

Obserwacje gwiazd

- Astrometria
 - Odległości gwiazd
 - Ruchy gwiazd (prędkości poprzeczne)
- Fotometria
 - Jasności gwiazd
 - Temperatury
 - Rozmiary orbit i składników układów podwójnych
- Spektroskopia
 - Skład chemiczny, temperatura, ciśnienie
 - Prędkości radialne
 - Masy gwiazd
- Interferometria, Polarymetria

Parametry fizyczne gwiazd

- Jasność
- Temperatura
- Rozmiary, kształt
- Masa
- Gęstość, ciśnienie, równanie stanu
- Skład chemiczny
- Wiek – status ewolucyjny

Odległość

Jasność gwiazd

$$f = \frac{L}{4 \pi d^2}$$

f – strumień promieniowania

L – jasność (moc promieniowania)

d – odległość

$$L_{sun} = 4 \pi d^2 f$$

Przykład: jasność Słońca

$$f = 1367 \text{ W/m}^2$$

$$d = 1.496 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$\begin{aligned} L_{sun} &= 4 \times 3.14 \times (1.5 \times 10^{11} \text{ m})^2 \times 1367 \text{ W/m}^2 \\ &= 3.845 \times 10^{26} \text{ W} \end{aligned}$$

Jasność gwiazd

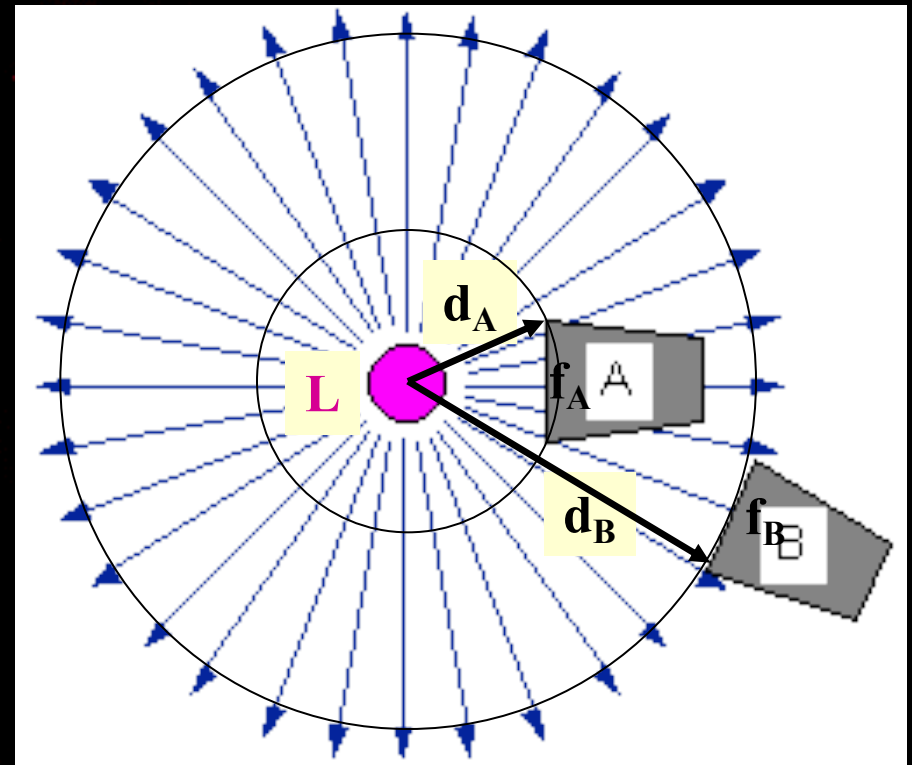
$$f = \frac{L}{4\pi d^2}$$

f – strumień promieniowania

L – jasność (moc promieniowania)

d – odległość

$$L_{sun} = 4\pi d^2 f$$



Wielkości gwiazdowe

– magnitudo (mag^m)

- najjaśniejsze gwiazdy widoczne gołym okiem
 - „pierwszej” wielkości: magnitudo 1 ($m_1=1$), strumień f_1
- najśłabsze gwiazdy widoczne gołym okiem
 - „szóstej” wielkości : magnitudo 6 ($m_6=6$), strumień f_6
- pomiary strumienia promieniowania pokazują, że
 - $f_1 / f_6 = 100$, ale:
 - $\log(100) = 2$
 - $2.5 \log(100) = 5 = 6 - 1$, zatem:
 - $2.5 \log (f_1/f_6) = m_6 - m_1$, lub:
 - $- 2.5 \log (f_6/f_1) = m_6 - m_1$

Wielkości gwiazdowe – magnitudo (mag^m)

- prawo Pogsona:

$$m_A - m_B = -2.5 \log (f_A/f_B)$$

- „rozcieńczanie” strumienia:

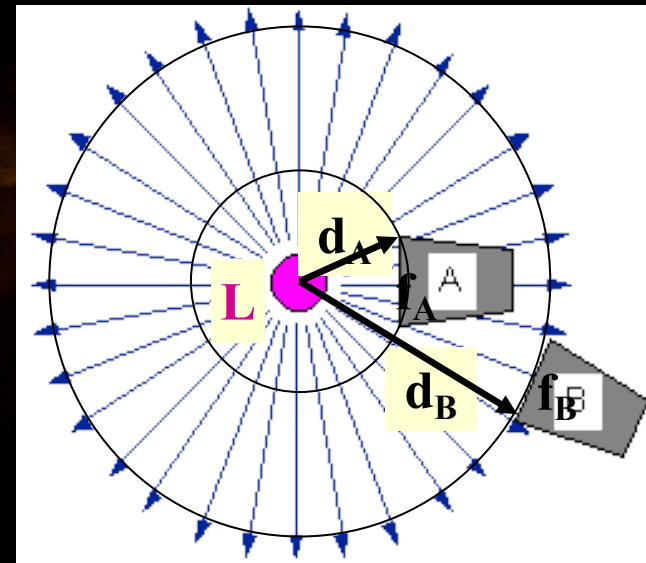
$$f_0 / f = d^2 / d_0^2$$

- jasność absolutna M :

$$\text{dla } d_0 = 10 \text{ pc}$$

- moduł odległości:

$$m - M = -5 + 5 \log_{10}(d)$$



Sumowanie jasności

dwa źródła o strumieniach f_1 i f_2

wzorzec f_0 , $m_0 = 0$

$$m_1 = -2.5 \log (f_1/f_0)$$

$$m_2 = -2.5 \log (f_2/f_0)$$

strumień całkowity:

$$f_{1+2} = f_1 + f_2$$

całkowita wielkość gwiazdowa:

$$m_{1+2} = -2.5 \log (f_{1+2}/f_0) \neq m_1 + m_2$$

Sumowanie jasności

dwie gwiazdy o wielkościach m_1 i m_2

wzorzec f_0 , $m_0 = 0$

$$m_1 = -2.5 \log (f_1/f_0) \rightarrow f_1 = f_0 10^{(-0.4 m_1)}$$

$$m_2 = -2.5 \log (f_2/f_0) \rightarrow f_2 = f_0 10^{(-0.4 m_2)}$$

strumień całkowity:

$$f_{1+2} = f_1 + f_2 = f_0 (10^{-0.4 m_1} + 10^{-0.4 m_2})$$

całkowita wielkość gwiazdowa:

$$m_{1+2} = -2.5 \log (f_{1+2}/f_0)$$

$$\mathbf{m_{1+2} = -2.5 \log (10^{-0.4 m_1} + 10^{-0.4 m_2})}$$

Wielkości gwiazdowe

- jasność bolometryczna: m_{bol}
 - całkowity strumień we wszystkich zakresach widma
- jasność wizualna: m_v
- jasność fotograficzna: m_{ph}
- jasności: U(ltraviolet), B(lue), V(isual), R(ed)
- jasność rentgenowska: m_x

Wielkości gwiazdowe

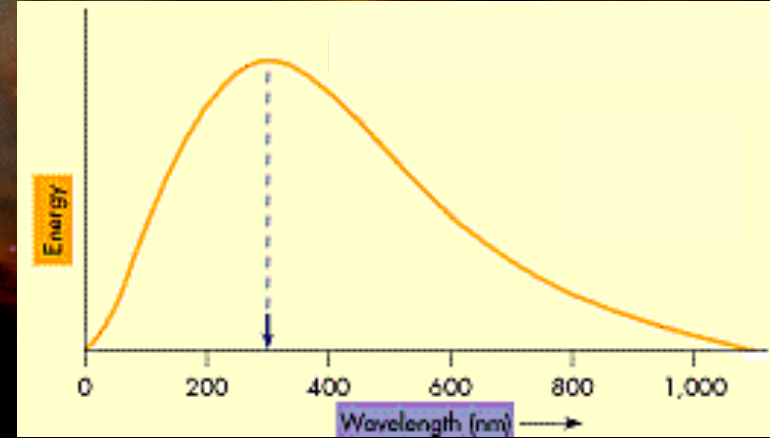
- Słońce $m = -26.8$ mag
- Księżyc $m = -12.7$
- planety $m = -4.7$ (Wenus), -2.5 (Jowisz)
- najjaśniejsze gwiazdy
 - Syriusz: $m = -1.46$
 - Canopus $m = -0.75$
 - Arktur $m = -0.05$
 - Wega $m = +0.03$
 - ...Altair $m = +0.76$
 - ...Deneb $m = +1.25$
- najśłabsze gwiazdy $m = 25-30$ mag

Temperatura gwiazd

- układ izolowany - równowaga termodynamiczna
- prawo Plancka
 - efektywna – *prawo Stefana-Boltzmana*
 - barwna – *prawo Wiena, nachylenie rozkładu Plancka*
 - jasnościowa – *gęstość w rozkładzie Plancka*
 - *wzbudzenia* – *formuła Boltzmana*
 - *jonizacji* – *formuła Sahy*
 - *kinetyczna* – *rozkład Maxwella*
- temperatura powierzchniowa, lokalna, centralna

Promieniowanie ciała doskonale czarnego

- Prawo Plancka



$$B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

$$\nu = c/\lambda$$

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}$$

Temperatura gwiazd

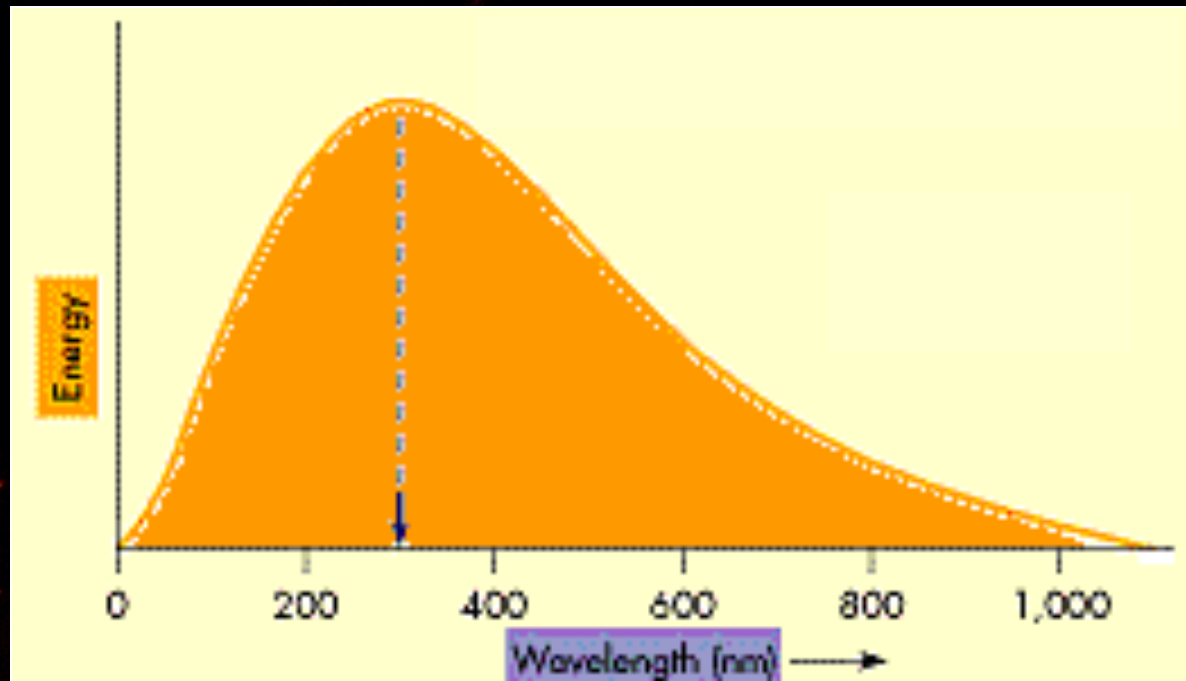
- układ izolowany - równowaga termodynamiczna
- prawo Plancka
 - efektywna – *prawo Stefana-Boltzmana*
 - barwna – *prawo Wiena, nachylenie rozkładu Plancka*
 - jasnościowa – *gęstość w rozkładzie Plancka*
 - *wzbudzenia* – *formuła Boltzmana*
 - *jonizacji* – *formuła Sahy*
 - *kinetyczna* – *rozkład Maxwella*
- temperatura powierzchniowa, lokalna, centralna

