENNE ROTUJĄCE

Gwiazdy tego typu zmieniają swoją jasność z powodu ciemniejszych obszarów na ich powierzchniach, wynikających z powodu np. zmian termalnych na powierzchni gwiazdy, plam lub innej aktywności chomosfery.

Wahania jasności są zwykle mniejsze niż 0,5 magnitudo z okresem odpowiadającym ich okresowi obrotu (od kilku dni do kilki miesięcy).

Pierwszą gwiazdą, która została sklasyfikowana jako zmienna rotująca była BY Draconis

ZMIENNE PULSUJĄCE

Każda gwiazda podlega zmianom typu ewolucyjnego. Zmiany tego typu są bardzo powolne.

Istnieje rozległa klasa gwiazd, w których zmiany zachodzą szybko, powodując dające się zaobserwować zmiany parametrów gwiazdowych w ciągu dni lub lat a nawet ułamka doby.

Zmiany te są różnorodne, niektóre są regularne, powtarzające się w ściśle określonych odcinkach czasu, inne mają charakter cykliczny, tzn. powtarzający się ale nieregularnie, jeszcze inne zmieniają się w sposób nieprzewidywalny .

Parametrem, który ulega zmianie to blask i widmo.

ZMIENNE PULSUJĄCE

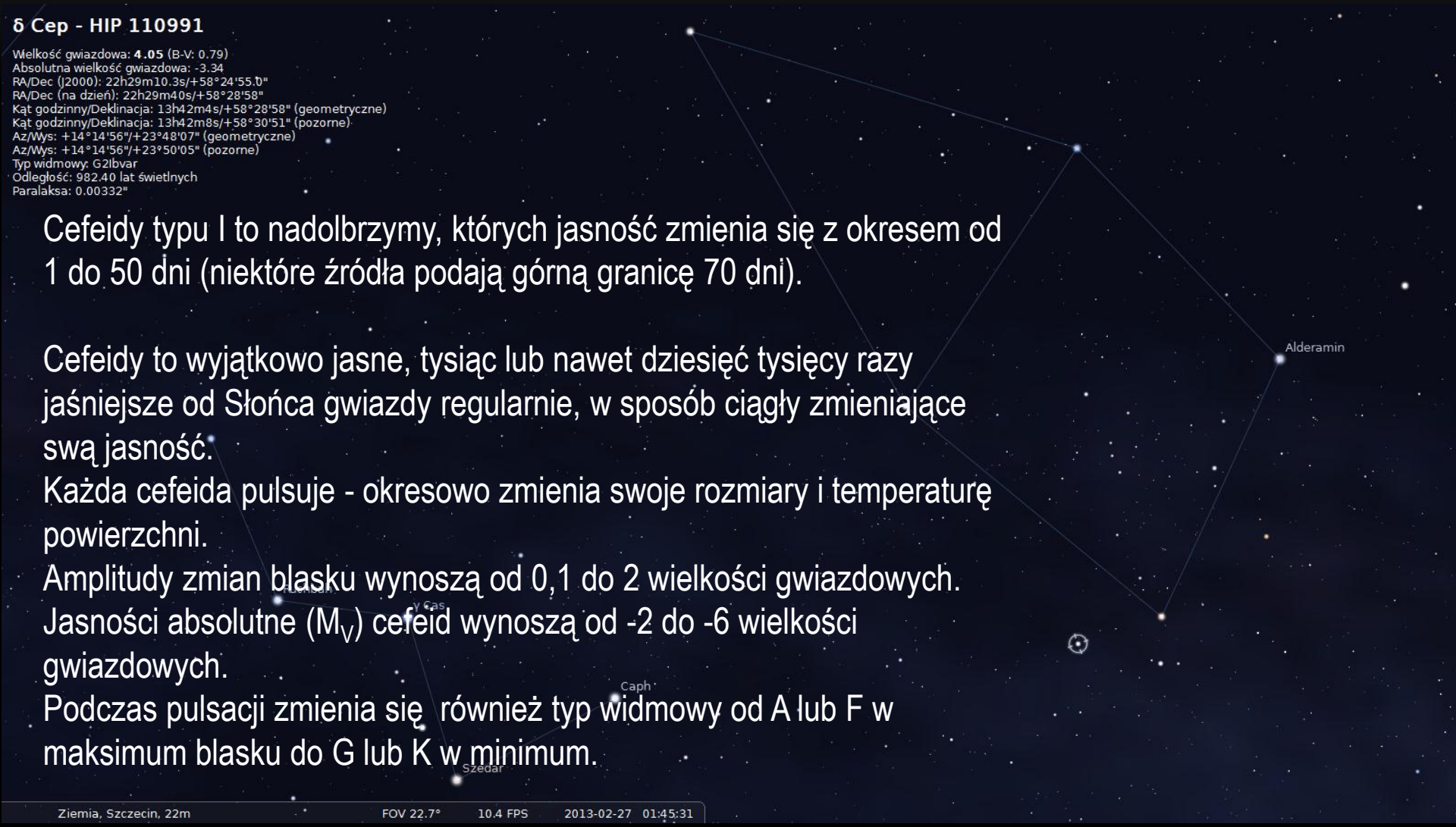
Pulsujące gwiazdy zmienne to gwiazdy zmieniające swoją jasność pod wpływem fizycznych zmian, zachodzących wewnątrz gwiazdy.

Zmiany wewnątrz gwiazdy powodują okresowe rozszerzanie się i kurczenie warstw powierzchniowych gwiazdy.

W zależności od masy gwiazdy i etapu ewolucji, okres zmian i kształt krzywej zmian jasności jest różny.

ZMIENNE PULSUJĄCE

Cefeidy typu I (klasyczne)



Cefeidy typu I to nadolbrzymy, których jasność zmienia się z okresem od 1 do 50 dni (niektóre źródła podają górną granicę 70 dni).

Cefeidy to wyjątkowo jasne, tysiąc lub nawet dziesięć tysięcy razy jaśniejsze od Słońca gwiazdy regularnie, w sposób ciągły zmieniające swą jasność.

Każda cefeida pulsuje - okresowo zmienia swoje rozmiary i temperaturę powierzchni.

Amplitudy zmian blasku wynoszą od 0,1 do 2 wielkości gwiazdowych.

Jasności absolutne (M_V) cefeid wynoszą od -2 do -6 wielkości gwiazdowych.

Podczas pulsacji zmienia się również typ widmowy od A lub F w maksimum blasku do G lub K w minimum.

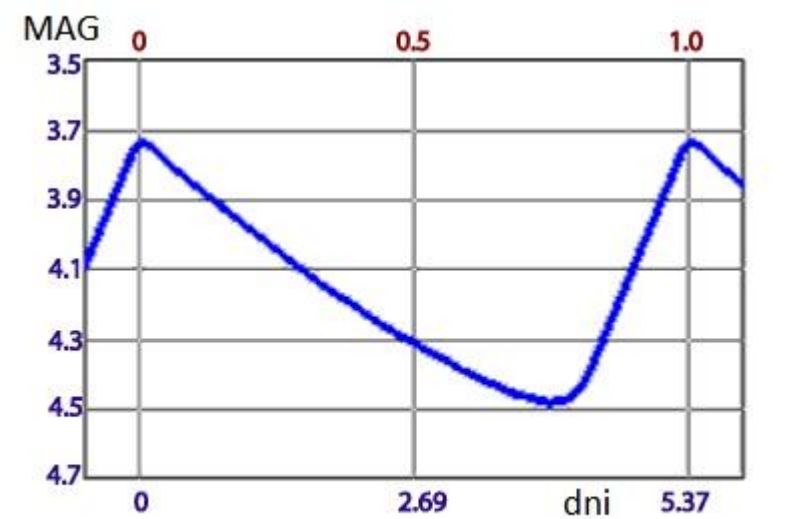
ZMIENNE PULSUJĄCE

Cefeidy typu I (klasyczne)

Zmienność blasku charakteryzuje się szybszym wzrostem od minimum do maksimum niż spadkiem od maximum do minimum.

Za zmianę jasności odpowiada głównie zmiana temperatury efektywnej, bo promień gwiazdy ulega stosunkowo małym zmianom, wynoszącym mniej niż 10% .

Wskaźnik barwy w minimum jest większy niż w minimum, np. Delta Cephei w pobliżu minimum blasku ma widmo klasy G2 a w pobliżu maximum – F0.



Krzywa zmian jasności δ Cephei

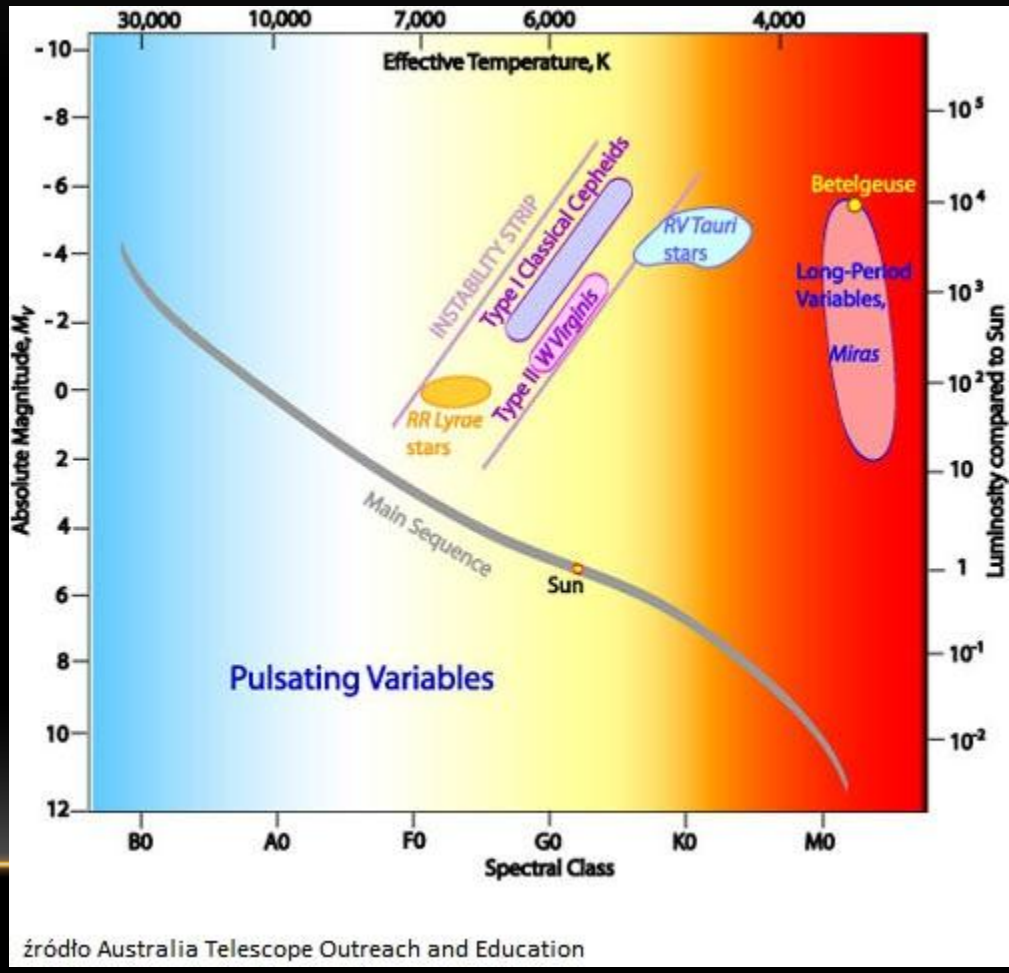
ZMIENNE PULSUJĄCE

Cefeidy typu I (klasyczne)

Dlaczego gwiazdy pulsują

Gwiazdy ciągu głównego, takie jak nasze Słońce, są w zasadzie stabilne, nie wykazują żadnych dramatycznych zmian w wielkości i jasności.
Są w stanie *równowagi hydrostatycznej* , czyli siła grawitacji jest równoważona przez ciśnienie promieniowania i ciśnienie gazu.

Po wypaleniu wodoru w jądrze, gwiazda wychodzi z ciągu głównego. Rozpoczyna się spalanie wodoru w otoczce jądra .
Gwiazda wchodzi w pasmo niestabilności diagramu Hertzsprunga – Russela
(diagram Hertzsprunga – Russela opisany jest w prezentacji Ewolucja gwiazd)



źródło Australia Telescope Outreach and Education

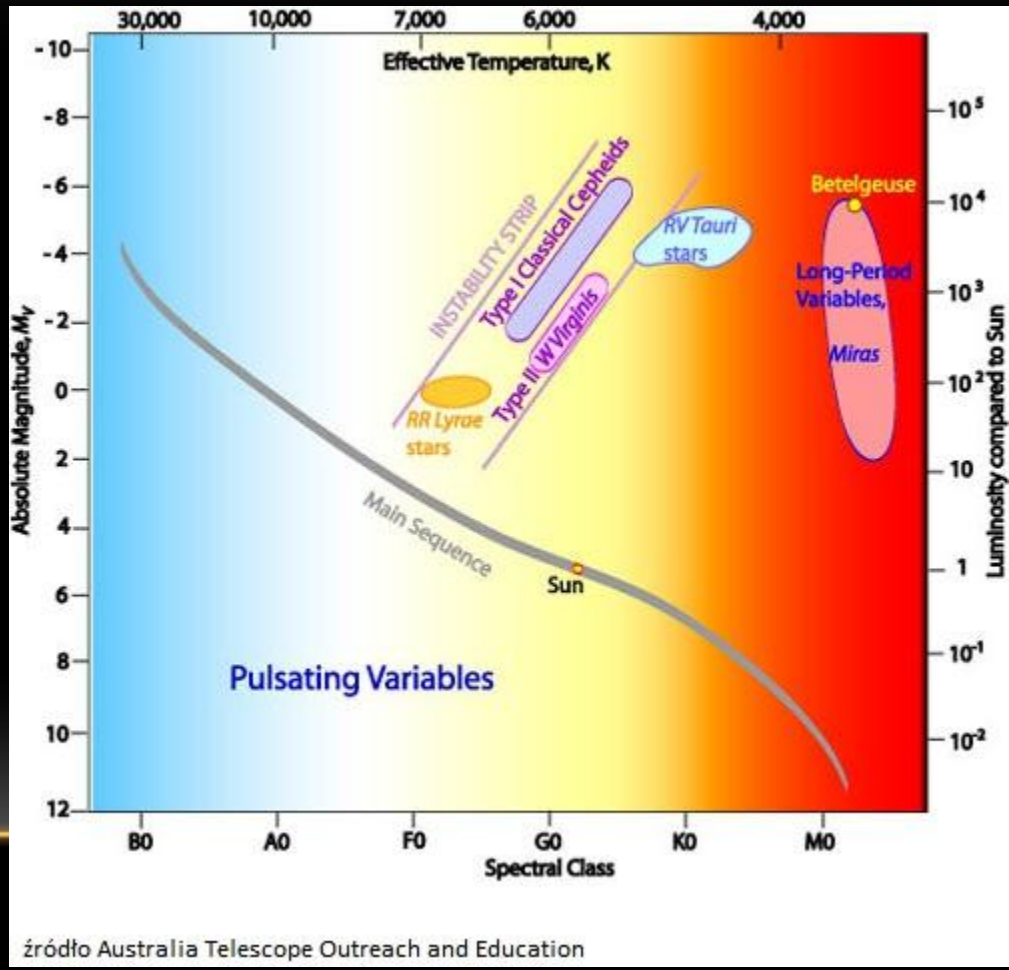
ZMIENNE PULSUJĄCE

Cefeidy typu I (klasyczne)

Dlaczego gwiazdy pulsują

Wbrew temu, co mogłoby się wydawać, pulsacja nie jest spowodowana zwiększonym ciśnieniem promieniowania, spowodowanego większym tempem fuzji termojądrowej. Nie powstają pulsacje szybkości fuzji termojądrowej. Szybkość syntezy jest w przybliżeniu stała.

Powodem pulsacji są zmiany szybkości z jaką energia wytworzona w reakcji fuzji może uciec z wnętrza gwiazdy. A to jest spowodowane zmianami „przezroczystości" zewnętrznych warstw gwiazdy wraz ze zmianami temperatury tych warstw. Wraz ze zmianą „przezroczystości" zmienia się tempo z jakim energia może zostać wypromieniowana z gwiazdy.
(za zmianę przezroczystości odpowiada podwójnie zjonizowany hel, pojawiający się w określonych temperaturach)



źródło Australia Telescope Outreach and Education

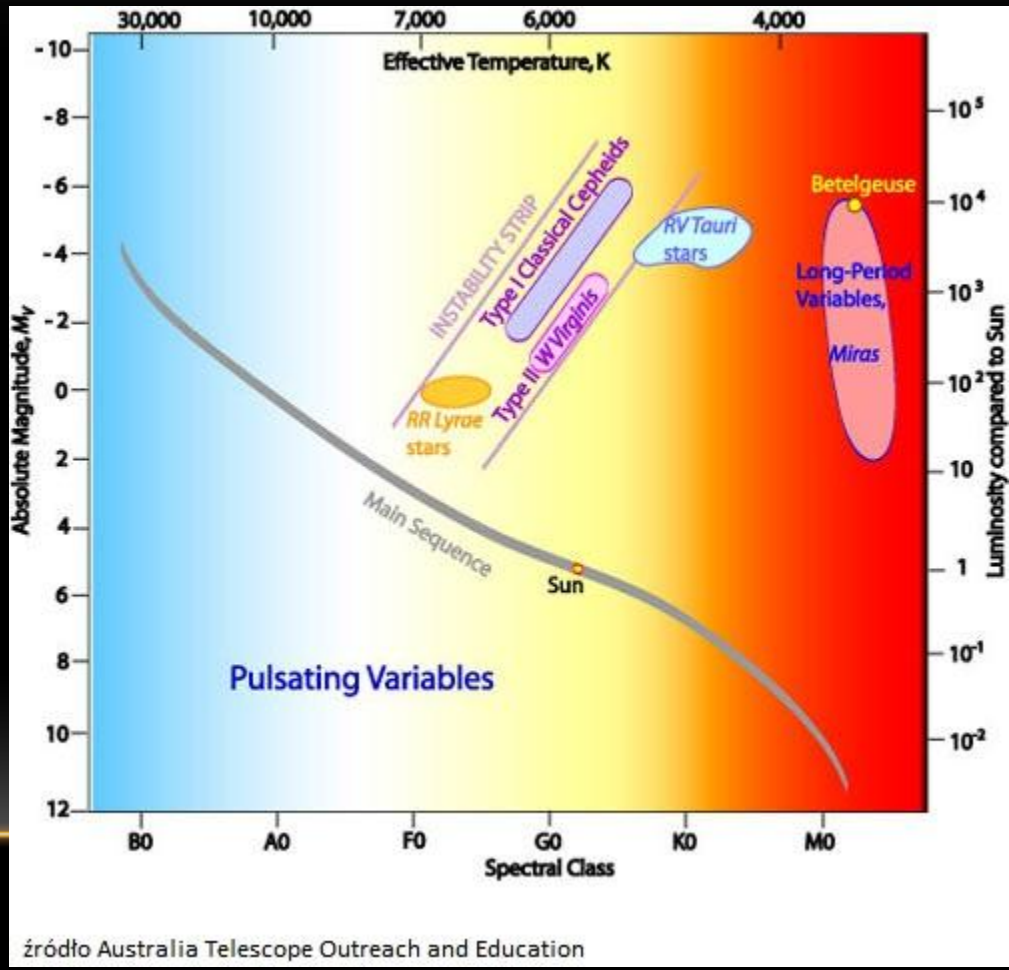
ZMIENNE PULSUJĄCE

Cefeidy typu I (klasyczne)

Dlaczego gwiazdy pulsują

Pulsująca gwiazda nie jest w stanie równowagi, ale zawsze stara się ją odzyskać.

Jest to oscylator harmoniczny.



źródło Australia Telescope Outreach and Education

ZMIENNE PULSUJĄCE

Cefeidy typu I (klasyczne)

Etapy pulsujących gwiazd:

1. Jeśli ciśnienie jest silniejsze od grawitacji , zewnętrzne warstwy gwiazdy się rozszerzają.

2. Gdy gwiazda się rozszerza , siły grawitacji maleją, ale ciśnienie spada w jeszcze większym tempie.

3. Rozszerzając się, gwiazda osiągnie punkt, w którym występuje równowaga hydrostatyczna, tzn. grawitacja = ciśnienie, jednak z powodu bezwładności, poruszające się na zewnątrz warstwy dalej się rozszerzają. Ta bezwładność powoduje że gwiazda rozszerza się poza punkt równowagi.

4. Siła grawitacji spowalnia rozszerzanie aż zostanie osiągnięty punkt, gdzie rozszerzanie się zatrzymuje. Teraz ciśnienie gazu i ciśnienie promieniowania jest słabsze niż siły grawitacji.

5 .Nierównowaga sił powoduje, że teraz zewnętrzne warstwy gwiazdy zaczynają się kurczyć.

6. Kurczenie powoduje zwiększanie sił grawitacji i ciśnienia. Bezwładność kurczących się warstw powoduje że punkt równowagi zostanie przekroczony.

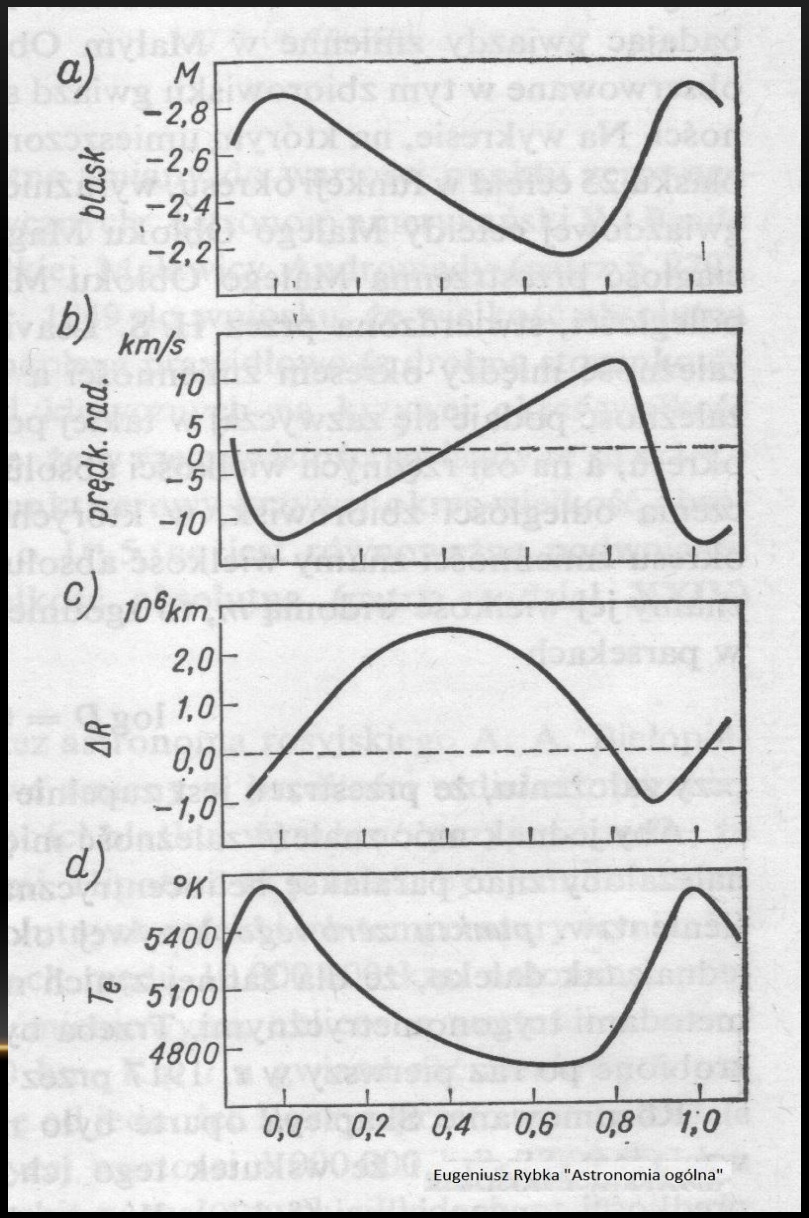
7. Rosnące ciśnienie hamuje i w końcu zatrzymuje kurczenie się gwiazdy.

8. Cykl rozpoczyna się od początku (wahadło)

ZMIENNE PULSUJĄCE

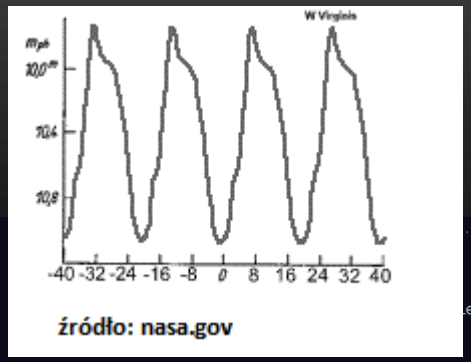
Cefeidy typu I (klasyczne)

Rysunek obok przedstawia współzależność zmian blasku (a), prędkości radialnej (b), zmian promienia (c) i temperatury (d) u Cefeid.



Prędkość radialna to rzut prędkości (względem obserwatora) na kierunek patrzenia. Zgodnie z przyjętą konwencją, gdy ruch odbywa się w kierunku od obserwatora, prędkość uznawana jest za dodatnią.