Temperatura efektywna

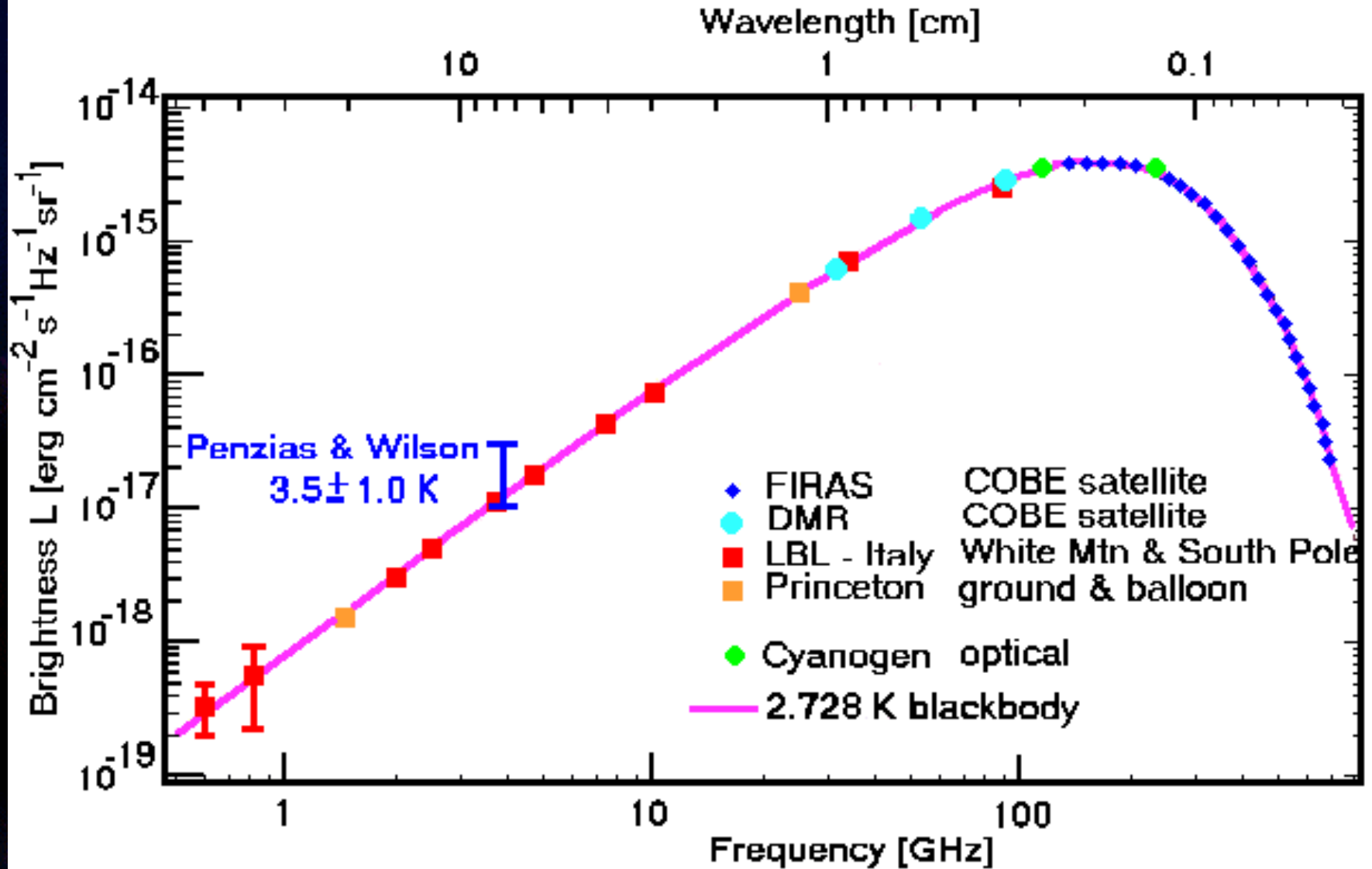
- *prawo Stefana-Boltzmana*

$$f = \sigma T_{\text{eff}}^4$$

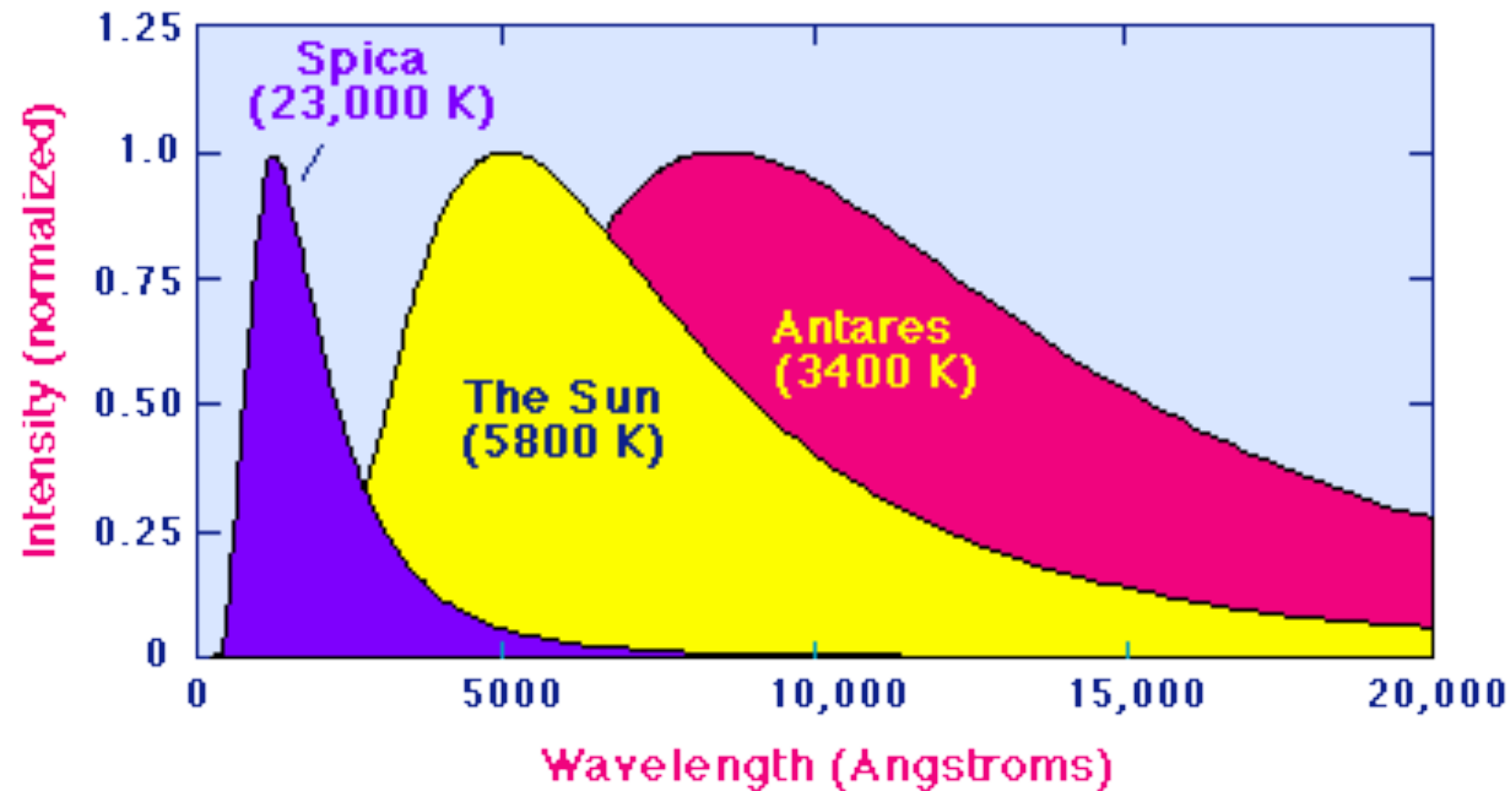
$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$



Promieniowanie reliktowe



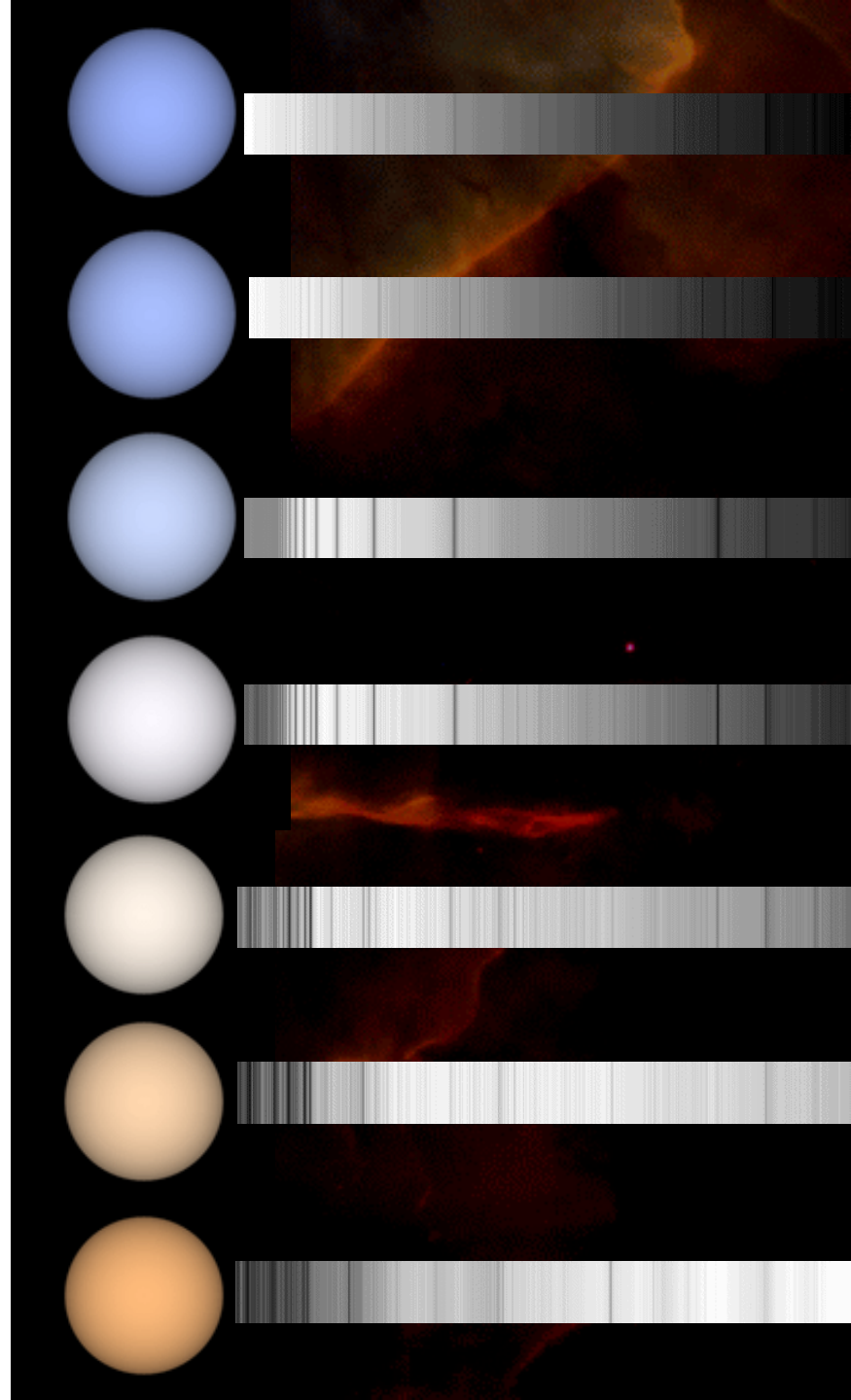
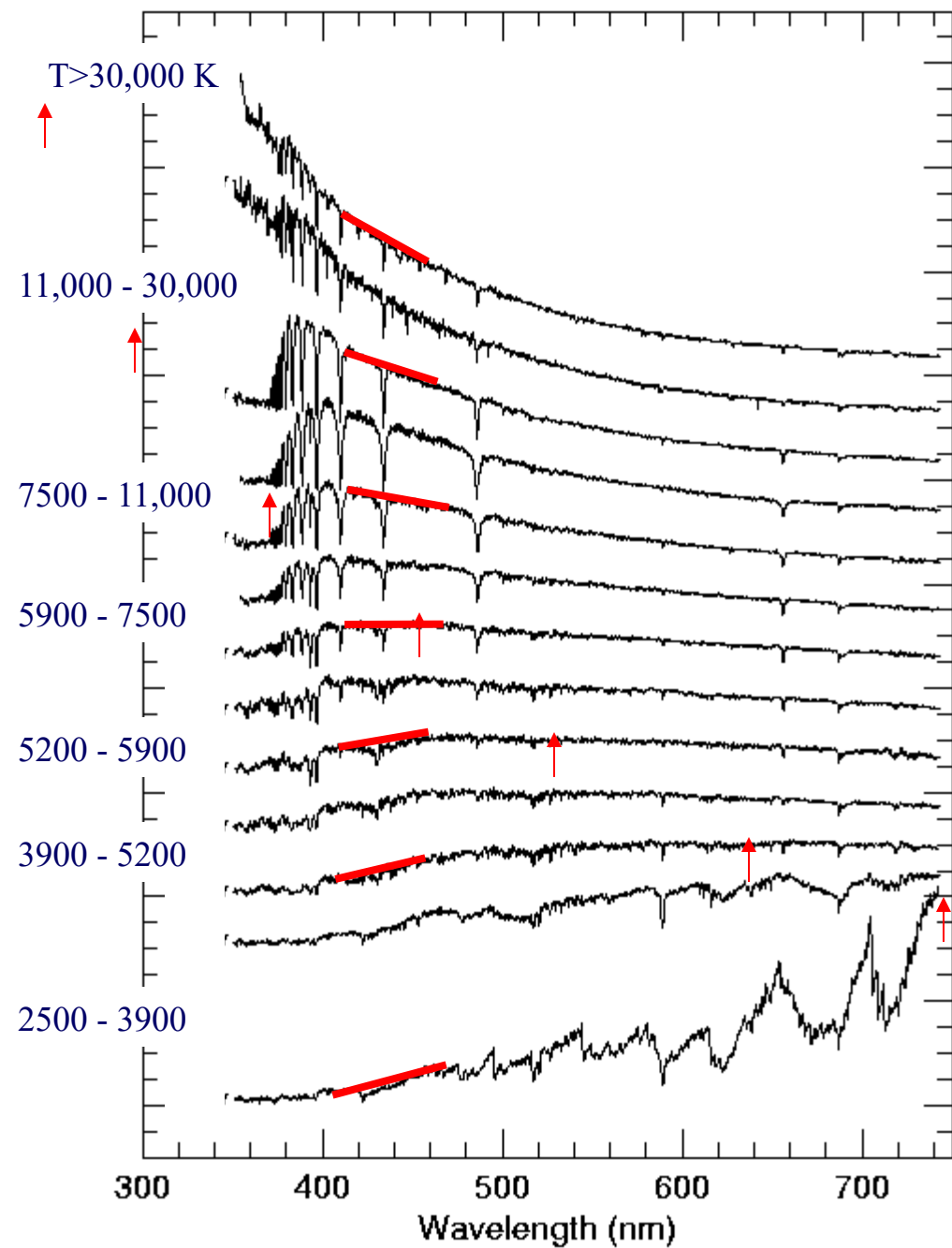
Temperatura barwna