ZMIENNE PULSUJĄCE

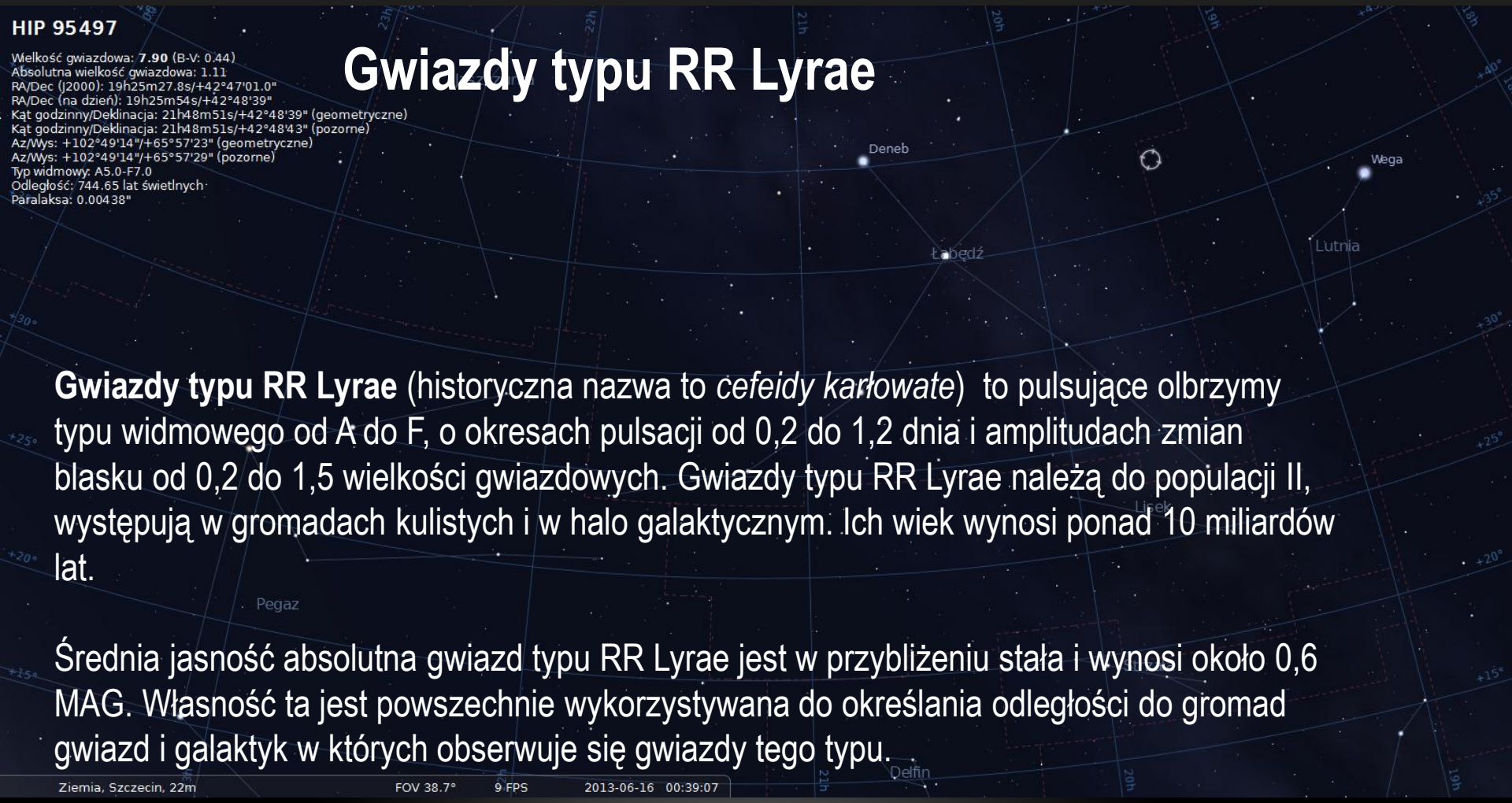


Cefeidy typu II W Virginis

Gwiazdy tego typu są podobne do klasycznych cefeid, jednak ich jasność absolutna jest o około 1,5 do 2 wielkości mniejsza. Wykazują zmianę jasności w zakresie od 0,3 do 1.2 magnitudo z okresem zmienności od 0,8 do 30 dni.
Ponieważ są starsze od klasycznych cefeid ich widma charakteryzują się większą metalicznością.
Krzywa zmian blasku zawiera charakterystyczny garb.

Nazwa tego typu zmiennych pochodzi od nazwy pierwszej gwiazdy odkrytej w tej grupie. -W Virginis. Ma okres 17,2736 dni, zakres jasności 9,46 - 10,75 i zakres widmowy klasy F0-G0.

ZMIENNE PULSUJĄCE

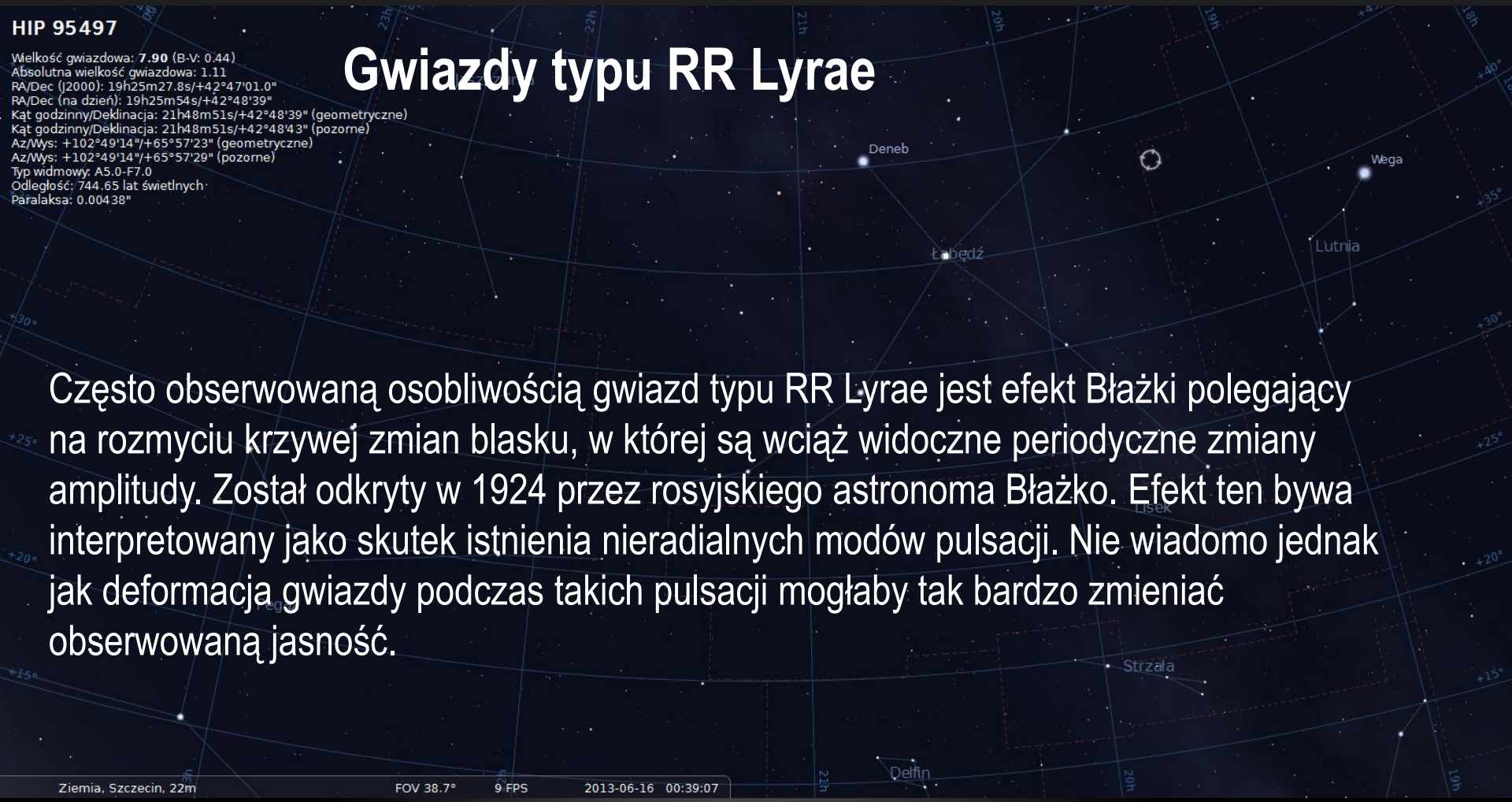


Gwiazdy typu RR Lyrae

Gwiazdy typu RR Lyrae (historyczna nazwa to *cefeidy karłowate*) to pulsujące olbrzymy typu widmowego od A do F, o okresach pulsacji od 0,2 do 1,2 dnia i amplitudach zmian blasku od 0,2 do 1,5 wielkości gwiazdowych. Gwiazdy typu RR Lyrae należą do populacji II, występują w gromadach kulistych i w halo galaktycznym. Ich wiek wynosi ponad 10 miliardów lat.

Średnia jasność absolutna gwiazd typu RR Lyrae jest w przybliżeniu stała i wynosi około 0,6 MAG. Własność ta jest powszechnie wykorzystywana do określania odległości do gromad gwiazd i galaktyk w których obserwuje się gwiazdy tego typu.

ZMIENNE PULSUJĄCE



Gwiazdy typu RR Lyrae

Często obserwowaną osobliwością gwiazd typu RR Lyrae jest efekt Błażki polegający na rozmyciu krzywej zmian blasku, w której są wciąż widoczne periodyczne zmiany amplitudy. Został odkryty w 1924 przez rosyjskiego astronoma Błażko. Efekt ten bywa interpretowany jako skutek istnienia nieradialnych modów pulsacji. Nie wiadomo jednak jak deformacja gwiazdy podczas takich pulsacji mogłaby tak bardzo zmieniać obserwowaną jasność.

ZMIENNE PULSUJĄCE

Cefeidy: zależność okres - światłość

W 1912 roku astronomka amerykańska Henrietta Leavitt badając gwiazdy zmienne w Małym Obłoku Magellana stwierdziła, że obserwowane w tym zbiorowisku gwiazdy zmienne są tym jaśniejsze im dłuższy jest okres ich zmienności.
Zbadała 1777 gwiazd w Małym Obłoku Magellana, z których 47 sklasyfikowała jako cefeidy.
Jej odkrycie przyczyniło się do wyznaczenia ważnej zależności okresu zmian od jasności absolutnej.

Wszystkie cefeidy są zbyt daleko aby możliwe było wyznaczenie ich odległości metodą paralaksy heliocentrycznej, ale praca duńskiego astronoma, Ejnar Hertzsprunga i amerykańskiego astronoma Harlowa Shapley-a pozwoliła na wyznaczenie zależności jasności od okresu.

ZMIENNE PULSUJĄCE

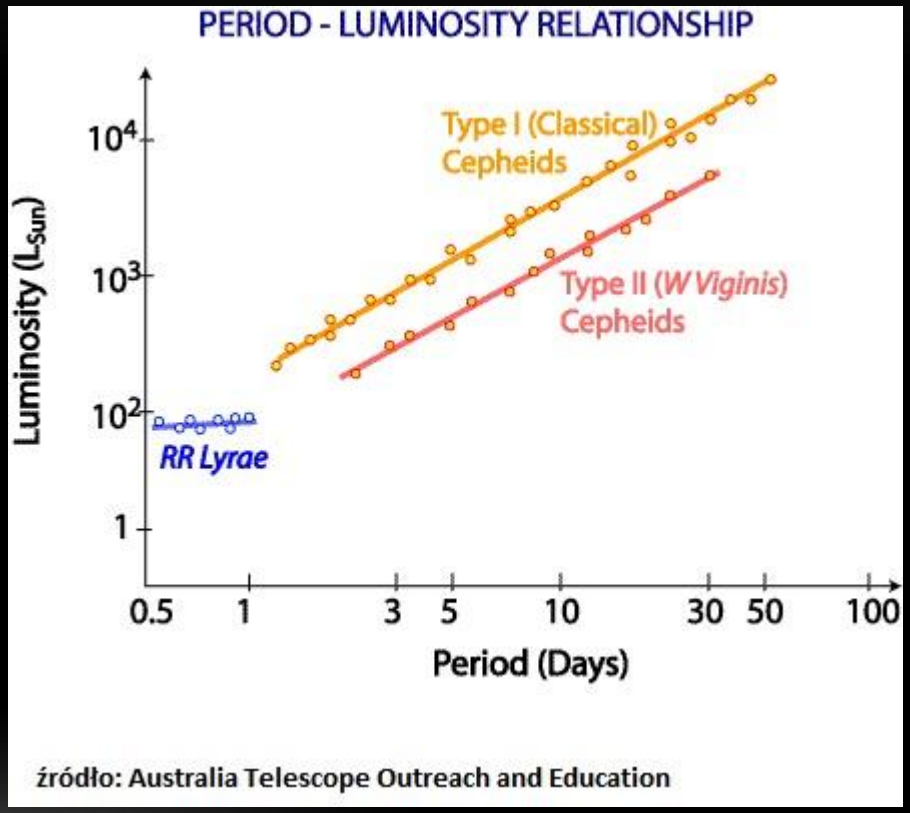
Cefeidy: zależność okres - światłość

Na rysunku obok przedstawiona jest zależność jasności absolutnej od okresu zmian.

Wielkość absolutna i wielkość widoma jest związana następującą zależnością:

$$(m-M)=5 \log(d/10)$$

m - średnia wielkość widoma (jasność obserwowana)
M- odczytana w wykresu wielkość absolutna
d - odległość



źródło: Australia Telescope Outreach and Education

Zależności te są wykorzystywane do wyznaczania odległości do galaktyk.

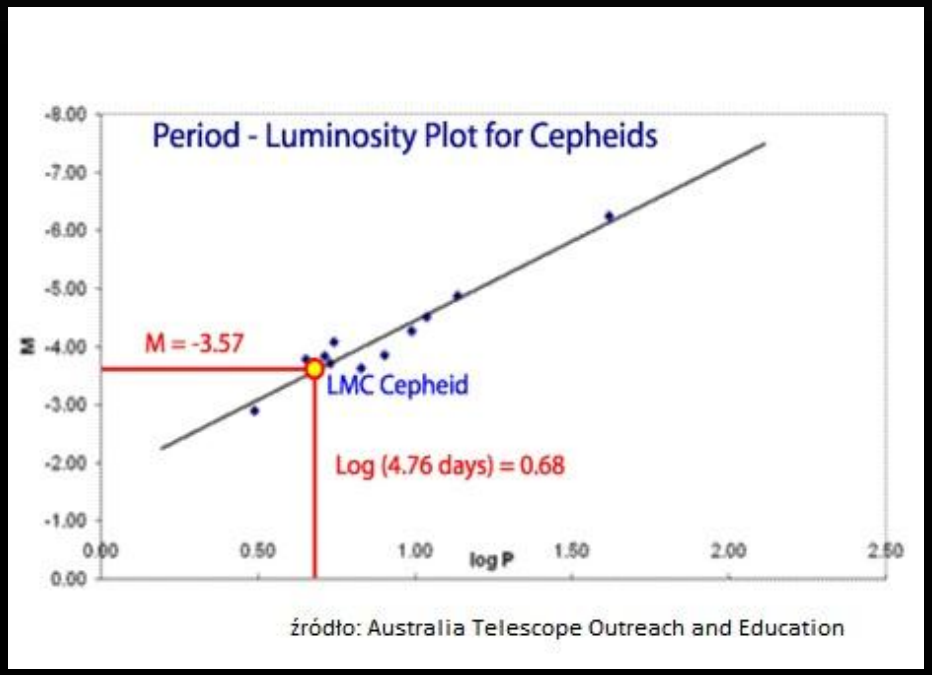
ZMIENNE PULSUJĄCE

Cefeidy

Przykład wyznaczenia odległości do cefeidy w Małym Obłoku Magellana:

Z krzywej jasności trzeba wyznaczyć średnią jasność (pomiary fotometryczne) i okres zmian w dniach.
W przykładzie obok okres zmian wynosi 4,76 dni.
log 4,76 = 0,68
Z wykresu odczytujemy jasność absolutną M=-3,57

Obserwowana średnia jasność m: 15,56 mag

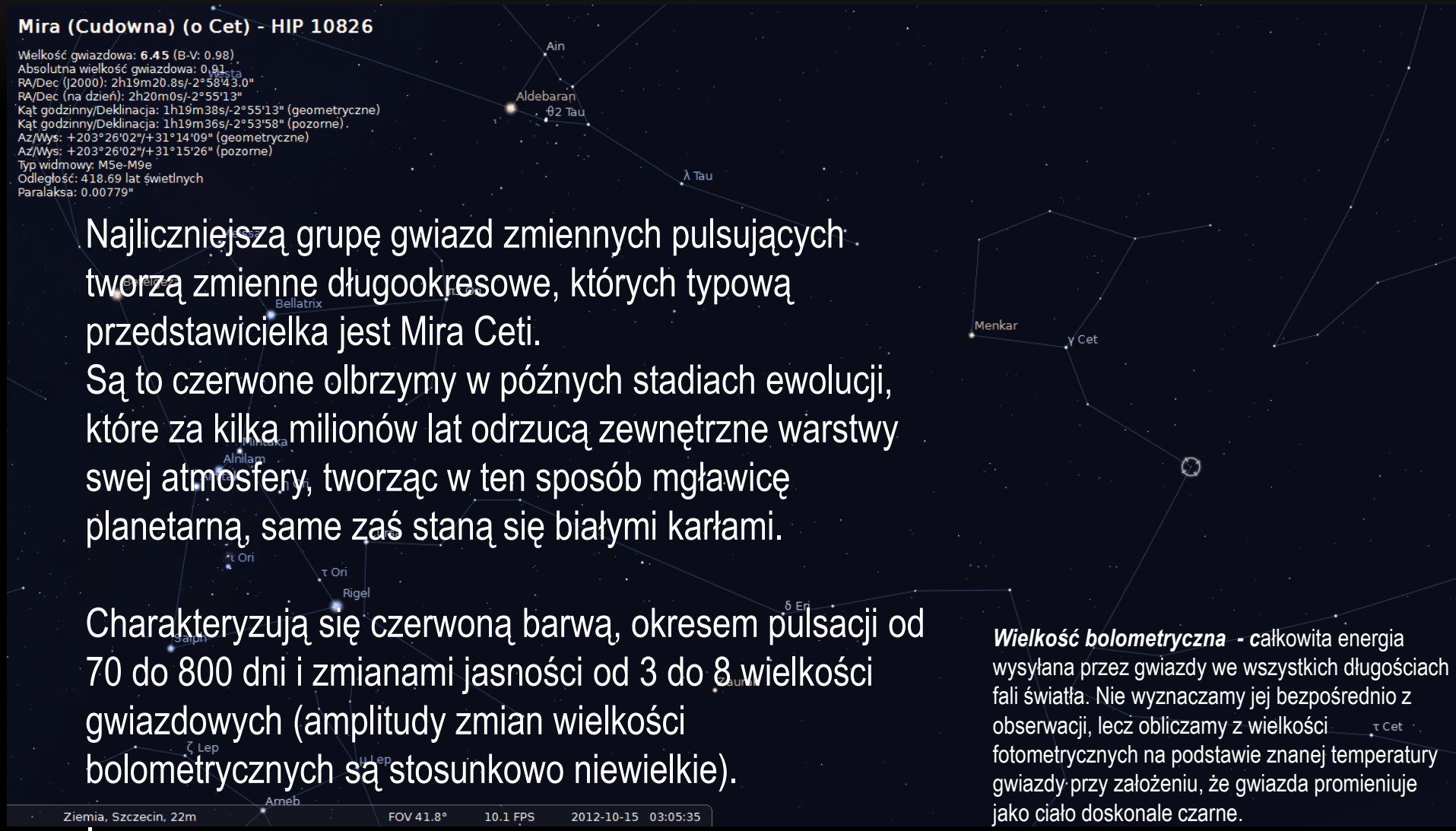


źródło: Australia Telescope Outreach and Education

Z zależności **(m-M)=5 log(d/10)**
wyznaczamy odległość d:
$d = 10^{(m - M + 5)/5}$
d=68 230 parseków

ZMIENNE PULSUJĄCE

Mirydy – zmienne długookresowe



Najliczniejszą grupę gwiazd zmiennych pulsujących tworzą zmienne długookresowe, których typową przedstawicielka jest Mira Ceti.
Są to czerwone olbrzymy w późnych stadiach ewolucji, które za kilka milionów lat odrzucą zewnętrzne warstwy swej atmosfery, tworząc w ten sposób mgławicę planetarną, same zaś staną się białymi karłami.

Charakteryzują się czerwoną barwą, okresem pulsacji od 70 do 800 dni i zmianami jasności od 3 do 8 wielkości gwiazdowych (amplitudy zmian wielkości bolometrycznych są stosunkowo niewielkie).

Wielkość bolometryczna **- c**ałkowita energia wysyłana przez gwiazdy we wszystkich długościach fali światła. Nie wyznaczamy jej bezpośrednio z obserwacji, lecz obliczamy z wielkości fotometrycznych na podstawie znanej temperatury gwiazdy przy założeniu, że gwiazda promieniuje jako ciało doskonale czarne.

ZMIENNE PULSUJĄCE

Mirydy – zmienne długookresowe

Mirydy są uważane za gwiazdy o masach mniejszych niż dwie masy Słońca, ale mogą być tysiąc lub więcej razy jaśniejsze od Słońca, ze względu na swoje rozmiary (kilkaset promieni Słońca). Pulsują w modzie p (radialnym), tzn. cała gwiazda powiększa się i zapada.

Zmiany rozmiarów i temperatury są powodem zmian jasności. Okres pulsacji jest zależny od masy i promienia gwiazdy.

Krzywe zmian jasności wykazują wielką różnorodność. Wśród tych gwiazd zdarzają się takie, na których występują szerokie minima i wąskie maksima lub tez odwrotnie. Poza tym w krzywych zmian blasku występują garby i to zarówno w gałęzi opadającej jak i wznoszącej.

Mira Ceti

Źródło: NASA HST

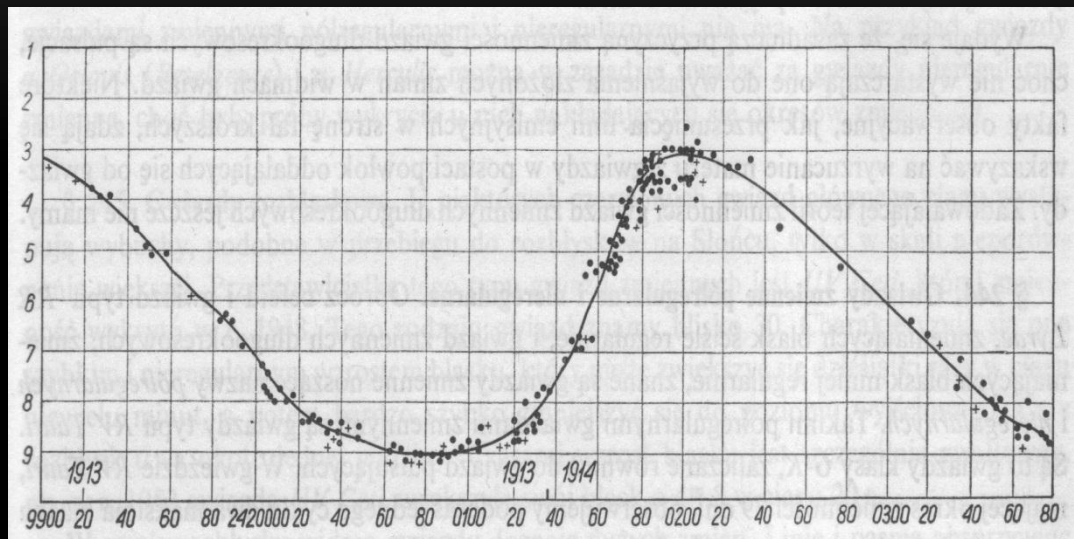
ZMIENNE PULSUJĄCE

Długookresowe

Mira Ceti

Nazwa tej klasy gwiazd pochodzi od Miry Ceti.

Mira Ceti ma okres zmienności 330 dni, przy czym jej zmienność nie jest regularna, bo zarówno okres zmienności ulega wahaniom, odchylając się do 15 dni wokół wartości średniej jak również wielkości gwiazdowe w minimum i maximum przybierają odmienne wartości. Szczególnie dużym wahaniom ulega maksymalny blask, który dochodzi czasem do 1,5mag, a czasem tylko do 5,6mag.



Ryc. 171. Krzywa zmian blasku *Mira Ceti*; na osi poziomej data Juliańska, na pionowej — wielkość i gwiazdowe

Eugeniusz Rybka "Astronomia ogólna"

ZMIENNE KATAKLIZMICZNE

- Gwiazdy kataklizmiczne (wybuchowe) odznaczają się tym, że obserwujemy u nich gwałtowny wzrost blasku a następnie znacznie powolniejsze jego zmniejszanie. Zmianom blasku towarzyszą duże zmiany w widmie, świadczące o gromadzeniu pod atmosferą energii, która następnie wyzwala się w sposób wybuchowy.

- Wybuchowe gwiazdy dzielą się na kilka kategorii. U gwiazd **nowych** wybuch obserwowany jest w zasadzie jednorazowo. U niektórych gwiazd zaobserwowano powtarzanie się wybuchu w odstępie kilkudziesięciu lat. Wybuchy niektórych gwiazd są tak potężne, ze zachodzą w nich istotne zmiany w budowie lub ulegają całkowitemu zniszczeniu. Gwiazdy te zostały nazwane supernowymi.

GWIAZDY NOWE

- Nazwa NOWA sięga jeszcze czasów starożytnych, gdy w II w p.n.e. Hipparch dostrzegł w gwiazdozbiorze Skorpiona gwiazdę, której wczesniej nikt nie widział. Po pewnym czasie gwiazda stała się niewidoczna.

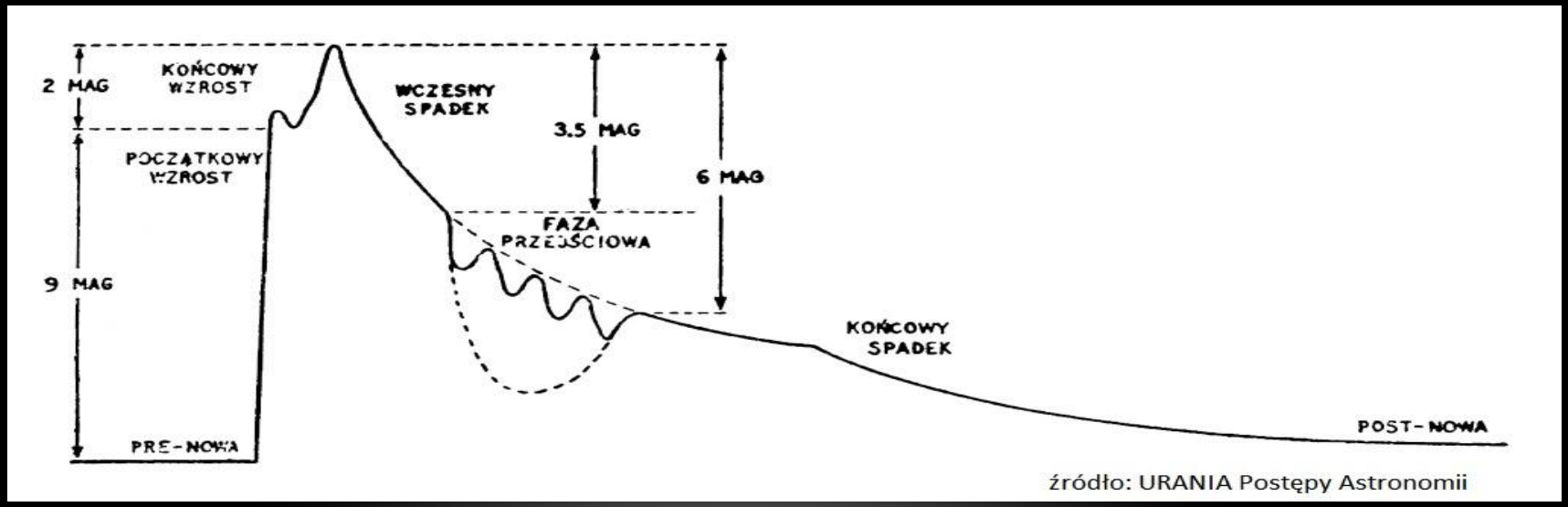
- Obserwacje fotometryczne i spektroskopowe wskazują, że wszystkie gwiazdy nowe to układ podwójny składający się z białego karła i gwiazdy ciągu głównego lub nieco odewoluowanej gwiazdy.