gwiazda czerwona

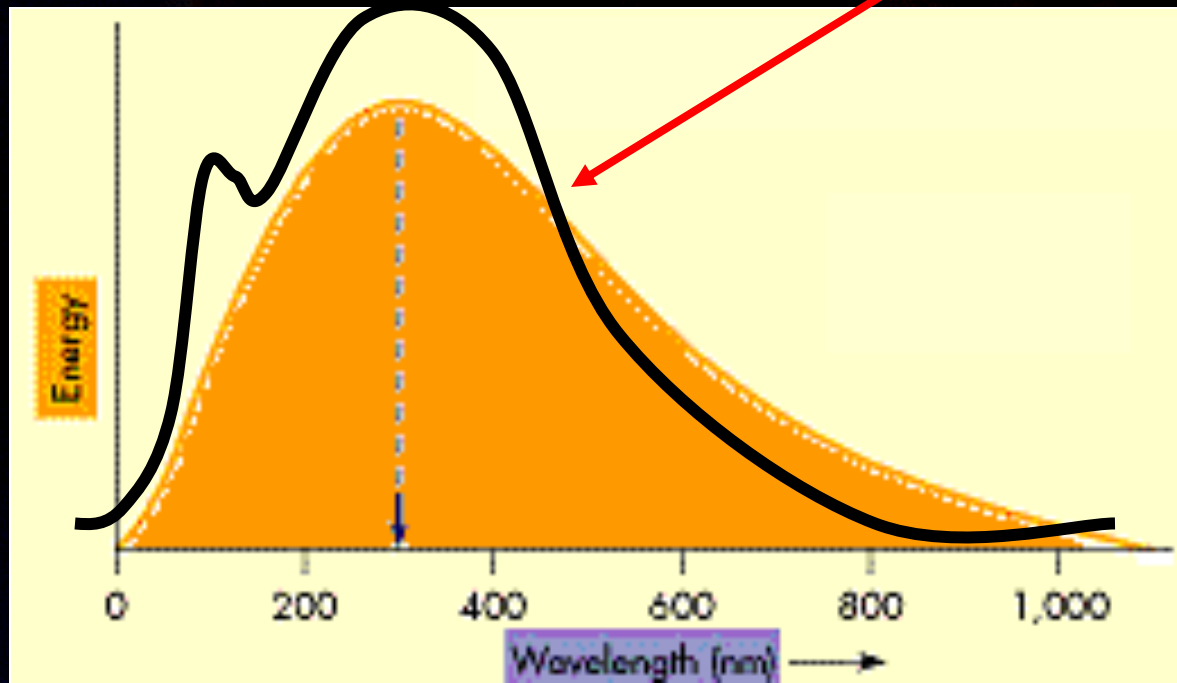
gwiazda żółta

gwiazda niebieska



Temperatura jasnościowa

$$B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$



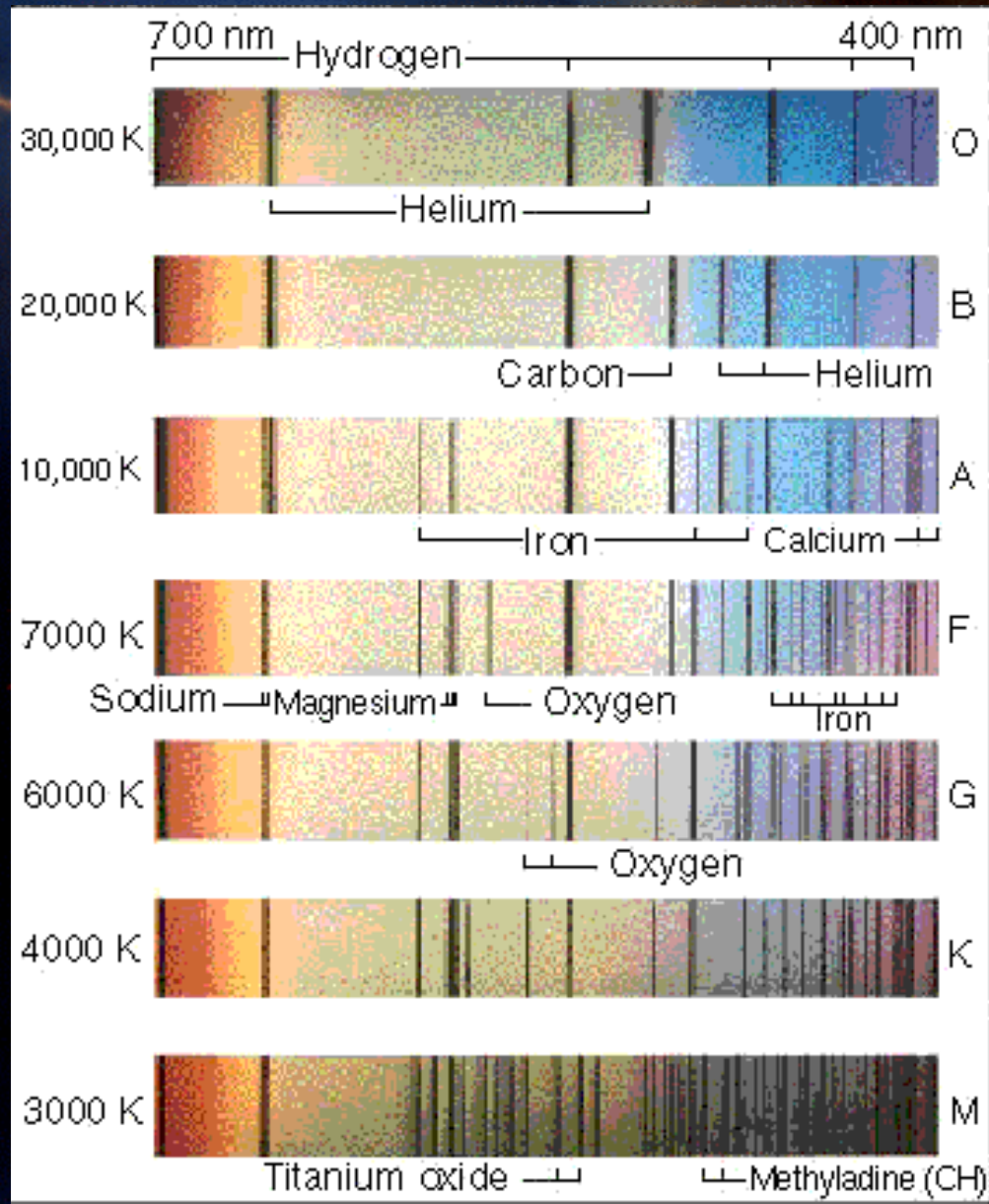
Klasyfikacja widmowa

- 1886 - 1897 – Edward C. Pickering, Harvard, *Henry Draper Memorial Survey*
 - pryzmat obiektywowy – 220,000 gwiazd
- 1890 - Edward Pickering i Williamina Fleming:
 - pierwsza próba klasyfikacji wg malejącego natężenia linii wodoru
 - Typ "A" = najsilniejsze linie wodorowe
 - B, C, D, ... coraz słabsze.

Klasyfikacja widmowa

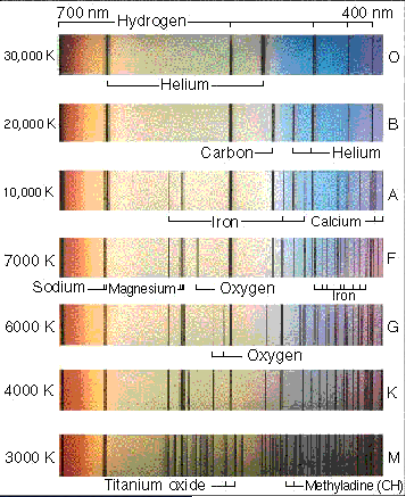
- 1901 - Annie Jump Cannon zauważyła, że to temperatura stanowi główną cechę odróżniającą widma
 - uszeregowała typy ABC wg temperatury pozostawiając jedynie najbardziej charakterystyczne widma
 - pozostało 7 klas głównych **O B A F G K M**
 - uzupełnionych później przez R, N i S.
 - dodała podklasy np. A0-A1-A2-...-A9-B0-...
- 1911 – 1924, zastosowała *Harwardzki System Klasyfikacji* do ok. 220,000 gwiazd tworząc tzw. *Katalog Henry Drapera*

Klasyfikacja widmowa

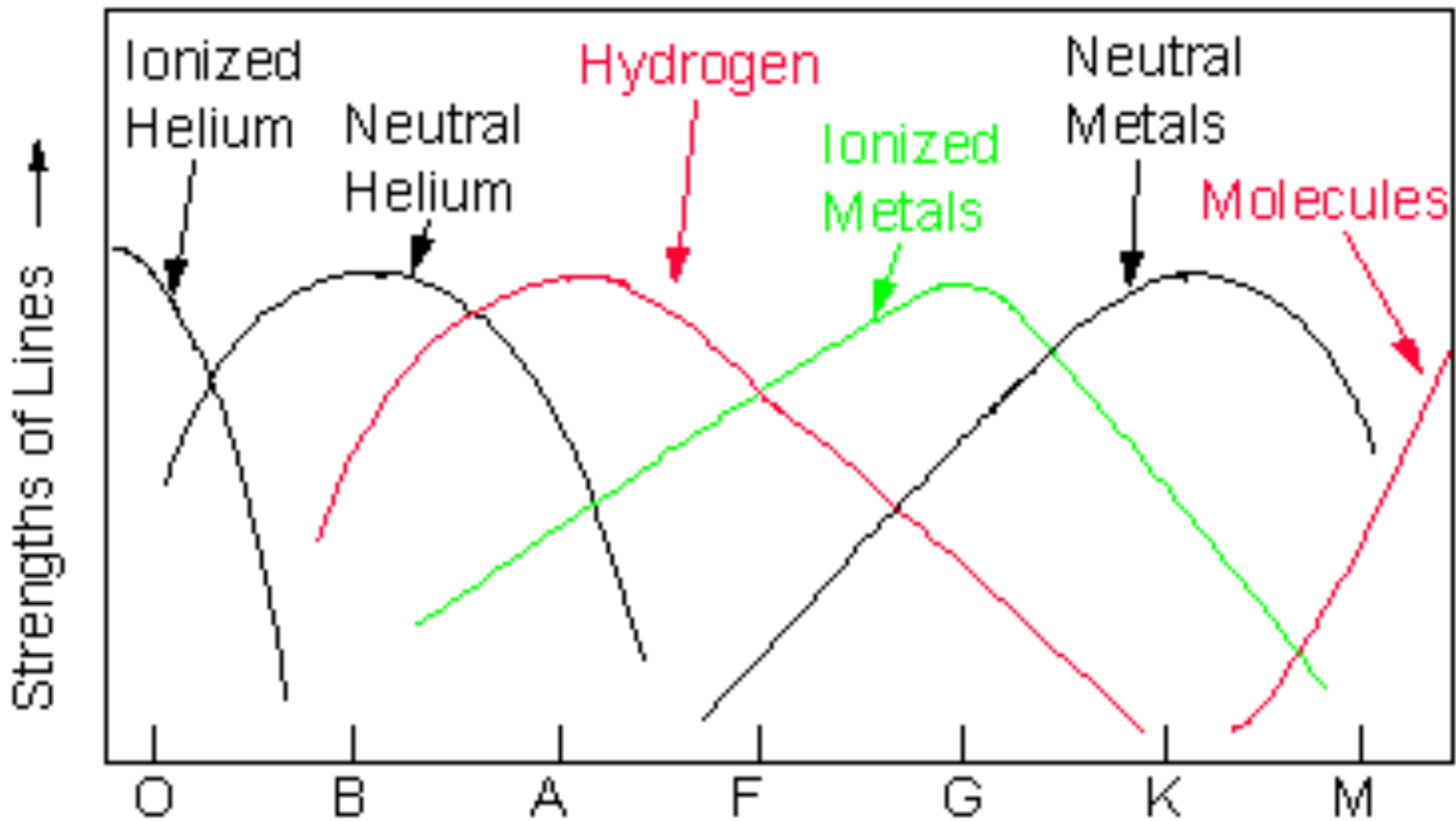


O
B
A
F
G
K
M

Klasyfikacja widmowa



Strength of Lines vs. Spectral Class

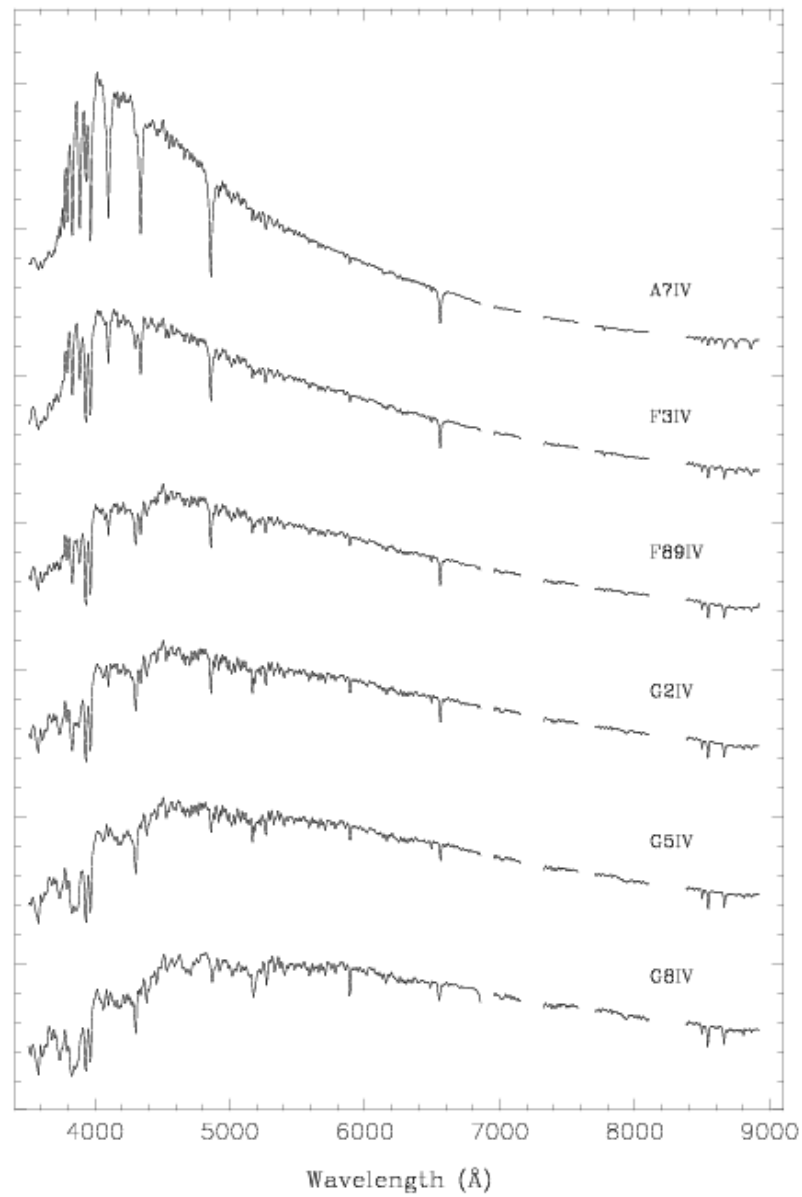
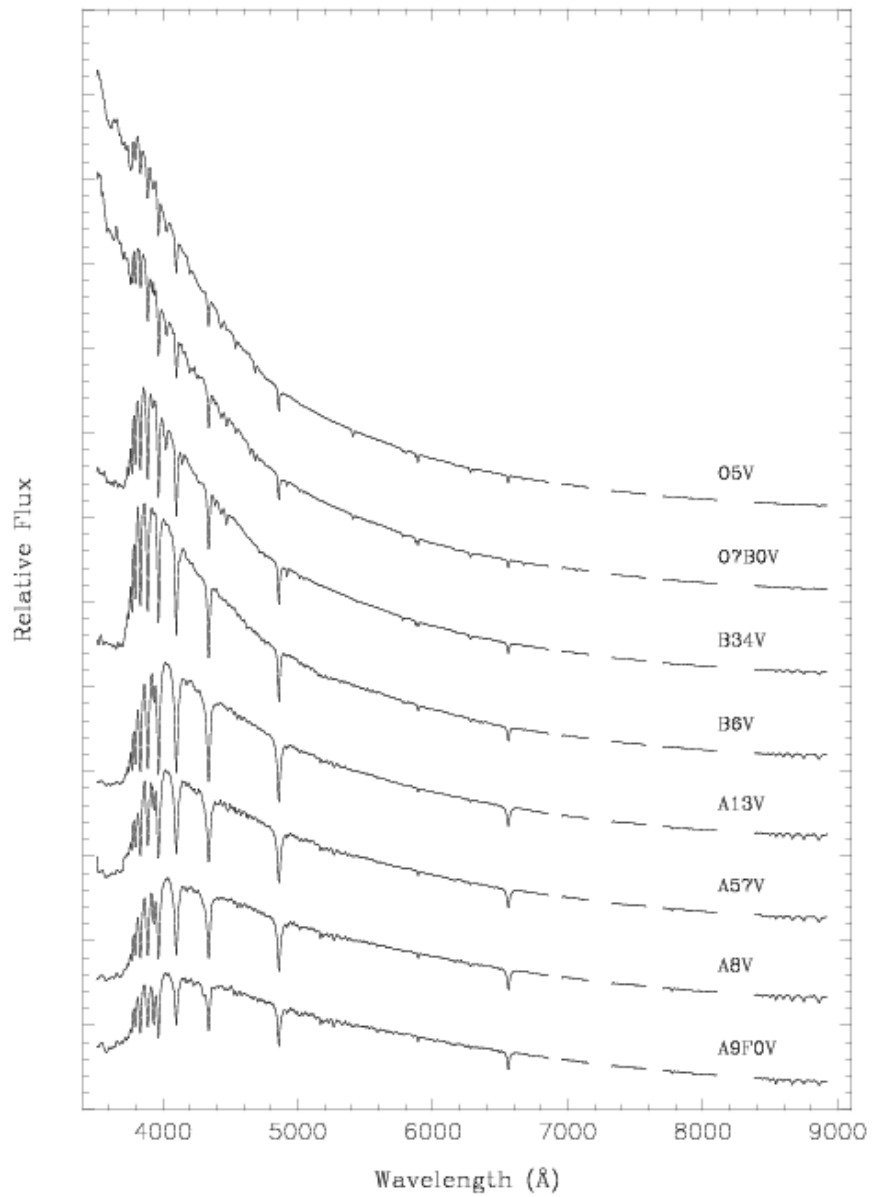