- Akrecja materii na białego karła, który w wyniku procesów ewolucyjnych jest niemal całkowicie pozbawiony termojądrowego ,,paliwa" wodorowego, doprowadza do systematycznego wzrostu zawartości wodoru w jego warstwie powierzchniowej.

- Wskutek obecności silnego pola grawitacyjnego gaz gromadzący się na powierzchni białego karła znajduje się w stanie zdegenerowanym, tzn. jego gęstość w niewielkim stopniu zależna jest od jego temperatury. Gdy ilość dostarczonego wodoru przekroczy wartość krytyczną jego temperatura podnosi się do wartości wystarczającej do zapoczątkowania reakcji termojądrowych.

NOWE KLASYCZNE

- Mechanizm wybuchu to eksplozja termojądrowa na powierzchni białego karła.
- Charakteryzują się szybkim i nieprzewidywalnym wzrostem jasności o 7 – 16 mag w ciągu kilku dni. Po wybuchu następuje stały spadek jasności do stanu z przed wybuchu w ciągu kilku miesięcy.



źródło: URANIA Postępy Astronomii

NOWE KLASYCZNE

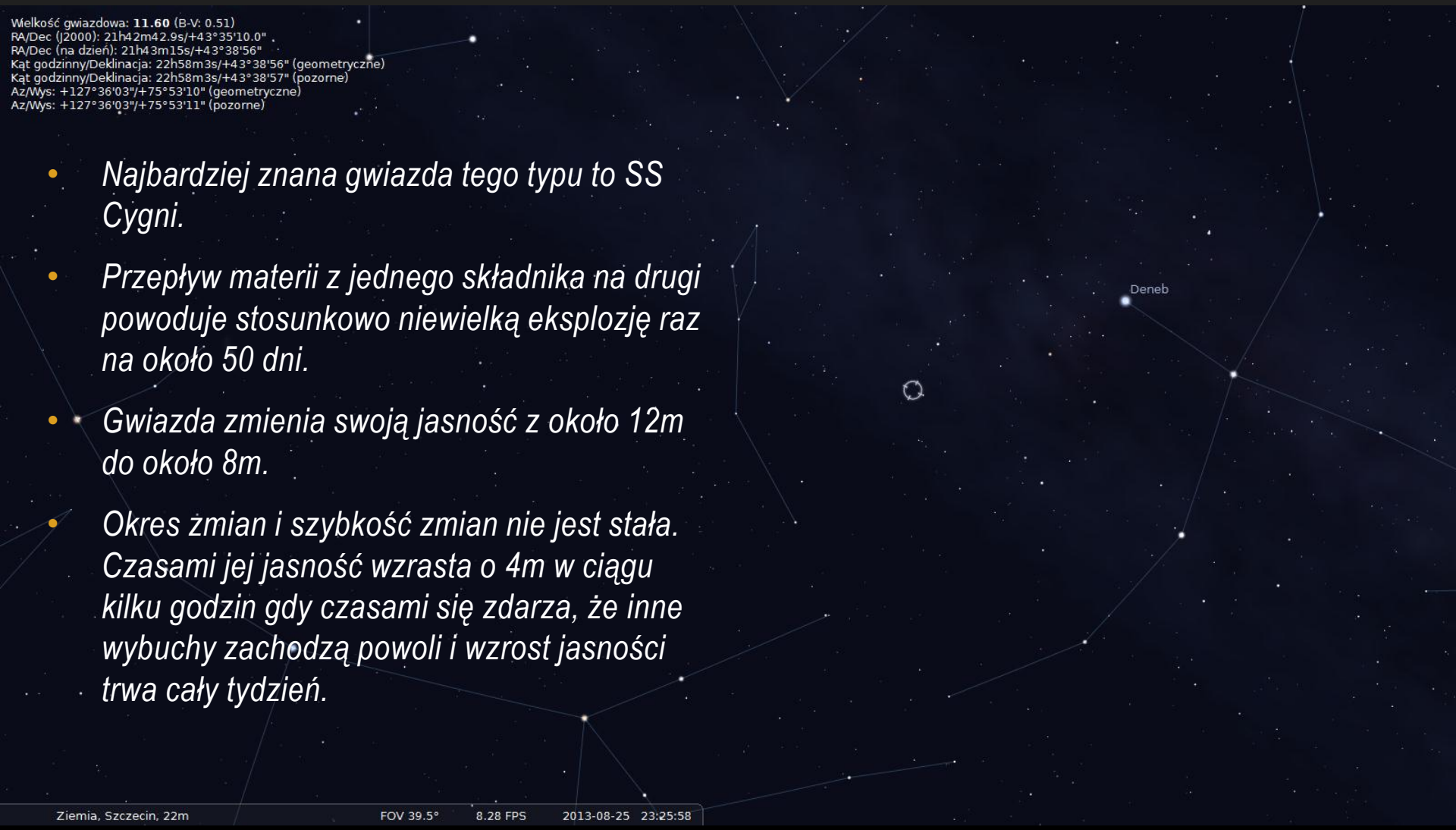
- Wbrew dawniejszym poglądom układ kataklizmiczny nie ponosi istotnego uszczerbku w wyniku wybuchu i po pewnym czasie powraca do pierwotnego stanu ,,stacjonarnego”. W pewnej liczbie przypadków udało sią nawet zaobserwować wielokrotne wybuchy nowych w tym samym układzie (tzw. nowe powrotne - ,,Recurrent Novae”)

NOWE KARŁOWATE

- Nowa karłowata to ciasny układ, złożony z gwiazdy podobnej do naszego Słońca i białego karła, ściągającego materię ze swojej towarzyszki. Nowe karłowate charakteryzują się wielokrotnymi wybuchami, w trakcie których ich jasność wzrasta przeciętnie w zakresie od 2 do 5 wielkości gwiazdowych.

- *Są to układy ze stosunkowo małą szybkością przepływu masy. Charakterystyczne dla nowych karłowatych są gwałtowne pojaśnienia ich blasku trwające przez kilka dni i powtarzające się w niezbyt regularnych odstępach czasu rzędu tygodni, miesięcy lub lat. Mechanizm rozbłysków nowych karłowatych wytłumaczyć można niestabilnościami dysku akrecyjnego i nieregularnościami w przepływie materii przez dysk - po okresach w których akrecja praktycznie zanika pojawiają się okresy gwałtownie wzmożonej akrecji. Do nowych karłowatych zalicza się m.in. gwiazdy typu U Gem (historycznie pierwsze odkryte układy kataklizmiczne), gwiazdy typu Z Cam oraz SU UMa.*

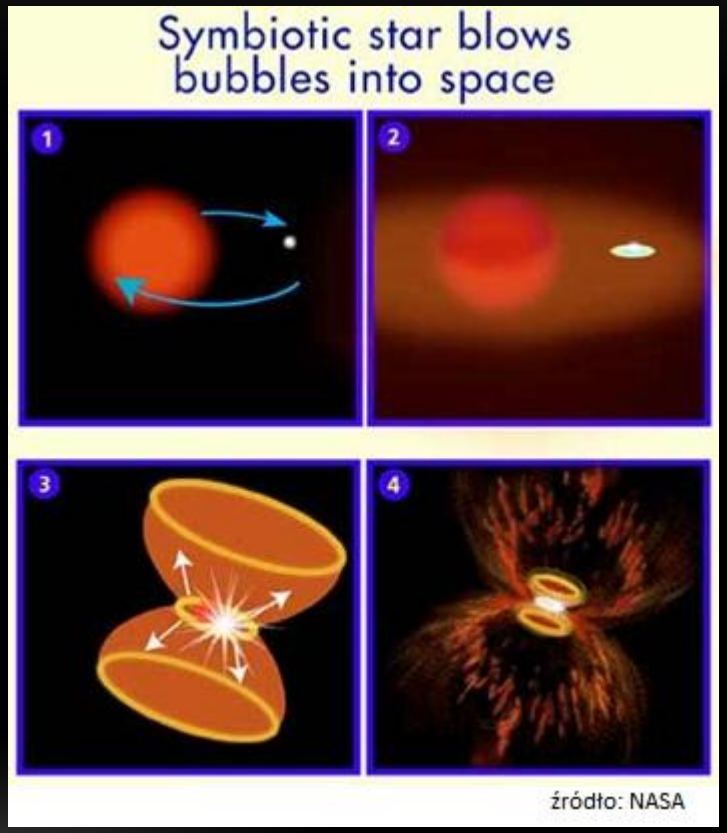
NOWE KARŁOWATE



- *Najbardziej znana gwiazda tego typu to SS Cygni.*
- *Przepływ materii z jednego składnika na drugi powoduje stosunkowo niewielką eksplozję raz na około 50 dni.*
- *Gwiazda zmienia swoją jasność z około 12m do około 8m.*
- *Okres zmian i szybkość zmian nie jest stała. Czasami jej jasność wzrasta o 4m w ciągu kilku godzin gdy czasami się zdarza, że inne wybuchy zachodzą powoli i wzrost jasności trwa cały tydzień.*

GWIAZDY SYMBIOTYCZNE

- Są to systemy składające się z czerwonego olbrzyma i białego karła lub małomasywnej gwiazdy ciągu głównego.
- Czerwony olbrzym odrzuca dużo materii. Krążący towarzysz swoim polem grawitacyjnym skupia tą odrzucaną materię w płaszczyźnie równikowej olbrzyma.
- Biały karzeł ściąga część tej materii na siebie tworząc dysk akrecyjny.
- Gdy na powierzchni białego karła nazbiera się wystarczająca ilość materii następuje wybuch.
- Wybuch tworzy bąble z odrzuconej przez olbrzyma, skupionej w płaszczyźnie równikowej materii.



GWIAZDY SYMBIOTYCZNE

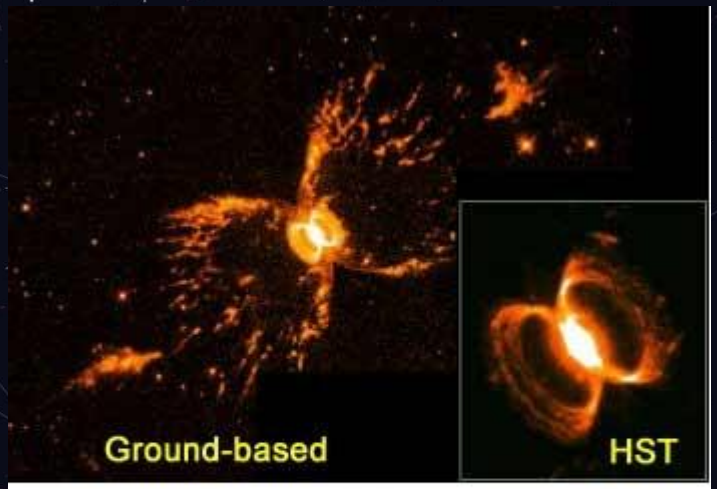
HIP 116287

Wielkość gwiazdowa: **10.55** (B-V: 1.11)
Absolutna wielkość gwiazdowa: 2.40
RA/Dec (J2000): 23h33m40.0s/+48°49'06.0"
RA/Dec (na dzień): 23h34m20s/+48°53'37"
Kąt godzinny/Deklinacja: 21h59m12s/+48°53'37" (geometryczne)
Kąt godzinny/Deklinacja: 21h59m12s/+48°53'38" (pozorne)
Az/Wys: +91°17'12"/+70°40'59" (geometryczne)
Az/Wys: +91°17'12"/+70°41'02" (pozorne)
Typ widmowy: M2III_+_B1eq
Odległość: 1393.83 lat świetlnych
Paralaksa: 0.00234"

- Prototypem gwiazd symbiotycznych jest *Z Andromedae*
- Zmienia ona swą jasność w zakresie 8,0-12,4^{m}.
- W układzie tej gwiazdy podwójnej występuje chłodny czerwony olbrzym typu widmowego M6 i gorący biały karzeł.
- Masa mniejszego składnika to 0,6 masy Słońca, a promień stanowi 0,5 promienia Słońca. Jego temperatura powierzchniowa to ok. 26 000K, a jasność to wartość 0,04 jasności Słońca.
- Krążąc wokół czerwonego olbrzyma, biały karzeł pochłania pewną cześć materii swego towarzysza, która opada na jego powierzchnię. Co pewien czas następuje jej wybuch, który obserwujemy jako wzrost jasności układu **Z Andromedae**.

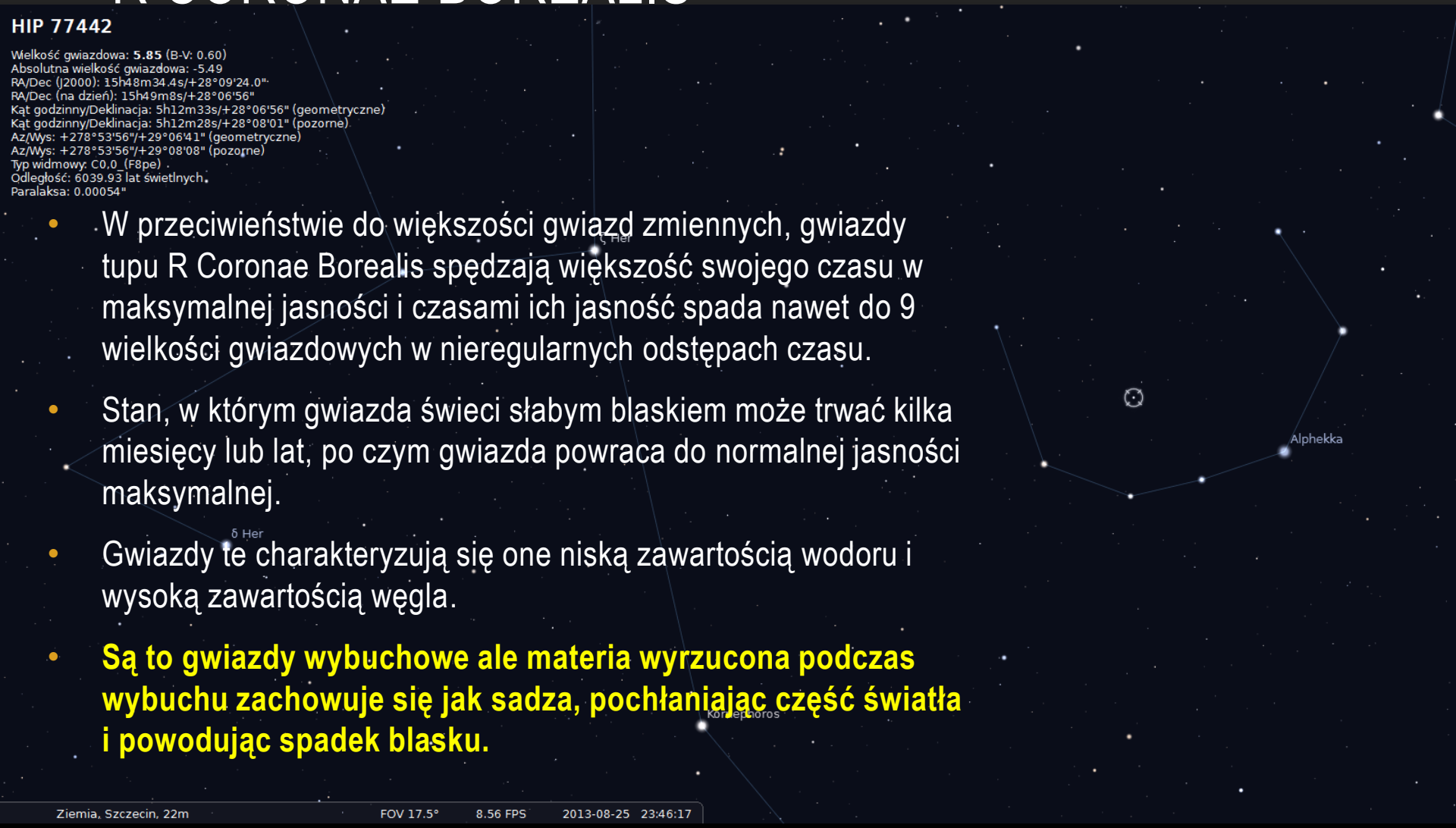
Ziemia, Szczecin, 22m FOV 47.4° 7.59 FPS 2013-08-26 00:18:03

- .



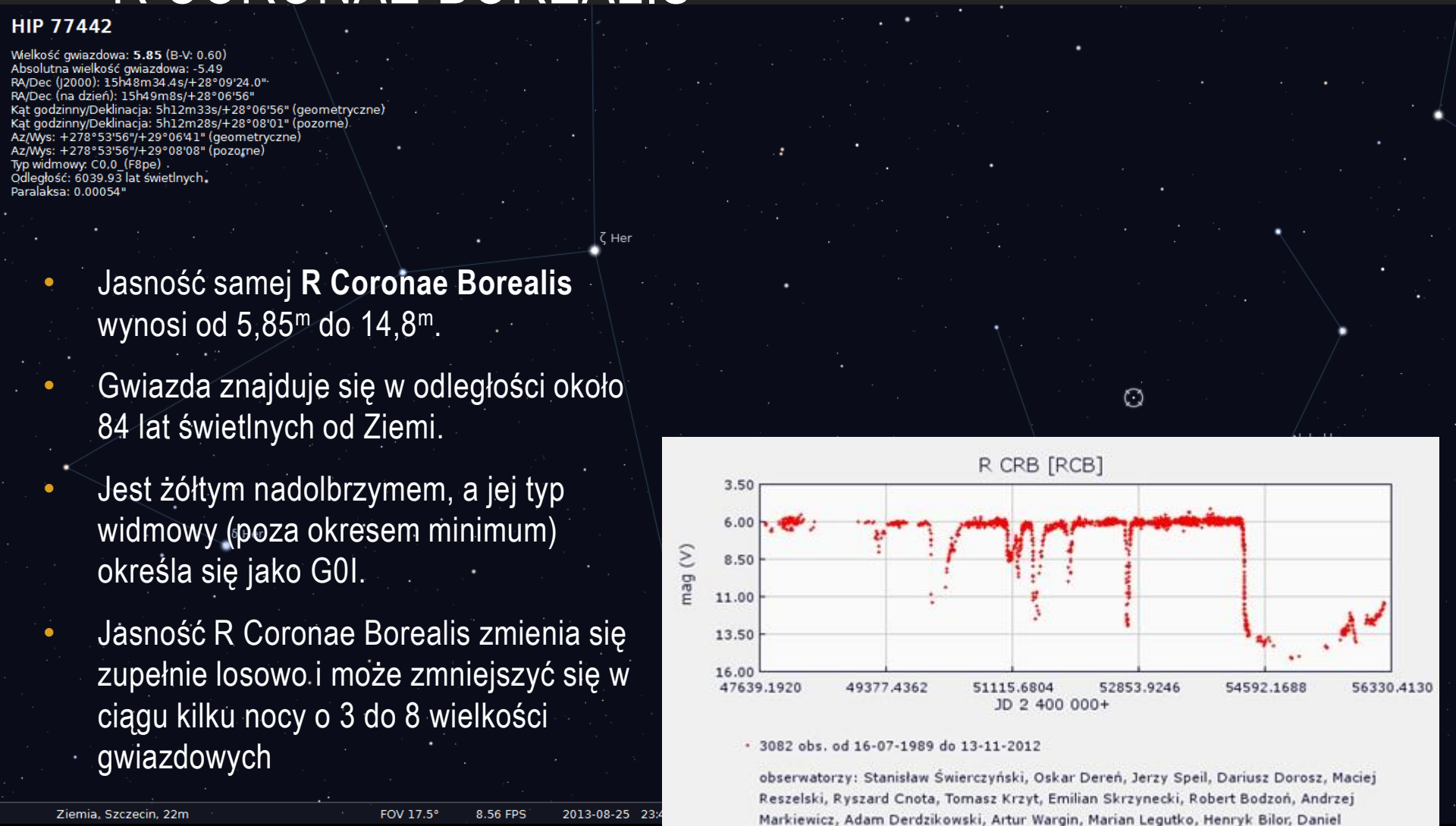
Credit: Romano Corradi, Instituto de Astrofisica de Canarias, Tenerife, Spain; Mario Livio, Space Telescope Science Institute, Baltimore, Md.; Ulisse Munari, Osservatorio Astronomico di Padova-Asiago, Italy; Hugo Schwarz, Nordic Optical Telescope, Canarias, Spain; and NASA

R CORONAE BOREALIS

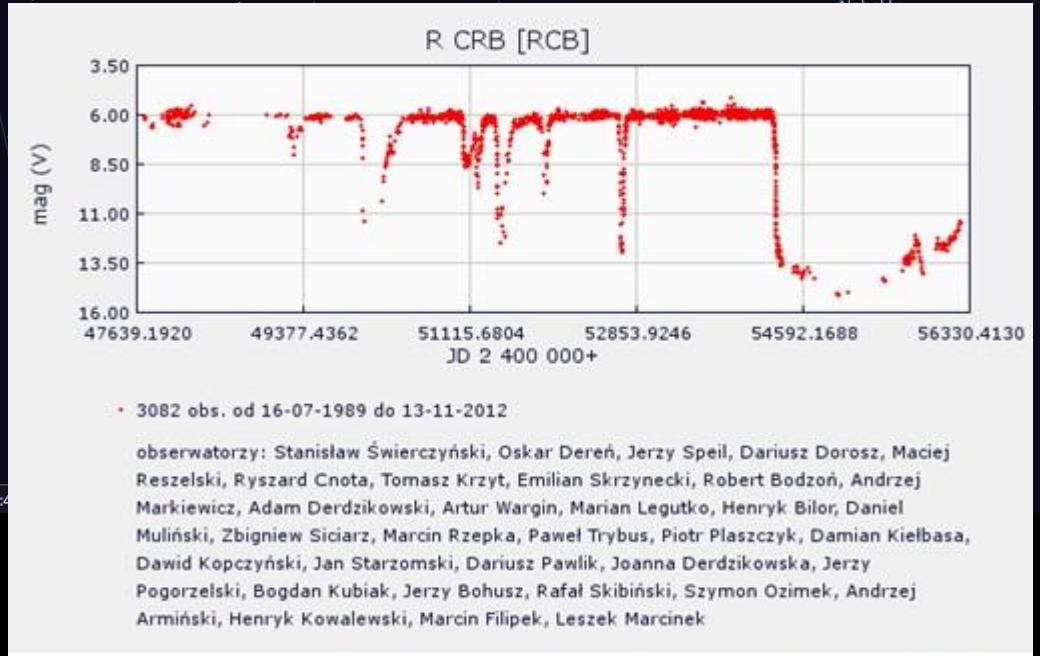


- W przeciwieństwie do większości gwiazd zmiennych, gwiazdy tupu R Coronae Borealis spędzają większość swojego czasu w maksymalnej jasności i czasami ich jasność spada nawet do 9 wielkości gwiazdowych w nieregularnych odstępach czasu.
- Stan, w którym gwiazda świeci słabym blaskiem może trwać kilka miesięcy lub lat, po czym gwiazda powraca do normalnej jasności maksymalnej.
- Gwiazdy te charakteryzują się one niską zawartością wodoru i wysoką zawartością węgla.
- **Są to gwiazdy wybuchowe ale materia wyrzucona podczas wybuchu zachowuje się jak sadza, pochłaniając część światła i powodując spadek blasku.**

R CORONAE BOREALIS



- Jasność samej **R Coronae Borealis** wynosi od $5{,}85^m$ do $14{,}8^m$.
- Gwiazda znajduje się w odległości około 84 lat świetlnych od Ziemi.
- Jest żółtym nadolbrzymem, a jej typ widmowy (poza okresem minimum) określa się jako G0I.
- Jasność R Coronae Borealis zmienia się zupełnie losowo i może zmniejszyć się w ciągu kilku nocy o 3 do 8 wielkości gwiazdowych



źródło: http://sswdob.republika.pl

SUPERNOWE

- Supernowe to eksplodujące gwiazdy, najpotężniejsze znane wybuchy we Wszechświecie.
- Dwa podstawowe mechanizmy wybuchu supernowej to:

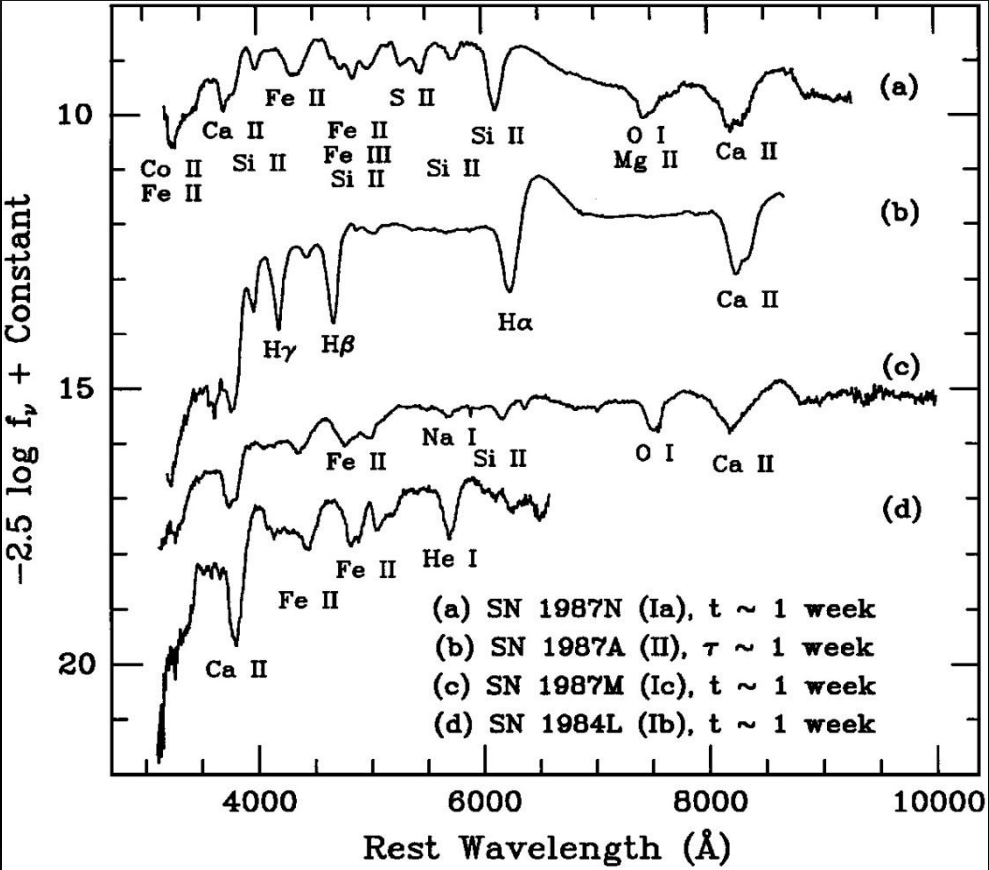
  - implozja w wyniku kolapsu grawitacyjnego (jądro masywnej gwiazdy zapada się szybkością dziesiątków tysięcy kilometrów na sekundę)

  - wybuch termojądrowy – wybuch białego karła, składającego się z mieszaniny 50% węgla (C) i 50% tlenu (O). .