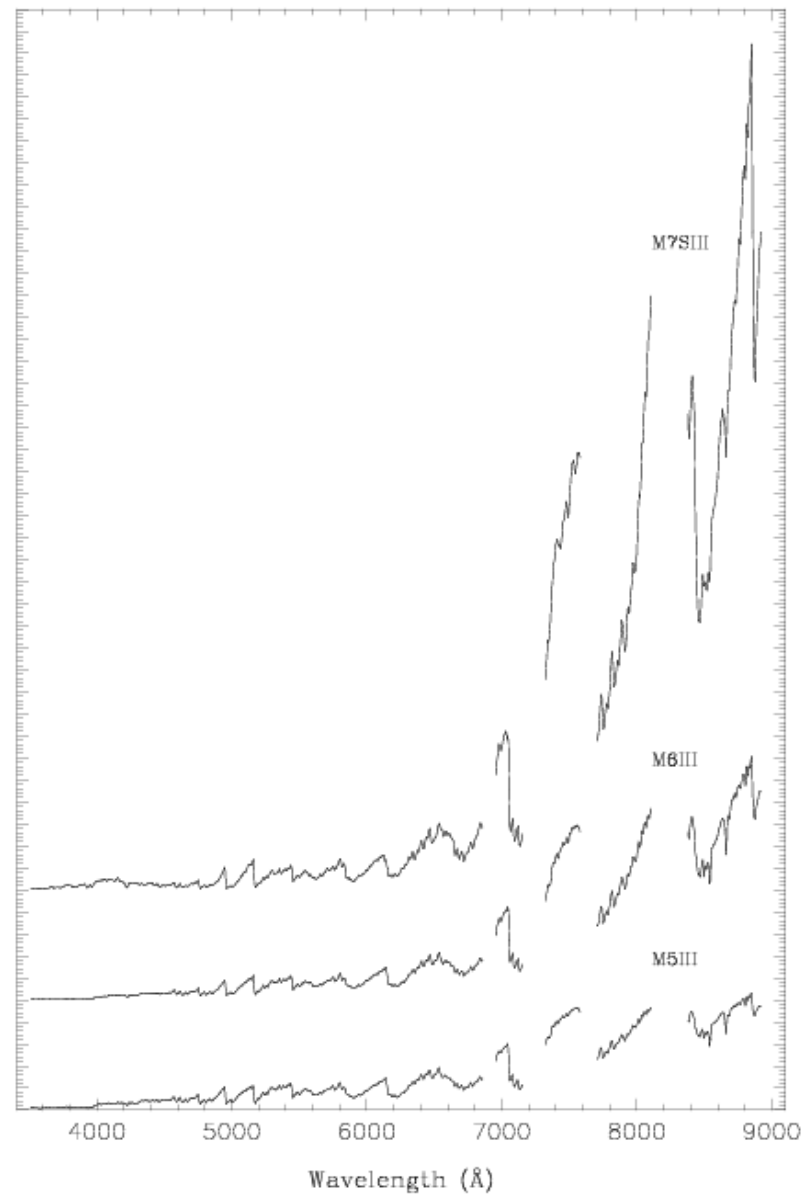
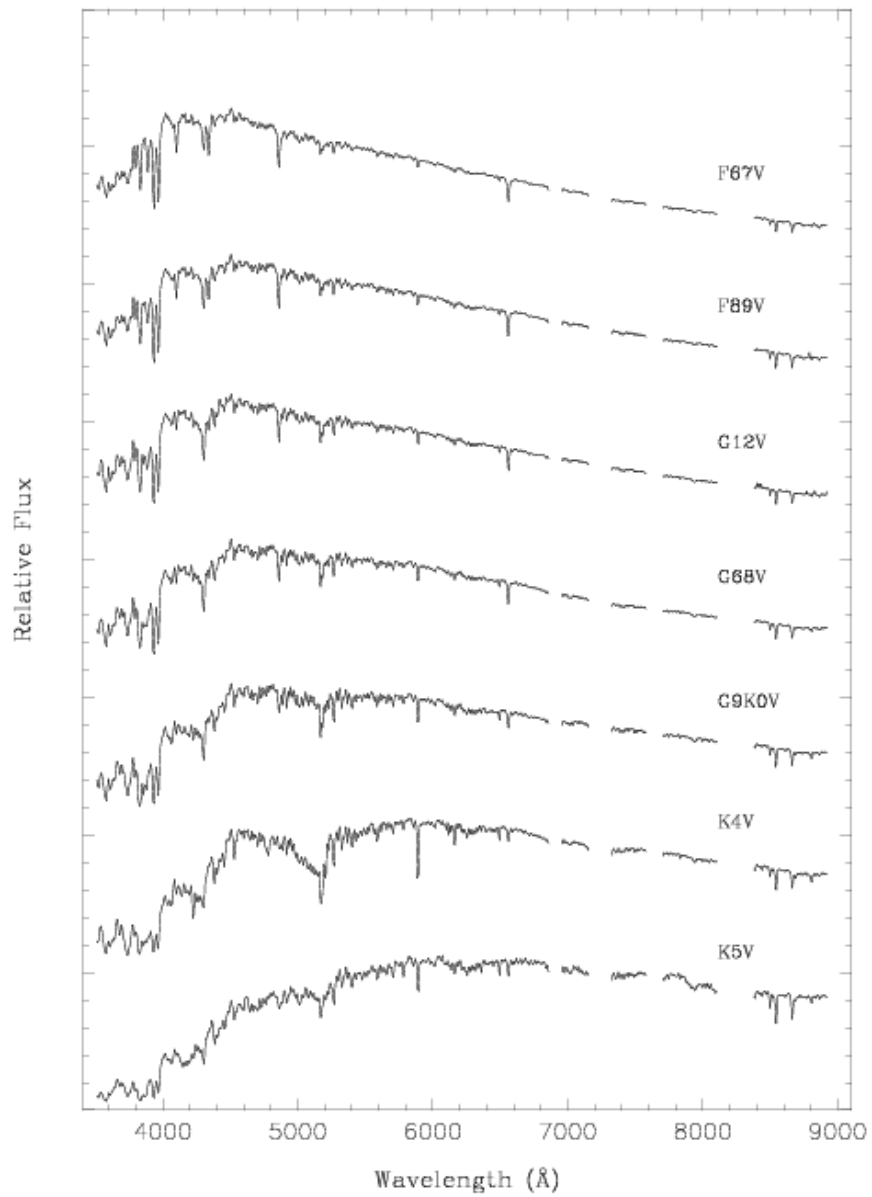
Klasyfikacja widmowa



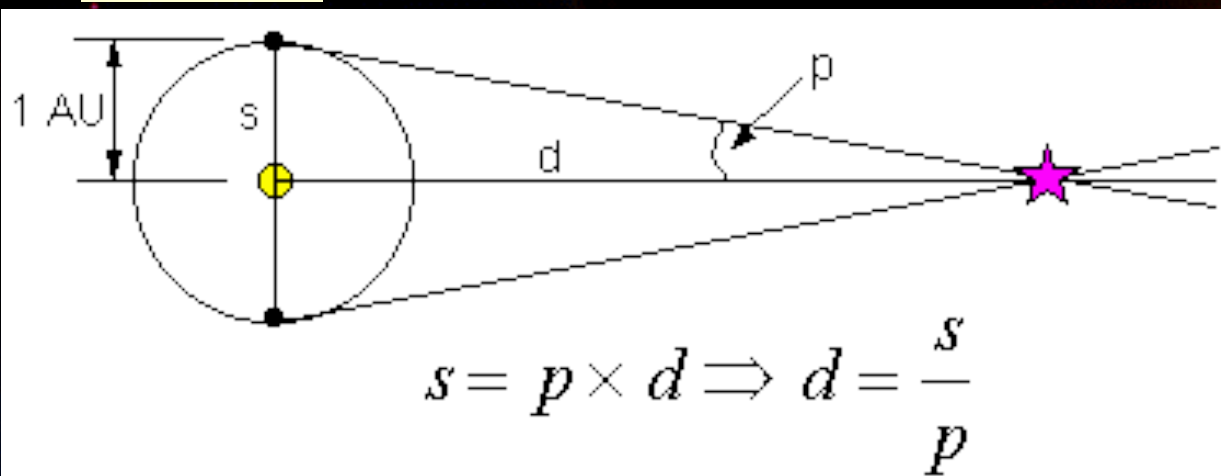
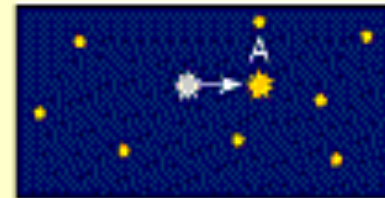
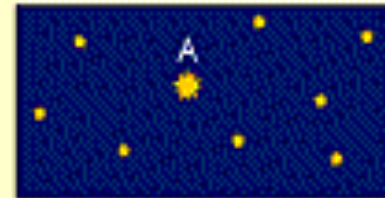
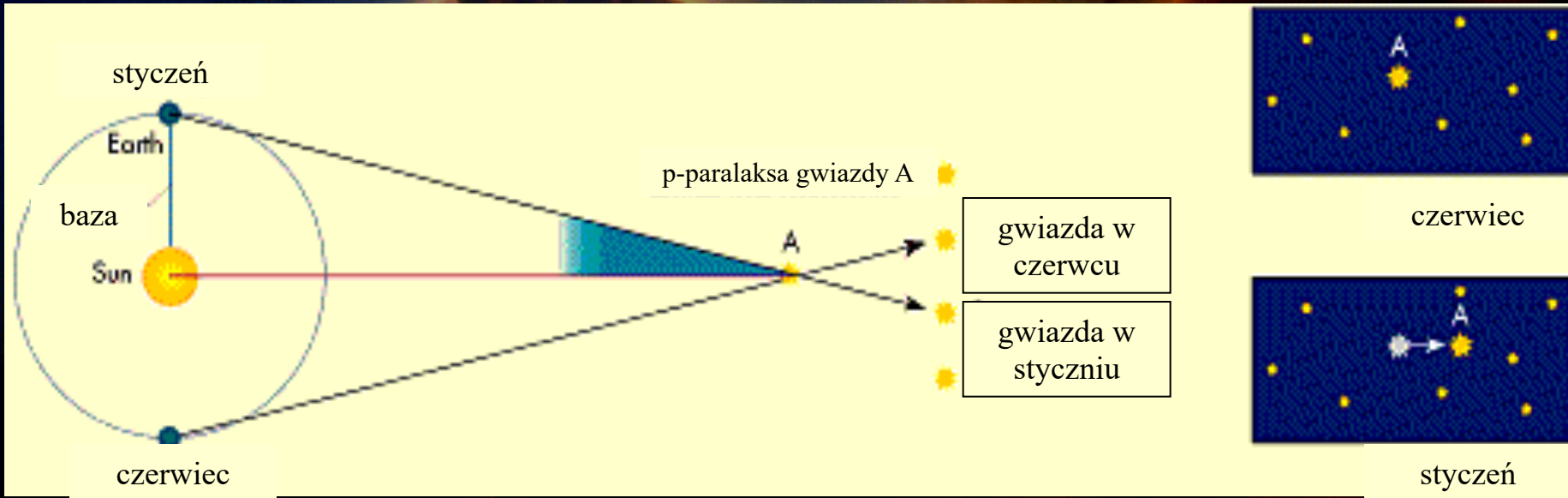
Henry Norris Russel (1920)

“**O**h, **B**e **A** **F**ine **G**irl (**G**uy), **K**iss **M**e”





Odległości do gwiazd – paralaksy trygonometryczne



$$d = \frac{206265}{p} \text{ AU}$$

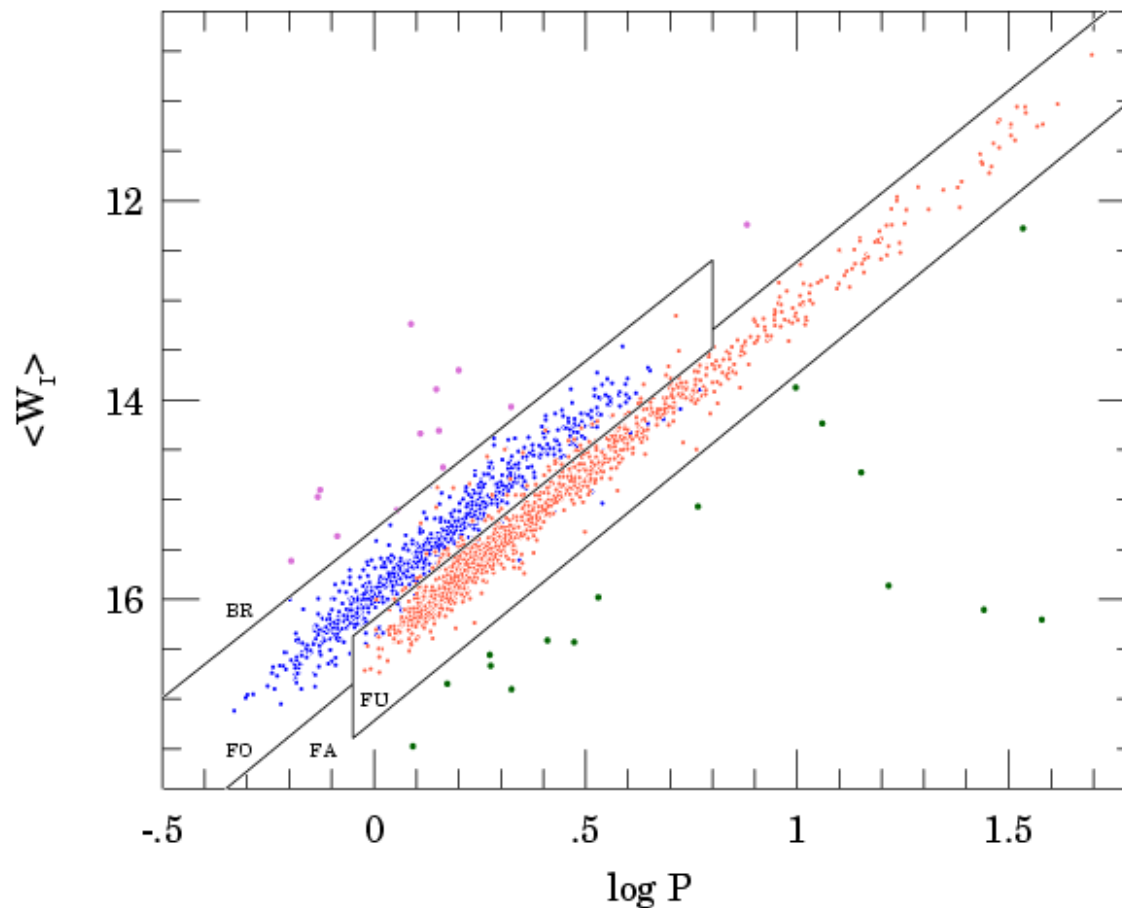
$$d = \frac{1}{p} \text{ parsecs (pc)}$$

For example: $p = 0.2'' \Rightarrow d = 5 \text{ pc}$.

• Hipparcos

Zależność Okres-Jasność dla Cefeid

$$\log_{10}(d) = (m - M + 5)/5$$





Odległości do gwiazd – świece standardowe

$$\log_{10}(d) = (m - M + 5)/5$$

- zasięg teleskopów: $m_{\text{obs}} < 25^m \sim 30^m$
- cefeidy: $M \sim -2^m$ do -6^m ; $d < 1 \text{ Mpc}$
- supernowe $M \sim -18^m$; $d < 500 \text{ Mpc}$
- najjaśniejsze galaktyki $M \sim -25^m$; $d < 10 \text{ Gpc}$

The image shows a vast, colorful nebula in space. The central and right portions are dominated by bright, glowing clouds of gas in shades of orange, red, and yellow. These clouds are set against a deep, dark blue background filled with numerous stars of varying sizes and colors, including some bright white and blue stars. The overall scene is a dramatic representation of interstellar matter.

- koniec 13/04/2017

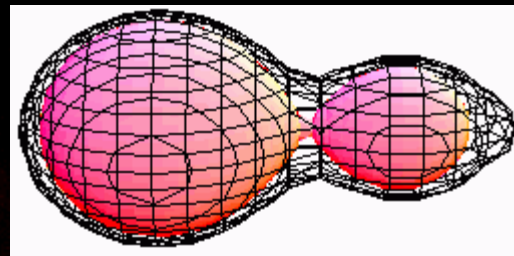
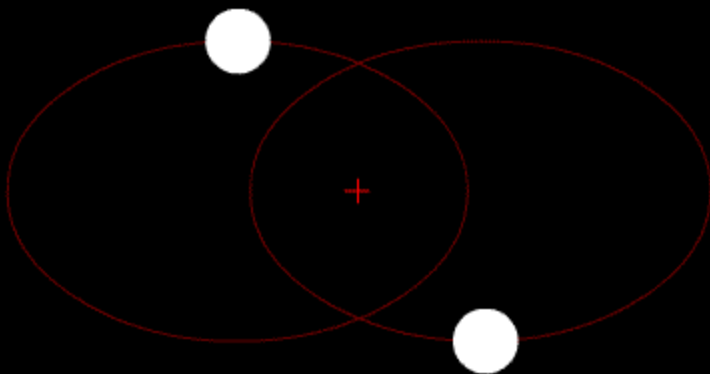
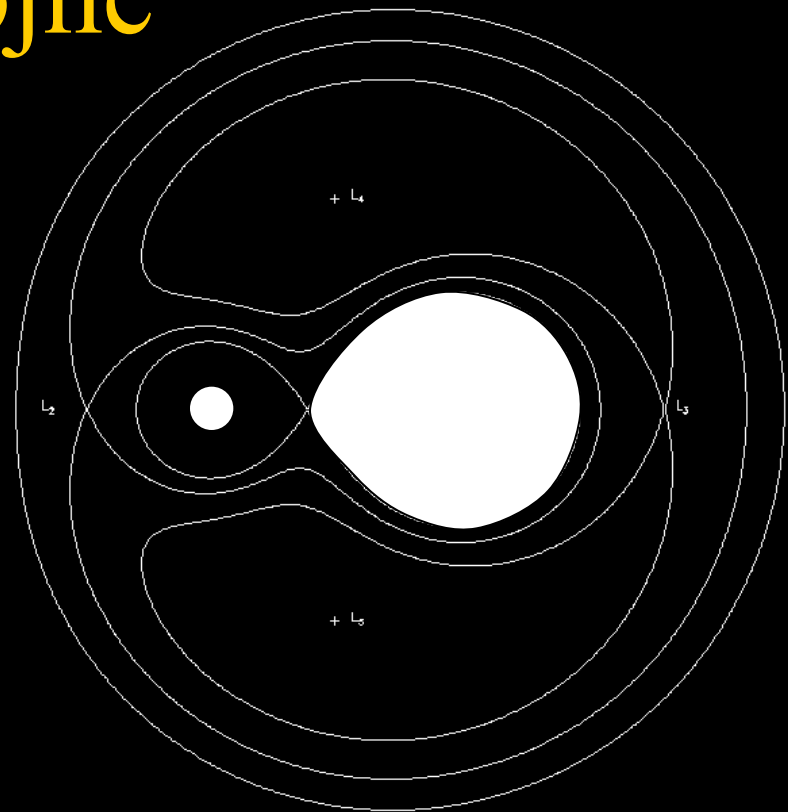
Odległości do gwiazd – paralakсы spektroskopowe

- obserwacje fotometryczne
 - jasność obserwowana m
- obserwacje spektroskopowe
 - typ widmowy
 - temperatura, klasa jasności
 - jasność absolutna M

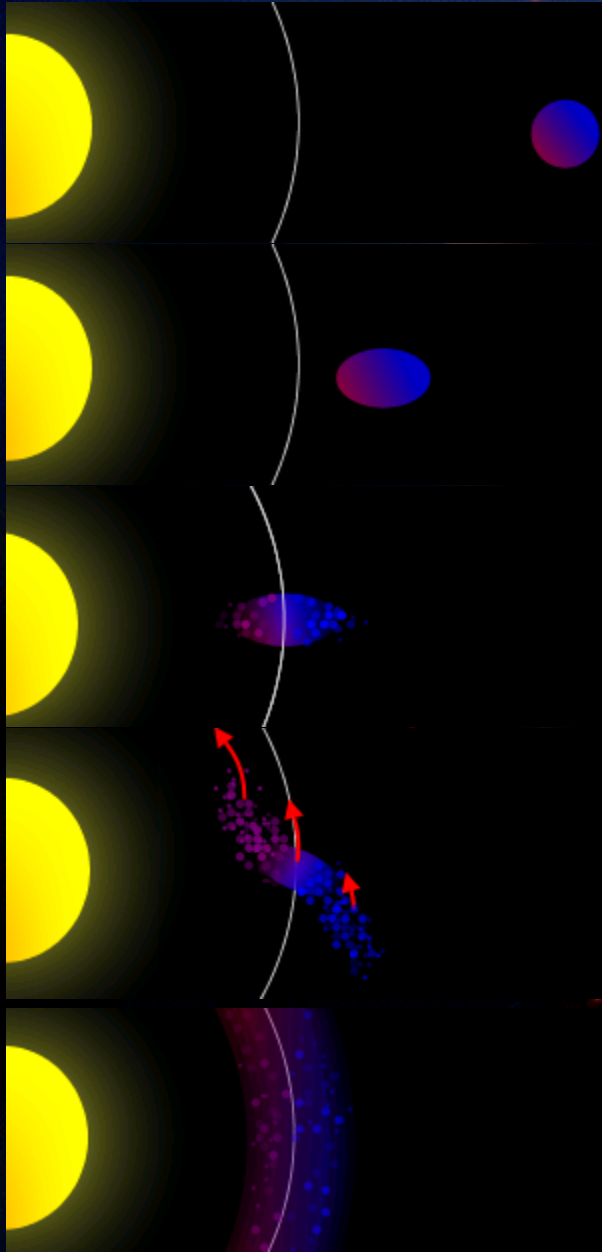
→ Odległość d : $\log_{10}(d) = (m - M + 5)/5$

Układy podwójne

- potencjał Roche'a
- układy:
 - rozdzielone
 - półrozdzielone
 - kontaktowe



Granica Roche'a



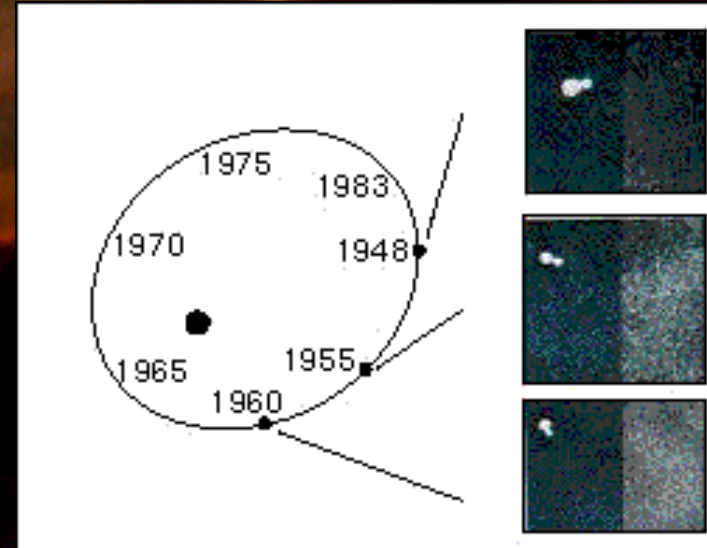
$$d = R \left(2 \frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Masy gwiazd

- Układy podwójne wizualnie
- Trzecie prawo Keplera:

$$M_A + M_B = \frac{a^3}{P^2}$$

- M_A, M_B – masy gwiazd
- P – okres obiegu
- a – półoś orbity względnej



Gwiazdy podwójne spektroskopowo

- półamplitudy prędkości radialnej K_1 , K_2

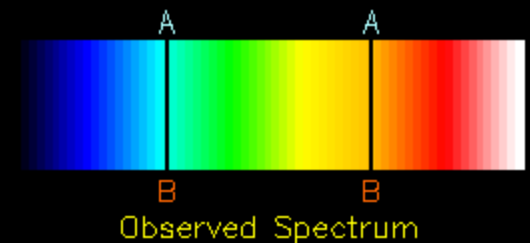
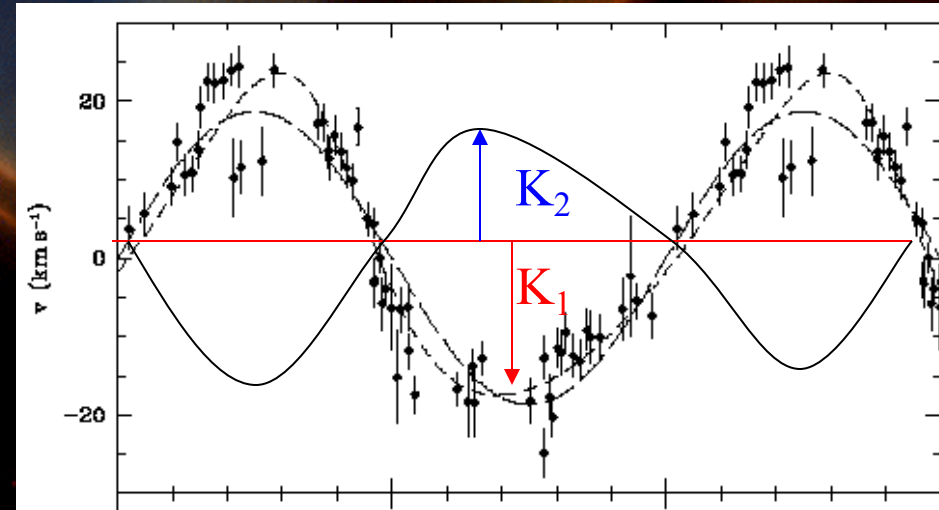
$$K_1 = 2\pi a_1/P$$

$$K_2 = 2\pi a_2/P$$

- środek ciężkości

$$a_1 M_1 = a_2 M_2$$

$$M_A + M_B = \frac{a^3}{P^2}$$



Gwiazdy podwójne spektroskopowo

- $a = 13751 (K_1 + K_2) P$ [km, km/s, d]
- $M_1 = 1.0385 \times 10^{-7} (K_1 + K_2)^2 K_2 P$ [M_\odot , km/s, d]
- $M_2 = 1.0385 \times 10^{-7} (K_1 + K_2)^2 K_1 P$ [M_\odot , km/s, d]