SUPERNOWE

Klasyfikacja

- Próbując wyjaśnić pochodzenie supernowych, astronomowie podzielili je ze względu na występowanie różnych linii absorpcyjnych w ich widmie.
- Głównym kryterium klasyfikacji jest występowanie linii wodoru. Jeśli widmo supernowej zawiera ślady tego pierwiastka zalicza się ją do typu II, w przeciwnym wypadku – do typu I.

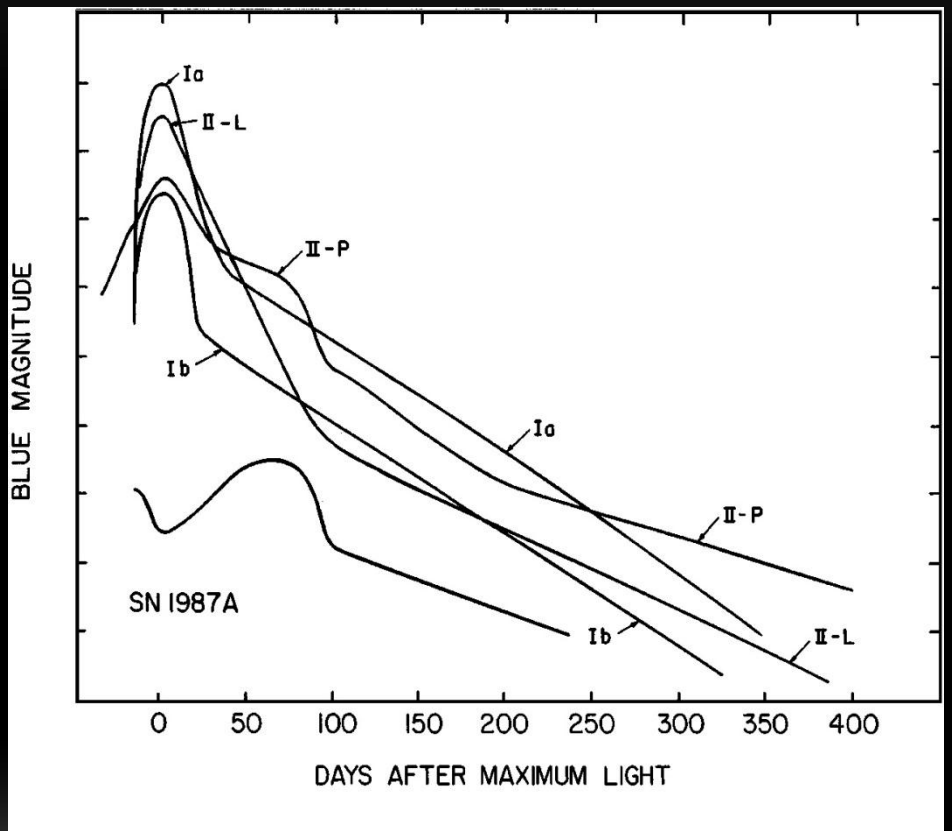


źródło: Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1997 Alexei V. Filippenko OPTICAL SPECTRA OF SUPERNOVAE

SUPERNOWE

Klasyfikacja

- Wewnątrz głównych typów wyróżnia się jeszcze kilka podtypów, w zależności od występowania innych linii widmowych, bądź kształtu krzywej blasku:
- Typ I – brak linii wodoru
  - Typ Ia – linie Si II na 615,0 nm
  - Typ Ib – linie He I na 587,6 nm
  - Typ Ic – słabe lub brak linii helu
- Typ II – obecne linie wodoru
  - Typ II-P
  - Typ II-L
- Wg aktualnej wiedzy supernowe implozyjne obejmują typy: Ib/c, IIb, II-L, II-P, Iin, a supernowe Ia to supernowe termojądrowe

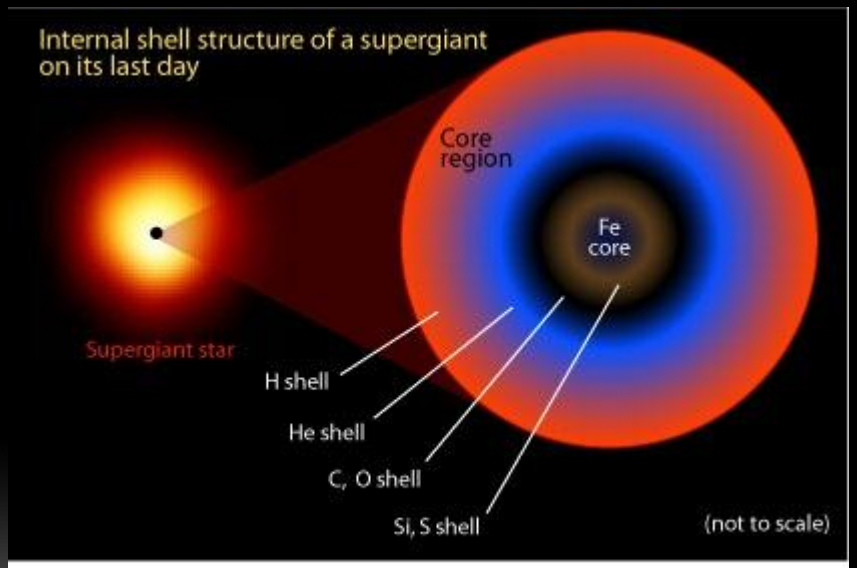


źródło: Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1997 Alexei V. Filippenko OPTICAL SPECTRA OF SUPERNOVAE

SUPERNOWE

Supernowa implozyjna

- Gwiazda o masie większej niż 8x masa Słońca spala kolejne paliwa termojądrowe aż do żelaza (żelazo nie jest paliwem termojądrowym)

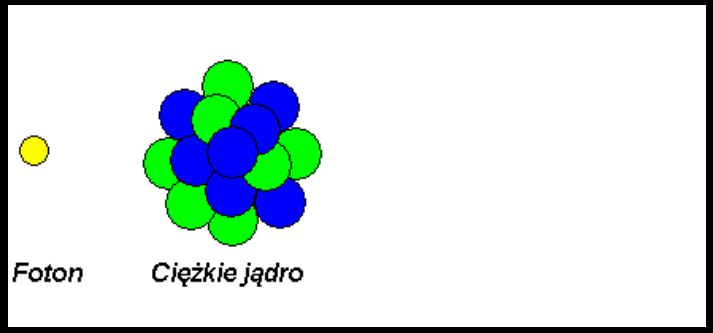


źródło Australia Telescope Outreach and Education

SUPERNOWE

Supernowa implozyjna

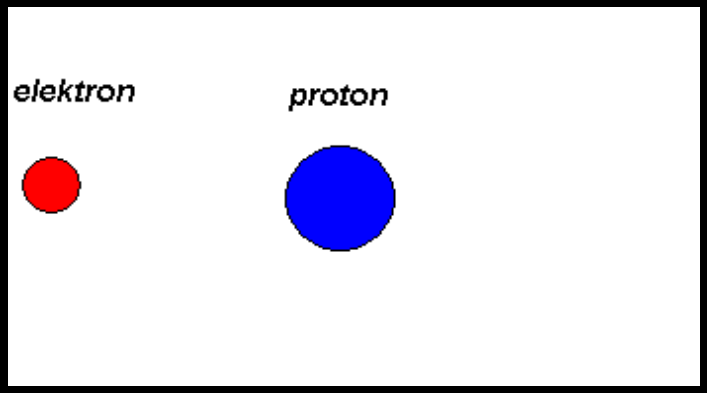
- W ostatnich etapach istnienia masywnej gwiazdy, po wypaleniu krzemu i zatrzymaniu reakcji termojądrowych w jądrze, zmniejsza się i zanika ciśnienie promieniowania – żelazowe jądro traci stabilność i zaczyna się kurczyć pod wpływem grawitacji. Powoduje to wzrost temperatury jądra.
- Gdy temperatura w jądrze gwiazdy dojdzie do 10 mld K (10^{10}K) pod wpływem wysoko energetycznych fotonów gamma żelazo ulega procesowi **fotodezintegracji** (photodisintegration, fotorozpad) zwalniając protony i cząstki alfa (jądra helu). Jądra atomów żelaza po prostu się rozpadają.
- Taka reakcja raczej pochłania energię niż ją uwalnia dlatego ciśnienie w jądrze spada.
- Na skutek obniżania ciśnienia i bardzo silnej grawitacji żelazowe jądro kurczy się (a raczej się zapada) **z prędkością dziesiątek tysięcy kilometrów na sekundę.**



SUPERNOWE

Supernowa implozyjna

Zdegenerowane elektrony nie mogąc złamać zakazu Pauliego, ściskane siłami grawitacji reagują z protonami powstałymi w wyniku fotorozpadu (fotodezintegracji).



Zachodząca reakcja

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

wychwytuje wszystkie zdegenerowane elektrony w jądrze. Ten proces nosi nazwę **neutronizacja- odwrotny rozpad beta** (w warunkach zdegenerowanego gazu neutronów reakcja jest nieodwracalna)

Znika ciśnienie zdegenerowanych elektronów, zapadanie jądra trwa dalej.

SUPERNOWE

Supernowa implozyjna

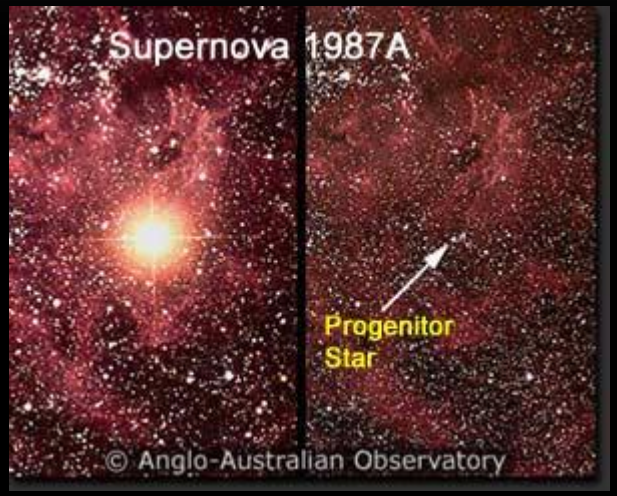
- **Gdy temperatura dojdzie do 1 biliona K** (10^{12} K) neutrony stają się zdegenerowane.
- Ciśnienie zdegenerowanych neutronów (Zakaz Pauliego) gwałtownie zatrzymuje zapadanie jądra (to zatrzymanie trwa około 1 ms).
- Otaczająca materia wciąż się zapada i uderza w lite, sztywne jądro tworząc ogromną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

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

SUPERNOWE

Supernowa implozyjna

- Większość energii jest uwalniana w postaci neutrin, tylko 1 % to widzialne światło.
- To wystarcza żeby **gwiazda pojaśniała 100 mln razy** przewyższając blaskiem całą galaktykę przez kilka dni do kilku tygodni.



SUPERNOWE

Supernowa implozyjna - fabryka pierwiastków

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

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

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

SUPERNOWE

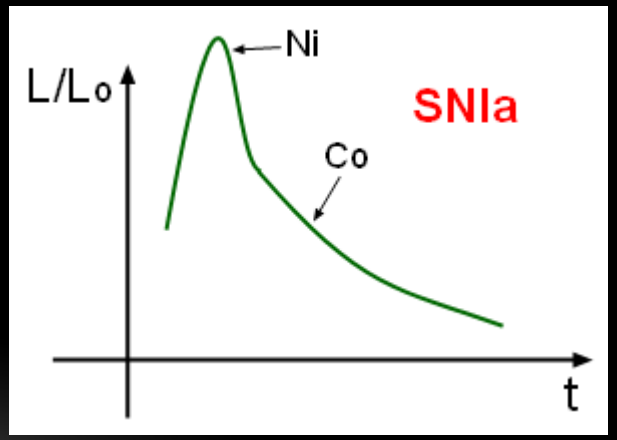
Standardowy mechanizm supernowej typu Ia termojądrowej

- Supernowe Ia są eksplozjami termojądrowymi białych karłów CO o masie bliskiej masy Chandrasekhara.
- Biały karzeł jest obiektem dosyć egzotycznym, posiada masę rzędu masy Słońca i promień porównywalny z ziemskim. Elektronowy gaz zdegenerowany, którego ciśnienie powstrzymuje przyciąganie grawitacyjne, zachowuje się w sposób możliwy do wyjaśnienia jedynie na gruncie mechaniki kwantowej (zakaz Pauliego) i szczególnej teorii względności.
- Eksplozja następuje w wyniku powolnej akrecji na powierzchnię białego karła materii pochodzącej z drugiego składnika. Skutkiem akrecji jest wzrost masy, zmniejszanie rozmiarów i wzrost temperatury, szczególnie w rejonach centralnych, gdzie gęstość jest największa
- Biały karzeł węglowo tlenowy (CO), którego masa w wyniku akrecji z gwiazdy towarzyszącej rośnie zbliżając się do wartości 1,38 masy Słońca (limit Chandrasekhara) , ulega samozapłonowi w rejonie centralnym.
- Dochodzi do połączenia jąder atomowych węgla i tlenu, w wyniku czego powstają (w przypadku zachodzenia kompletnej reakcji) jądra radioaktywnego niklu:
- $2\ ^{12}C + 2\ ^{16}O \rightarrow\ ^{56}Ni$ + energia
- Reakcja z reguły nie jest kompletna dlatego w wyniku syntezy *termojądrowej* tlenu i węgla powstają też jądra atomów znajdujących się w tablicy Mendelejewa poniżej żelaza.