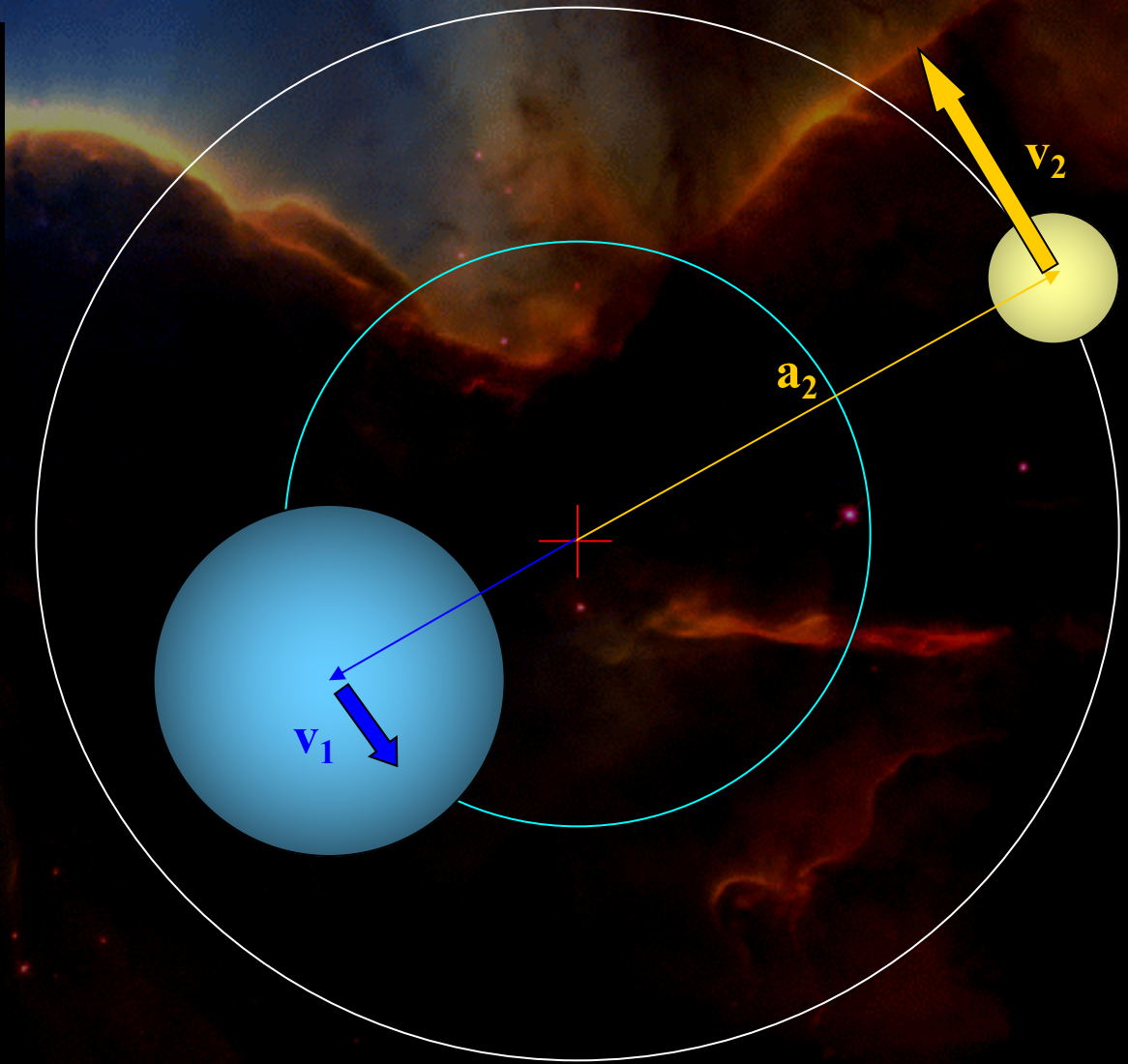
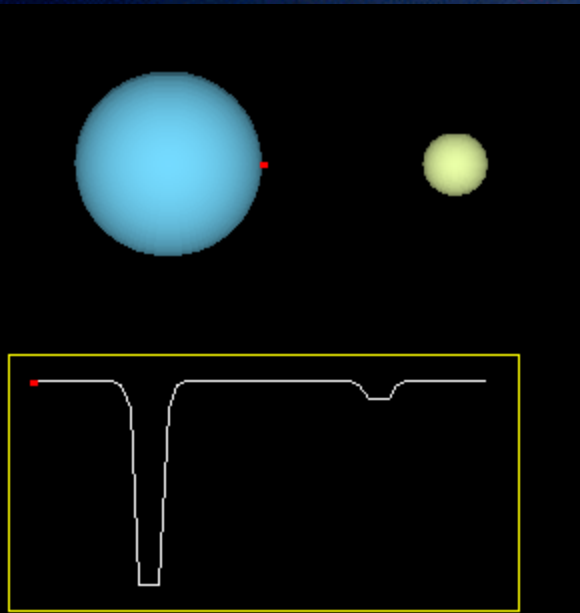
np. :

$$P = 0.5^d, \quad K_1 = 100 \text{ km/s}, \quad K_2 = 200 \text{ km/s}$$

$$\Rightarrow a = 2062650 \text{ km} = 2.96 R_\odot$$

$$\Rightarrow M_1 = 0.9 M_\odot \quad M_2 = 0.45 M_\odot$$

Rozmiary gwiazd - układy zaćmieniowe



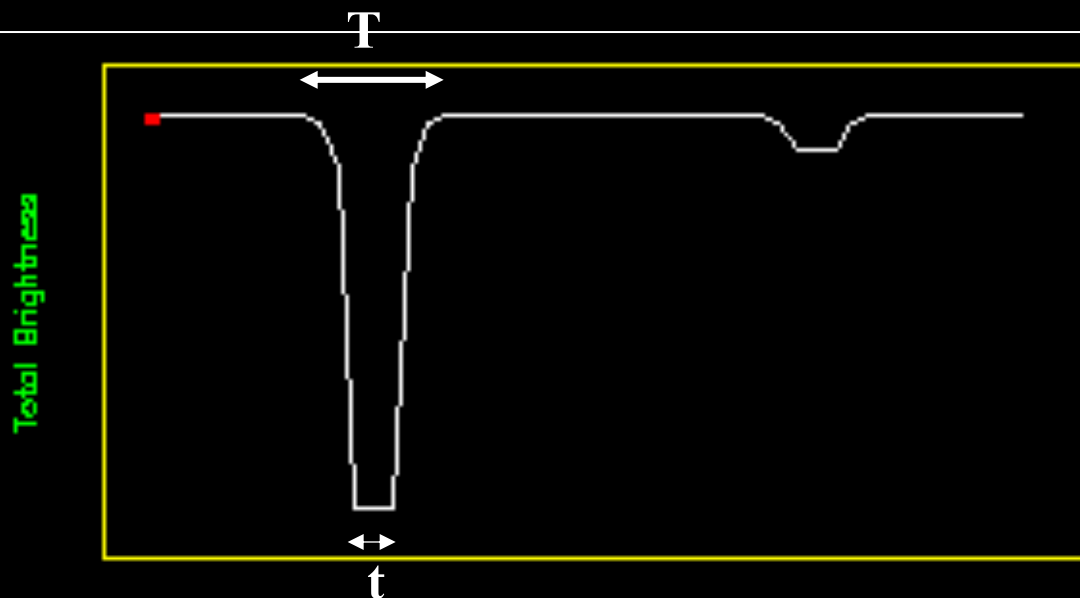
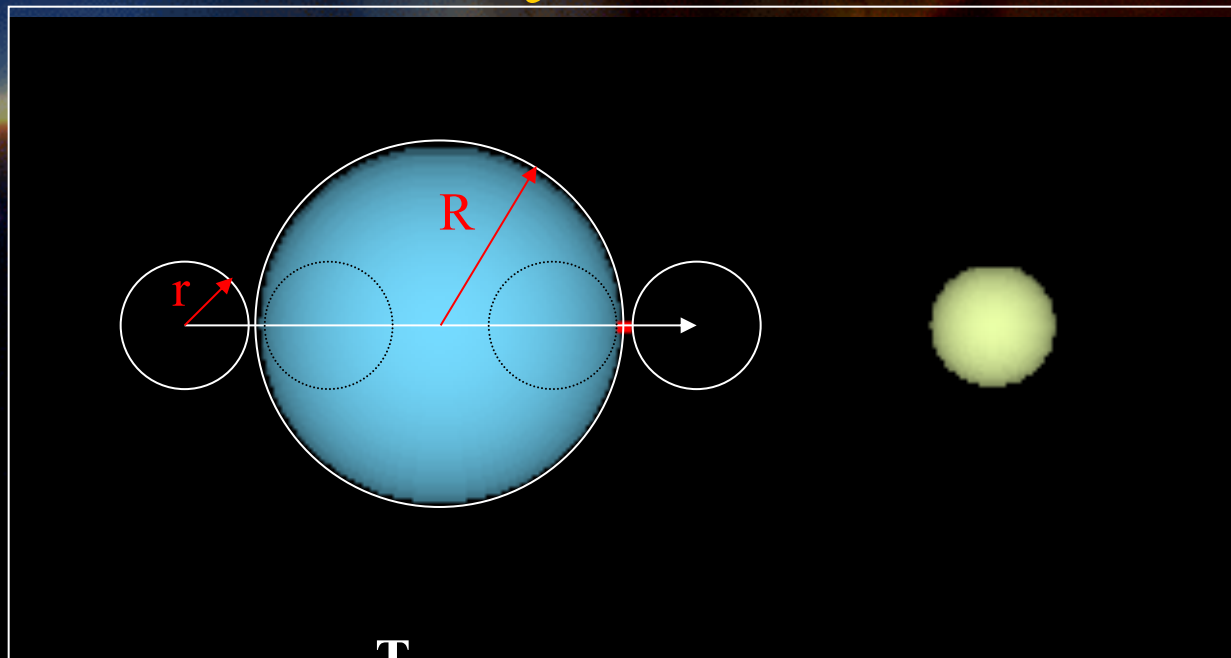
$$v = v_1 + v_2$$

$$v = 2\pi(a_1 + a_2)/P$$

Rozmiary gwiazd – układy zaćmieniowe

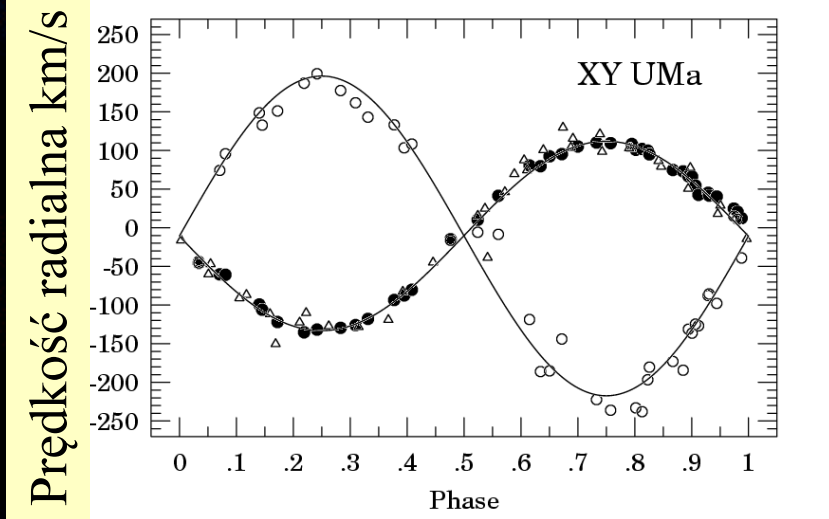
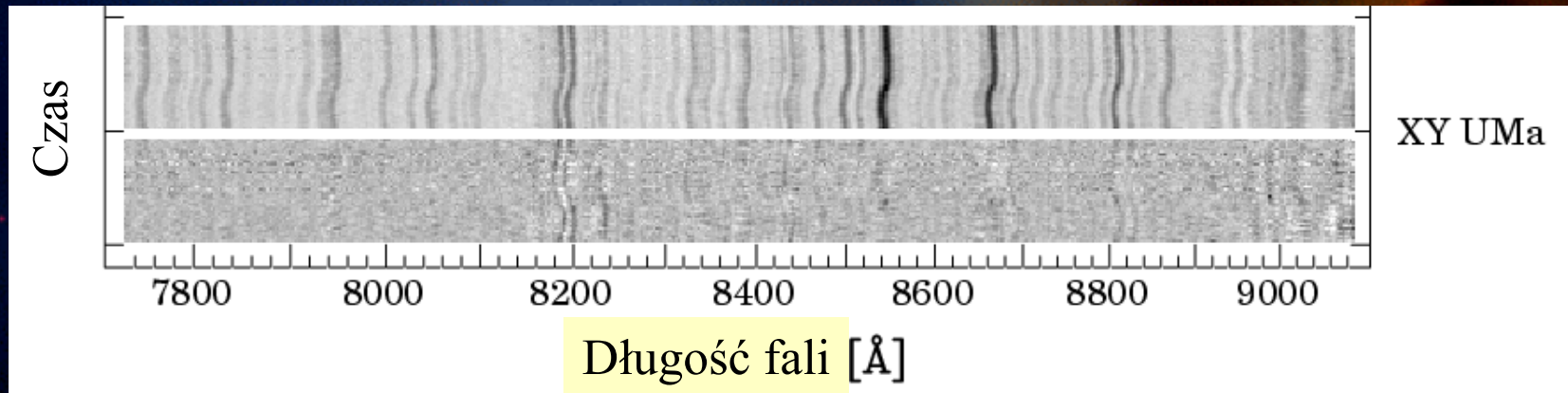
$$(2R+2r)/T = v$$

$$(2R-2r)/t = v$$



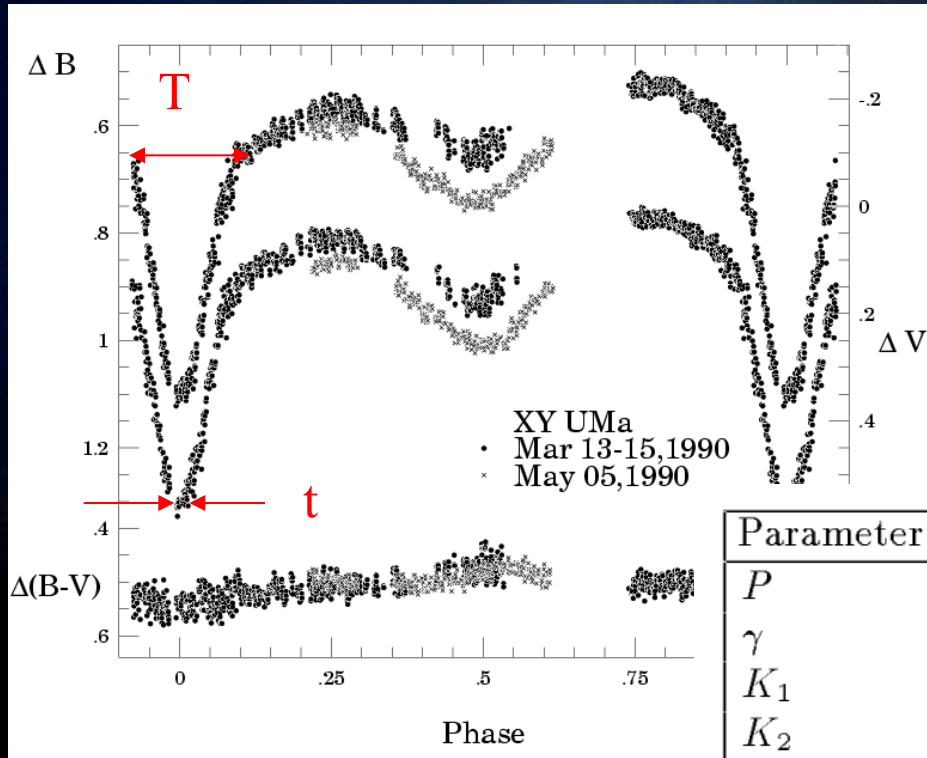
$$v = 2\pi(a_1+a_2)/P$$

Przykład – XY UMa



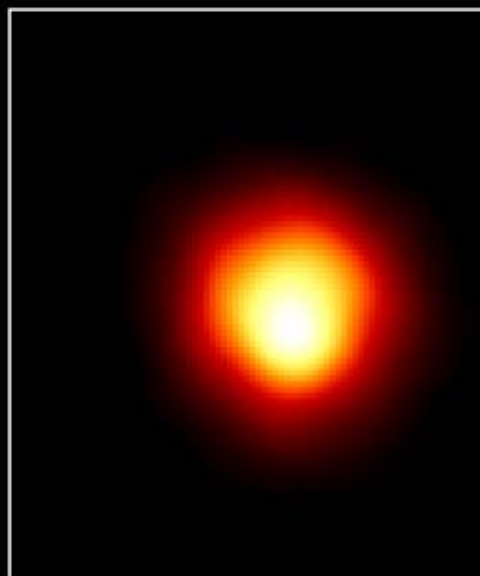
- $P=0^d.479$
- $K_1=122$ km/s
- $K_2=202$ km/s

Przykład – XY UMa



- $T = 1.5 \text{ h}$
- $t \sim 0.36 \text{ h}$

Parameter	Units	WY Cnc	SV Cam	XY UMa
P	days	$0.^d 82937122$	$0.^d 593071$	$0.^d 47899493$
γ	km/s	-12.7 ± 1.0	-13.7 ± 1.5	-10.5 ± 1.0
K_1	km/s	93.0 ± 1.2	118.5 ± 2.0	122.5 ± 1.0
K_2	km/s	181.0 ± 5.5	211.5 ± 5.5	202.0 ± 6.0
$M_1 \sin^3 i$	M_\odot	1.17 ± 0.08	1.42 ± 0.09	1.06 ± 0.07
$M_2 \sin^3 i$	M_\odot	0.60 ± 0.03	0.79 ± 0.04	0.64 ± 0.03
q		0.51 ± 0.04	0.56 ± 0.04	0.61 ± 0.05
$a \sin i$	R_\odot	4.49 ± 0.09	3.87 ± 0.07	3.07 ± 0.06
$a_1 \sin i$	R_\odot	1.52 ± 0.02	1.39 ± 0.02	1.16 ± 0.01
$a_2 \sin i$	R_\odot	2.97 ± 0.09	2.48 ± 0.06	1.91 ± 0.06
$v_1 \sin i$	km/s	75. :	102. :	110 :
$R_1 \sin i$	R_\odot	1.2 :	1.2 :	1.1 :



Size of Star

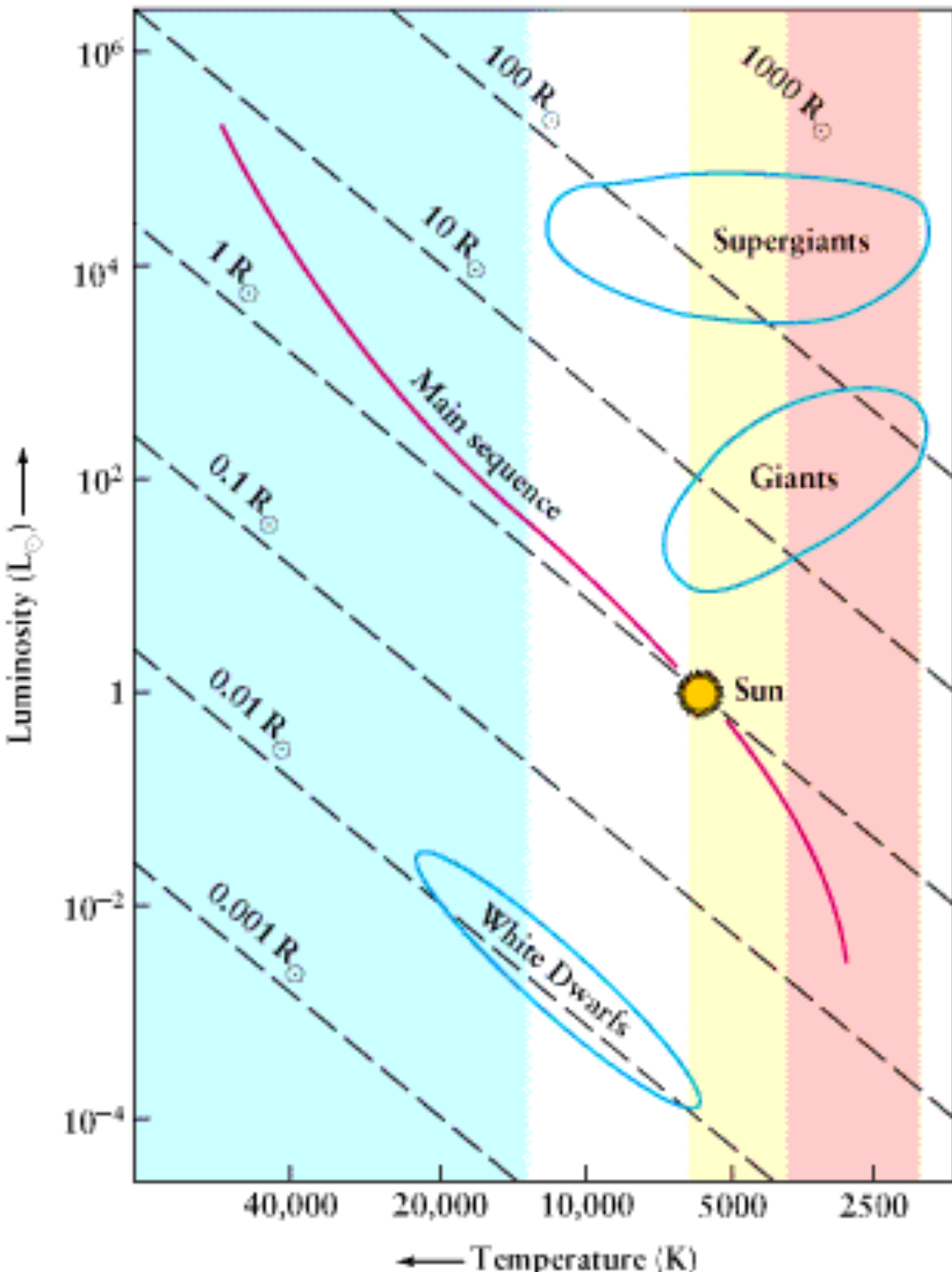
Size of Earth's Orbit

Size of Jupiter's Orbit

Atmosphere of Be

PRC96-04 · ST Sci OPO · Janua

UKrady

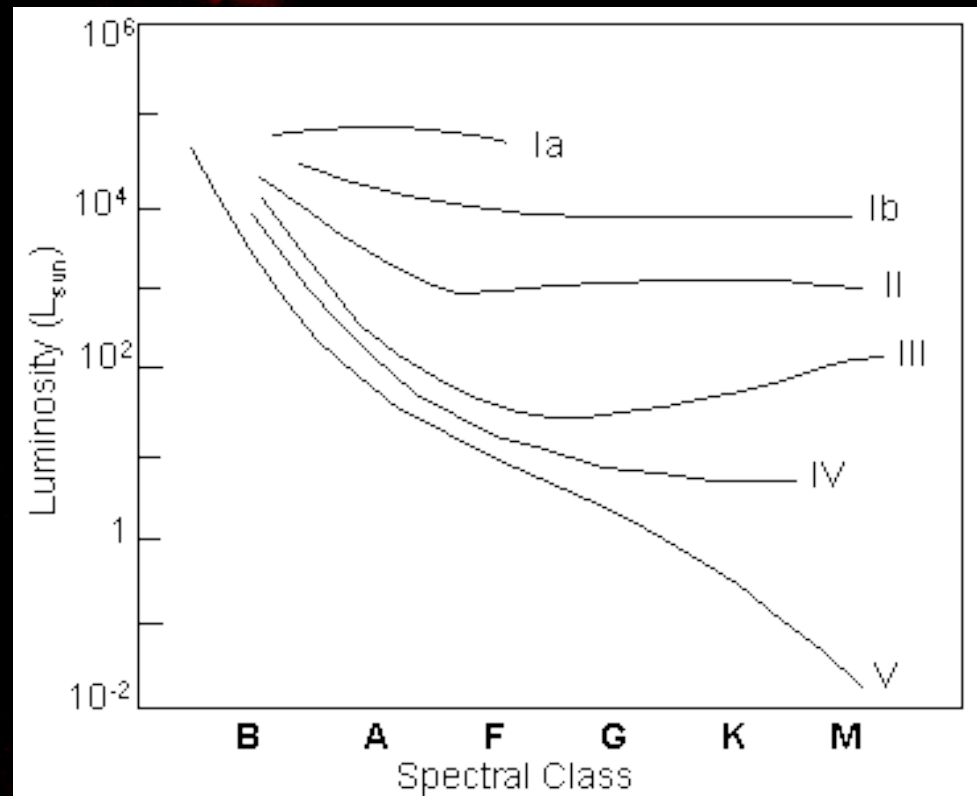
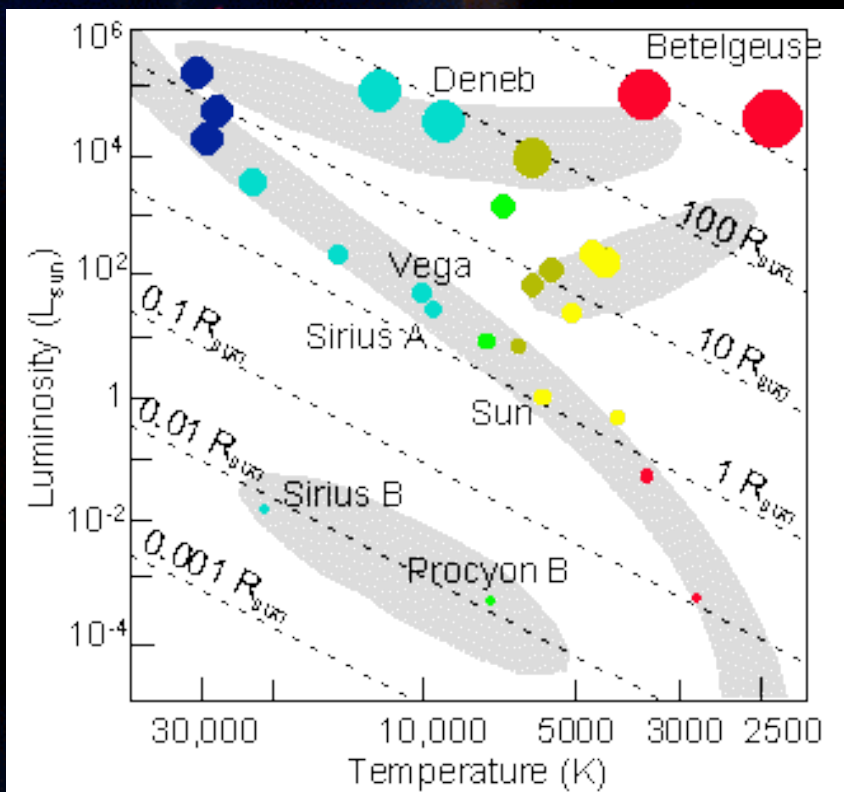


metria

vania

Klasyfikacja dwuwymiarowa gwiazd

- jasność $L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$
- diagram Hertzsprunga-Russela



Parametry gwiazd Ciągu Głównego

Typ widmowy	Masa (M_{sun})	L (L_{sun})	T (K)	R (R_{sun})
O5	40	400,000	40,000	13
B0	15	13,000	28,000	4.9
A0	3.5	80	10,000	3.0
F0	1.7	6.4	7,500	1.5
G0	1.1	1.4	6,000	1.1
K0	0.8	0.46	5,000	0.9
M0	0.5	0.08	3,500	0.8

Parametry fizyczne gwiazd

- *Odległość*
- *Jasność*
- *Temperatura*
- *Rozmiary, kształt*
- *Masa*
- *Gęstość, ciśnienie, równanie stanu*
- *Skład chemiczny*
- *Wiek – status ewolucyjny*

Źródła energii gwiazd

- Kurczenie grawitacyjne
 - protogwiazdy
 - różne etapy ewolucji
- Reakcje termojądrowe
 - główne źródło energii
- Stygnięcie
 - ostatnie etapy życia gwiazd

Twierdzenie o wiriale

Twierdzenie o wiriale

$$m_i, \vec{p}_i, \vec{r}_i, \vec{F}_i$$

$$\frac{d}{dt} \vec{p}_i = \vec{F}_i$$

N. mechan

rozważmy sumę:

$$\sum_i \vec{p}_i \vec{r}_i$$

* virial
Clausiusa

$$\frac{d}{dt} \sum_i \vec{p}_i \vec{r}_i = \sum_i \frac{d\vec{p}_i}{dt} \vec{r}_i + \sum_i \vec{p}_i \frac{d\vec{r}_i}{dt}$$

Twierdzenie o wiriale

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \sum_i \vec{p}_i \cdot \vec{r}_i &= \sum_i \frac{d\vec{p}_i}{dt} \cdot \vec{r}_i + \sum_i \vec{p}_i \cdot \frac{d\vec{r}_i}{dt} \\
 \frac{d}{dt} \sum \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (m_i r_i^2) &= \sum \vec{F}_{ij} \cdot \vec{r}_i + 2 \sum \frac{1}{2} m_i v_i^2 \\
 \frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} &= \Omega + 2 E_K
 \end{aligned}$$

Handwritten annotations and intermediate steps:

- Green arrow: $\vec{p} = \frac{d\vec{r}_i}{dt} m_i$
- Green arrow: $\sum \vec{F}_{ij}$
- Green arrow: $\vec{p} = m \vec{v}$, $\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}$
- Green arrow: $\sum \frac{G m_i m_j}{r_{ij}^3} \vec{r}_{ij}$
- Red asterisk: $*$

Twierdzenie o wiriale

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} = \Omega + 2 E_k$$

układ statyczny $\Rightarrow \frac{d^2 I}{dt^2} = 0$

tw. o wiriale $\Omega = -2 E_k$

energia całkowita $E = U + \Omega$

dla gazu jednost.
($E_k = U$)

$$\underline{E} = U - 2U = \underline{-U} = \underline{\frac{1}{2} \Omega}$$

Twierdzenie o wiriale

PRZYKŁAD : JEDNORODNA KULA GAZOWA

energia wypromieniowana $\Delta E = -L \cdot \Delta t$

powoduje zmniejszenie Ω $\Delta \Omega = -2L \Delta t$ $R \searrow$

i wzrost U $\Delta U = L \Delta t$ $T \nearrow$

$$\underline{E} = U - 2U = -U = \underline{\underline{\frac{1}{2} \Omega}}$$

Twierdzenie o wiriale

dla kuli jednorodnej

$$\Omega = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$$

$$\Delta\Omega = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R^2} \Delta R$$

$$\Delta t = \frac{-\Delta\Omega}{2L}$$

$$t_{K-H} = \frac{\Omega}{2L_0} = 10^7 \text{ lat}$$

Słońce

$$R_0 = 6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$$

$$M_0 = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

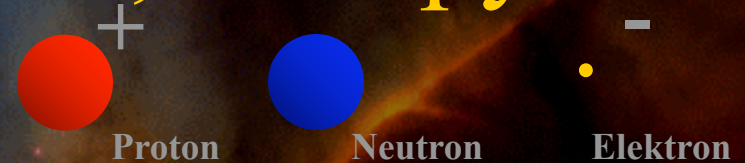
$$L_0 = 3,81 \cdot 10^{33} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta R}{\Delta t} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$$

$$\Omega = -2 \cdot 10^{41} \text{ J}$$

Atomy, pierwiastki, izotopy

- Atom składa się z jądra i elektronów. Jądro zawiera dodatnio naładowane protony i obojętne neutrony. Elektrony znajdują się na orbitach wokół jądra.
- Pierwiastki określone są przez właściwości chemiczne związane z liczbą protonów w jądrze.
- Izotopy pierwiastka mają różną liczbę neutronów.