SUPERNOWE

Standardowy mechanizm supernowej typu Ia termojądrowej

- Całkowita energia wyzwolona na skutek wspomnianej powyżej reakcji w białym karle o masie 1,38 masy Słońca wynosi około 2×10^{44} J
- **Gwiazda ulega całkowitemu zniszczeniu,** pozostaje po niej mgławica, składająca się głównie z radioaktywnego niklu, który rozpada się przez radioaktywny kobalt do żelaza.
- Jasność absolutna w maksimum blasku wynosi -19,3 (badania przeprowadzone przy użyciu coraz bardziej precyzyjnych instrumentów wykazały wariacje w jasności wynoszącą +-0,3m)



SUPERNOWE

- Definicje różnych rodzajów wybuchów
- **Detonacja** – jest to wybuch rozprzestrzeniający się w materiale wybuchowym z maksymalną możliwą prędkością (ponaddźwiękową lub hiperdźwiękową) dla danego materiału Jest to najdoskonalszy rodzaj wybuchu
- **Eksplozja** to wybuch rozprzestrzeniający się z prędkością mniejszą niż prędkość maksymalna dla danego materiału.
- **Deflagracja** (zwana też dawniej **wybuchem właściwym**) – to spalanie, które propaguje się w danym materiale z prędkością mniejszą niż wynosi prędkość dźwięku w danym materiale. Mechanizm deflagracji polega na przekazywaniu energii termicznej poprzez promieniowanie i przewodzenie ciepła od warstwy, w której zachodzi utlenianie do dalszych warstw. Przekazywana energia wywołuje reakcję w kolejnych warstwach materiału. Deflagracja w odpowiednich warunkach, może przechodzić w eksplozję lub nawet detonację.

SUPERNOWE

Standardowy mechanizm supernowej typu Ia termojądrowej

- Nadal nie mamy poprawnego i spójnego z prawami fizyki modelu samego wybuchu termojądrowego supernowej typu Ia.
- Jeden z modeli wybuchu supernowej Ia zaproponował polski astrofizyk Tomasz Plewa, pracujący wtedy na Uniwersytecie w Chicago,
- zaproponował niezwykle interesujący model **DFD** (ang. *Detonating Failed Deflagration*, detonacja nieudanej deflagracji).
- Od pewnego czasu wiadomo było, że wybuch termojądrowy w polu grawitacyjnym prowadzi do sferycznie rozchodzącego się płomienia tylko wtedy, gdy zapłon nastąpi prawie idealnie w centrum idealnie symetrycznego białego karła. W praktyce, zapłon w niewielkiej odległości, rzędu kilkunastu kilometrów od centrum (biały karzeł ma promień około 2000 km), powoduje powstanie płomienia kształtem przypominającego raczej grzyb atomowy.

SUPERNOWE

Standardowy mechanizm supernowej typu Ia termojądrowej

- Wybuch centralny nie wyprodukuje energii wystarczającej do rozerwania białego karła, ale spali sporo węgla i tlenu oraz zdeformuje go. Ponieważ „grzyb” unosi się cały czas do góry, wcześniej czy później musi „wyskoczyć” (dochodzi do tego po około sekundzie) na powierzchnię.
- W tym momencie na powierzchni gwiazdy tworzą się ogromne rozchodzące się koncentrycznie fale. Przypominają one ziemskie fale tsunami.
- Na powierzchni białego karła nie ma jednak gór czy kontynentów. Rozchodzące się fale, nie napotykając na żadne przeszkody, obiegają (w czasie kilku sekund) powierzchnię gwiazdy i zderzają się w punkcie znajdującym się na antypodach.
- Zogniskowana energia jest wystarczająco duża, aby powstała fala uderzeniowa zadziałała jak zapalnik i pobudziła białego karła do detonacji. Fala detonacyjna w ułamku sekundy spala to, co pozostało po wcześniejszej, nieudanej deflagracji.
- Całe to zjawisko, od zapłonu deflagracji do wygaśnięcia detonacji, trwa około 5 sekund.

Polecam publikację dr Andrzeja Odrzywołka „Polski model supernowej”

SUPERNOWA TYPU IA

Animacja modelu DFD

Animacja jest do pobrania z tego miejsca:
http://flash.uchicago.edu/~jbgallag/wd_det_8km_16rb_80off_movies/wd_det_8km_16rb_80off_temp_dens_1024x768_label.mpeg

Źródło: http://flash.uchicago.edu

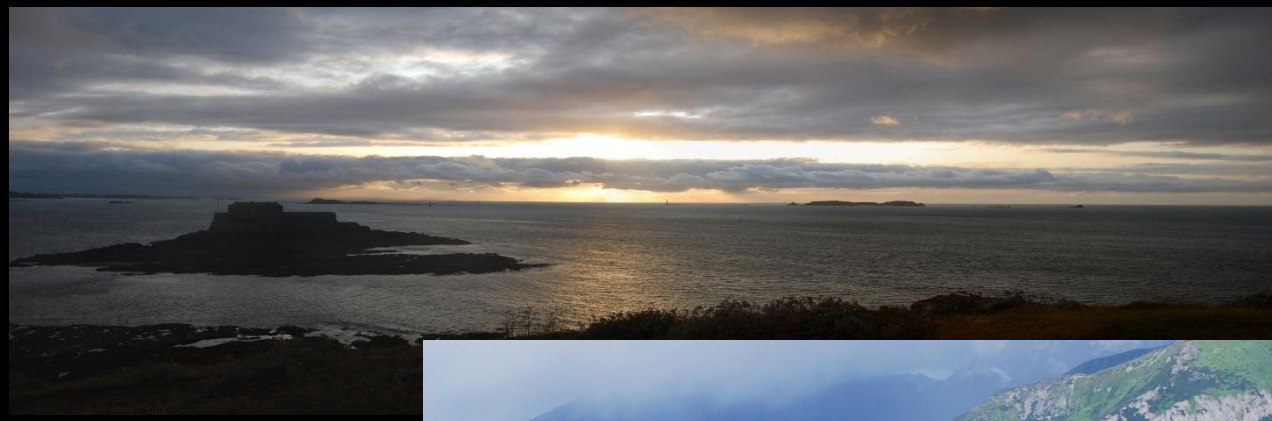
SUPERNOWA

- Model wcześniej przedstawiony nie wyjaśnia wszystkich znanych zjawisk związanych z wybuchem supernowej Ia.
- Jeżeli biały karzeł wybucha w wyniku akrecji materii z sąsiedniej gwiazdy a ta akreowana materia to głównie wodór to nikt nie potrafi wyjaśnić powodu z jakiego brak jest linii absorbcyjnych wodoru w widmie supernowej Ia.

- Istnieją alternatywne teorie wyjaśniające wybuchy supernowych termojądrowych
- Jedna z nich mówi o tym, że supernowa Ia to eksplodujący biały karzeł o masie mniejszej niż granica Chandrasekhara. Impulsem detonacji jest wybuch termojądrowy helu na powierzchni białego karła, pochodzącego z akrecji z gwiazdy towarzyszącej.
- Inna teoria mówi o zderzeniu dwóch białych karłów. W układzie dwóch karłów, w wyniku postępującego zbliżania się lżejszy składnik ulega rozerwaniu w polu sił pływowych cięższego. Powstaje dysk akrecyjny i gwałtowne powiększanie się masy centralnego składnika. Model ten w oczywisty sposób wyjaśnia brak H i He: po prostu ich tam nie ma. Wariacja w jasności może być pochodną sumy mas składników.

ZNACZENIE SUPERNOWYCH

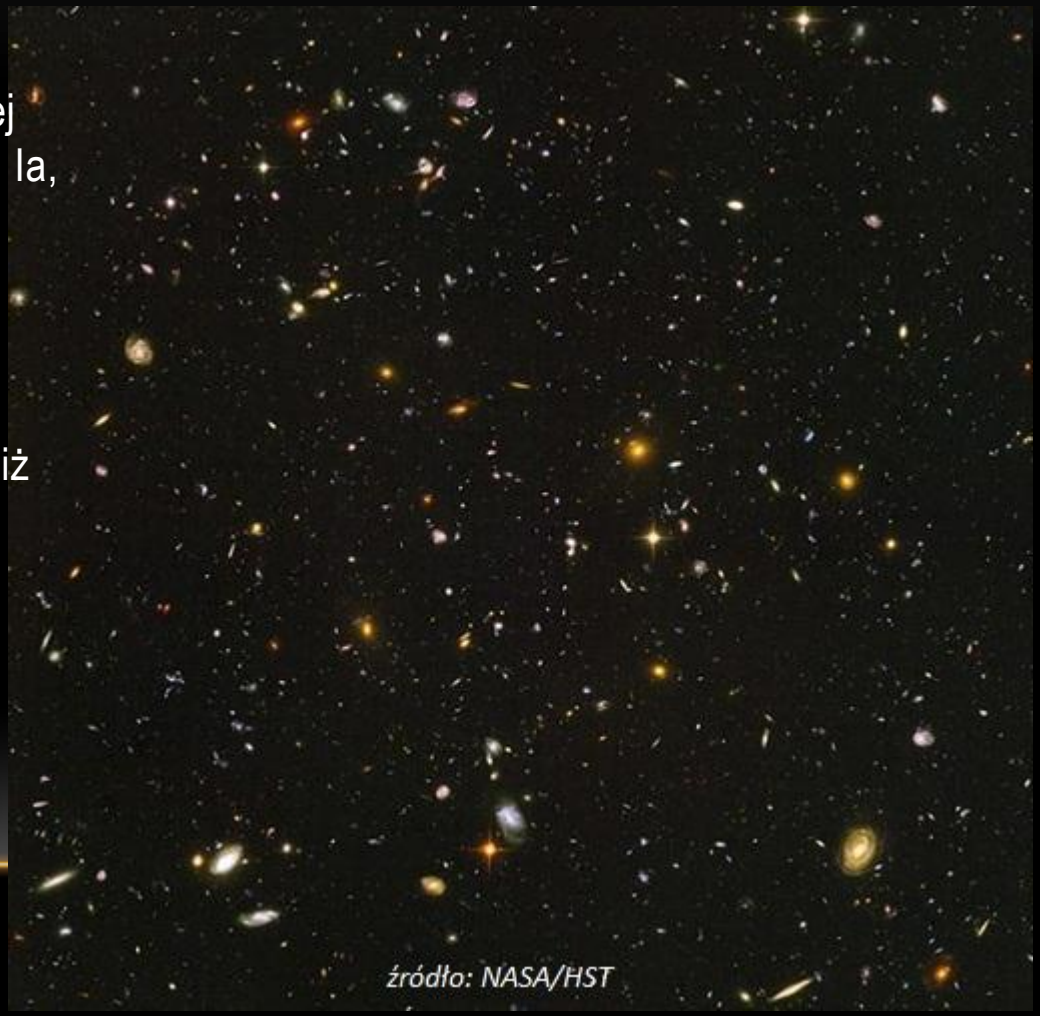
Każdy atom cięższy od żelaza we wszystkim co nas otacza powstał w jądrze masywnej gwiazdy wyniku wybuchu supernowej implozyjnej.



ZNACZENIE SUPERNOWYCH

Dzięki w przybliżeniu stałej jasności absolutnej osiąganej przez wybuchającą supernową typu Ia, wybuchy te są wykorzystywane do określania odległości pozagalaktycznych.

Biorąc pod uwagę ich zdecydowanie wyższą jasność absolutną, gwiazdy te służą do wyznaczania odległości znacznie większych niż Cefeidy.



OZNACZANIE GWIAZD ZMIENNYCH

System oznaczania gwiazd zmiennych opracował Friedrich Argelander.

Pierwsza gwiazda zmienna w danej konstelacji ma oznaczenie R, druga S i dalej aż do Z.

Dalsze gwiazdy mają oznaczenia dwuliterowe od AA do QZ. Daje to możliwość oznaczenia 334 gwiazd w każdym gwiazdozbiorze. Dalsze gwiazdy mają oznaczenie V335 itd.

MIEJSCA W SIECI, KTÓRE WARTO ODWIEDZIĆ

- http://www.aavso.org/ - Amerykańskie Stowarzyszenie Obserwatorów Gwiazd Zmiennych AAVSO
- http://sogz-ptma.astronomia.pl/ - Sekcja Obserwatorów Gwiazd Zmienny przy PTMA
- http://sswdob.republika.pl/ - PTMA - Wizualne obserwacje gwiazd zmiennych

Można tam znaleźć wiele cennych informacji jak rozpocząć zabawę z obserwacjami gwiazd zmiennych

PODZIĘKOWANIA

Dziękuję Henrykowi Kowalewskiemu za korekty i cenne wskazówki.

BIBLIGRAFIA

- http://outreach.atnf.csiro.au/education/senior/astrophysics/binary_variabletop.html
- http://sswdob.republika.pl
- Eugeniusz Rybka „Astronomia Ogólna”
- David H. Levy „Niebo Poradnik użytkownika”
- Wojciech Borczyk - BADANIE GWIAZD KATAKLIZMICZNYCH NA PODSTAWIE RÓWNOCZESNYCH OBSERWACJI ULTRAFIOLETOWYCH I RENTGENOWSKICH
- *Alexei V. Filippenko* - OPTICAL SPECTRA OF SUPERNOVAE
- *Andrzej Odrzywołek* - **Polski model supernowej**
- Andrzej Odrzywołek - 400 lat bez eksplozji supernowej. Kiedy następna?
- http://flash.uchicago.edu
- Stellarium
- Wikipedia

Dziękuję za uwagę ☺