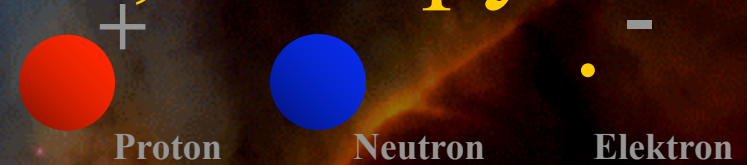
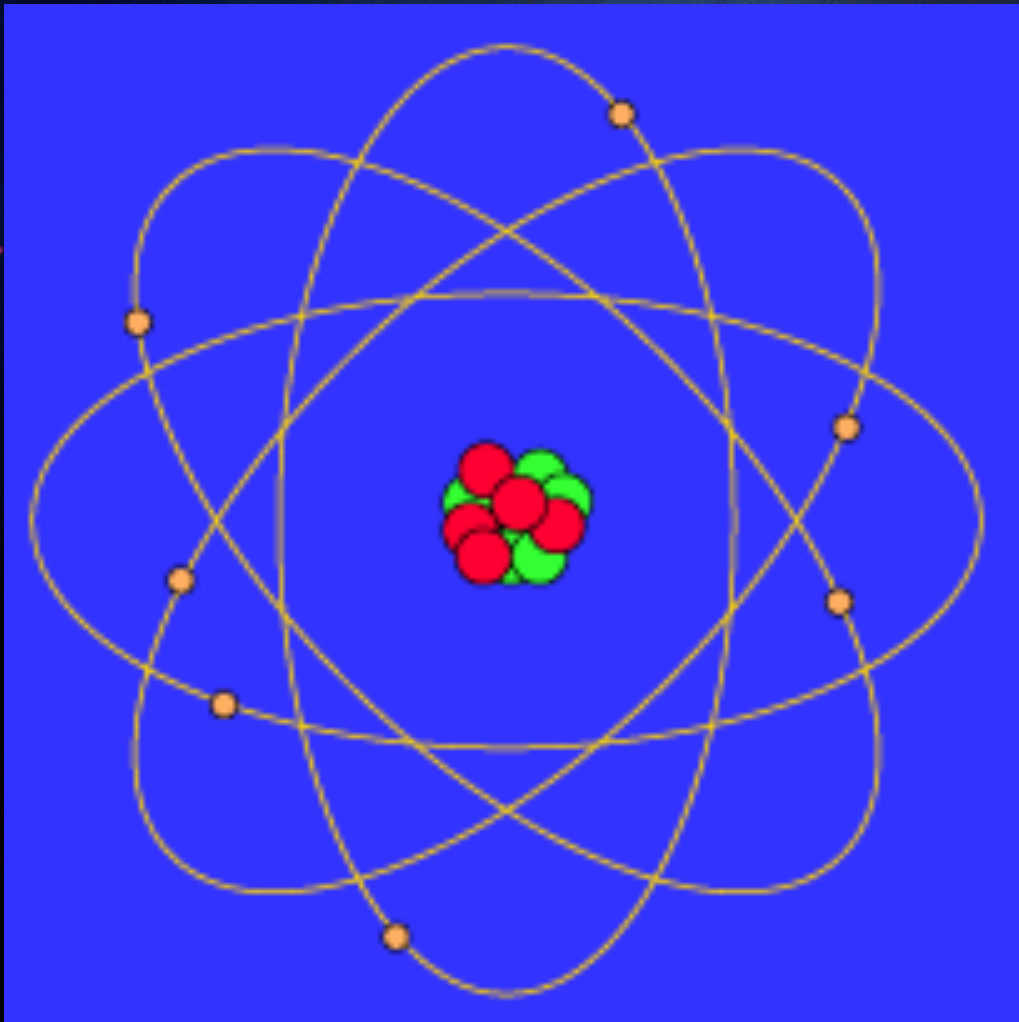


Masy: 1 : 1 : 0.0006

Ładunki: +1 : 0 : -1



Atomy, pierwiastki, izotopy



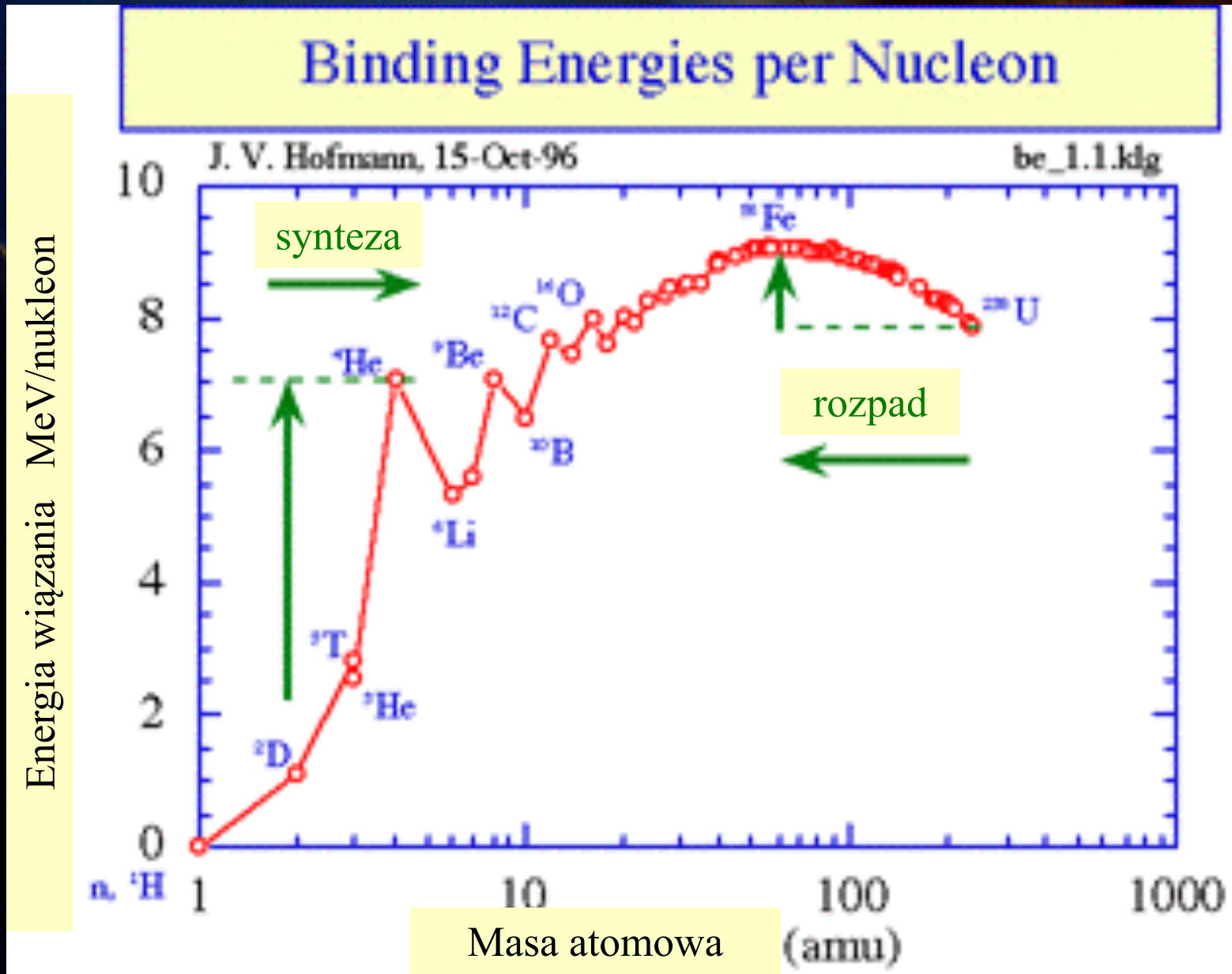
Masy: 1 : 1 : 0.0006

Ładunki: +1 : 0 : -1



- Typowe rozmiary atomu – 10^{-10} m; jądra 10^{-15} m.

Energia wiązania



Synteza i rozpad

- Rozpad polega na podziale jądra na dwie części
- Synteza polega na połączeniu się dwóch jąder lżejszych w jedno jądro cięższe. Syntezę helu z wodoru można podsumować tak:

$$E=mc^2$$

4 jądra H :	6.693×10^{-24} g
1 jądro He :	6.645×10^{-24} g
różnica masy:	0.048×10^{-24} g



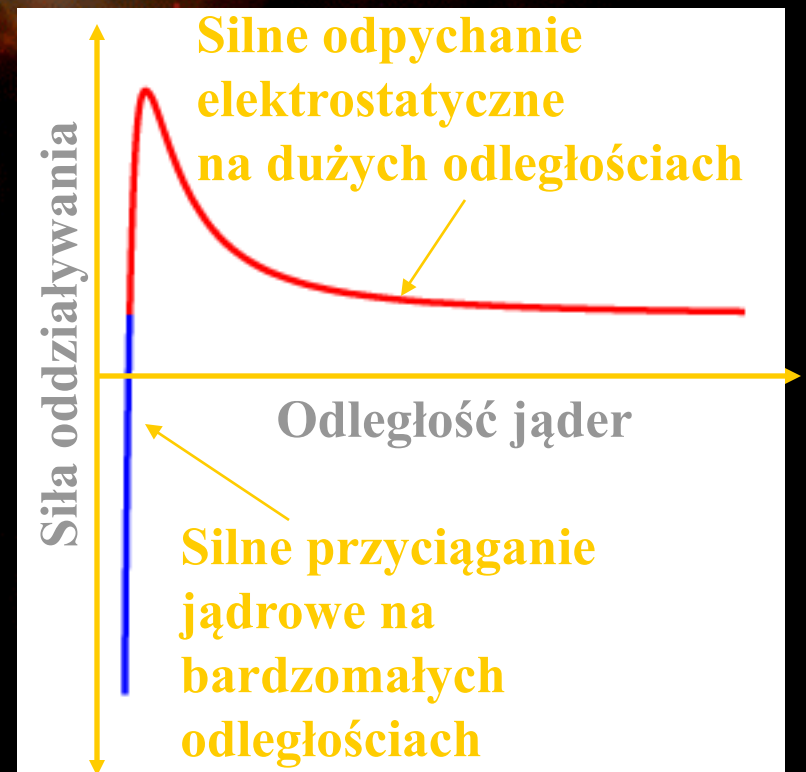
Synteza ta prowadzi do zamiany 0.7% masy w energię

Zarówno jądra lżejsze jak i cięższe od żelaza są niestabilne. Energię uzyskujemy zatem wtedy, gdy w syntezie jądrowej biorą udział jądra o masie atomowej mniejszej od żelaza lub rozpadają się jądra o masie atomowej większej od żelaza.

Warunki syntezy termojądrowej

Synteza termojądrowa:

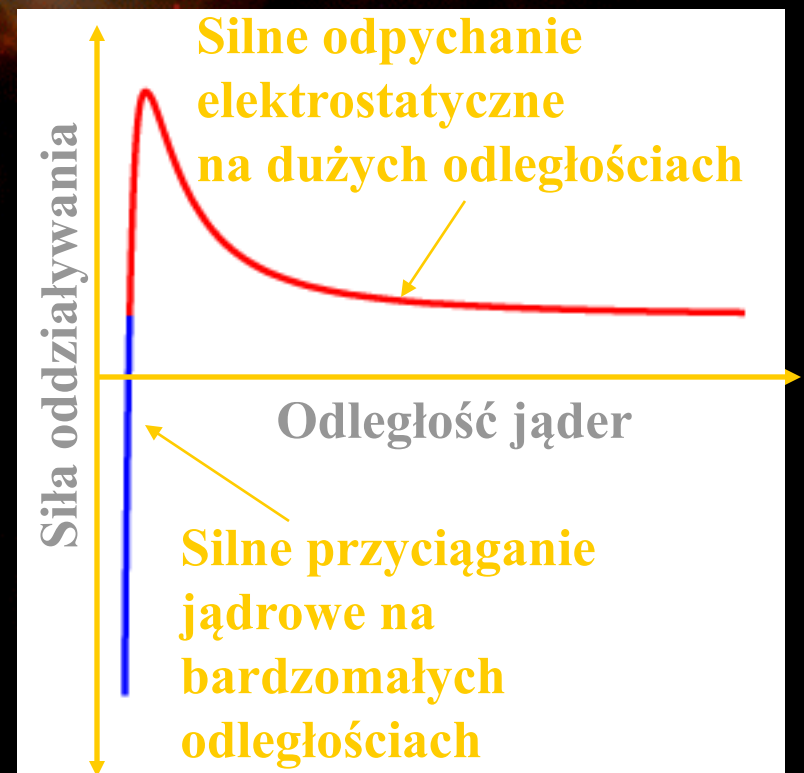
- długodystansowe siły odpychania elektrostatycznego utrudniają zderzenie dodatnich jąder
- jeśli jednak jądra zbliżą się dostatecznie blisko - krótkoasięgowe siły jądrowe zwiążą oba składniki



Warunki syntezy termojądrowej

Synteza termojądrowa wymaga wysokiej temperatury ~ 10 mln K

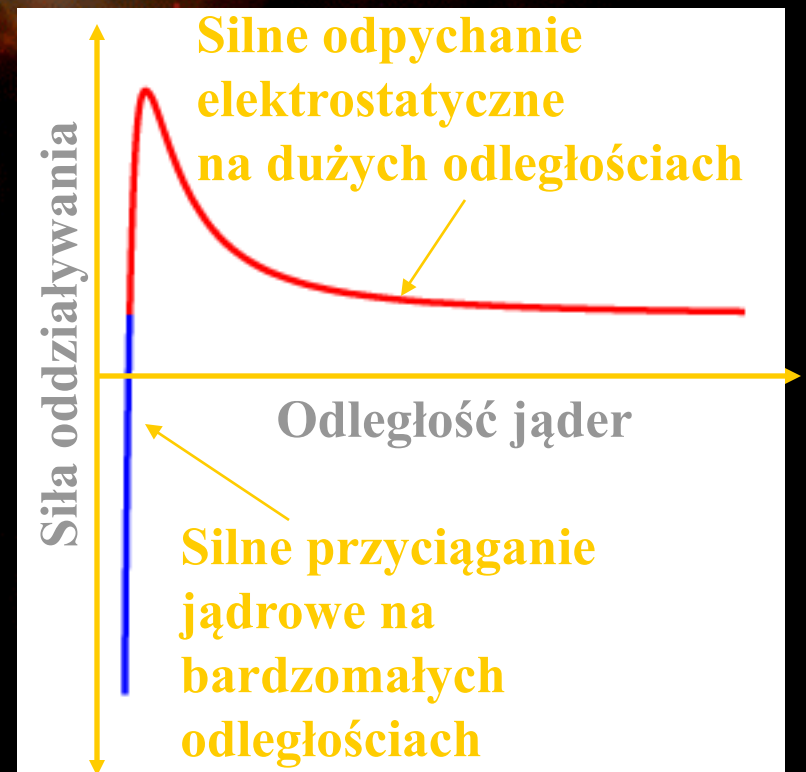
- by jądra miały prędkości wystarczające do pokonania sił odpychania
- im wyższy ładunek jąder tym większa jest siła odpychająca i trudniej jest połączyć jądra

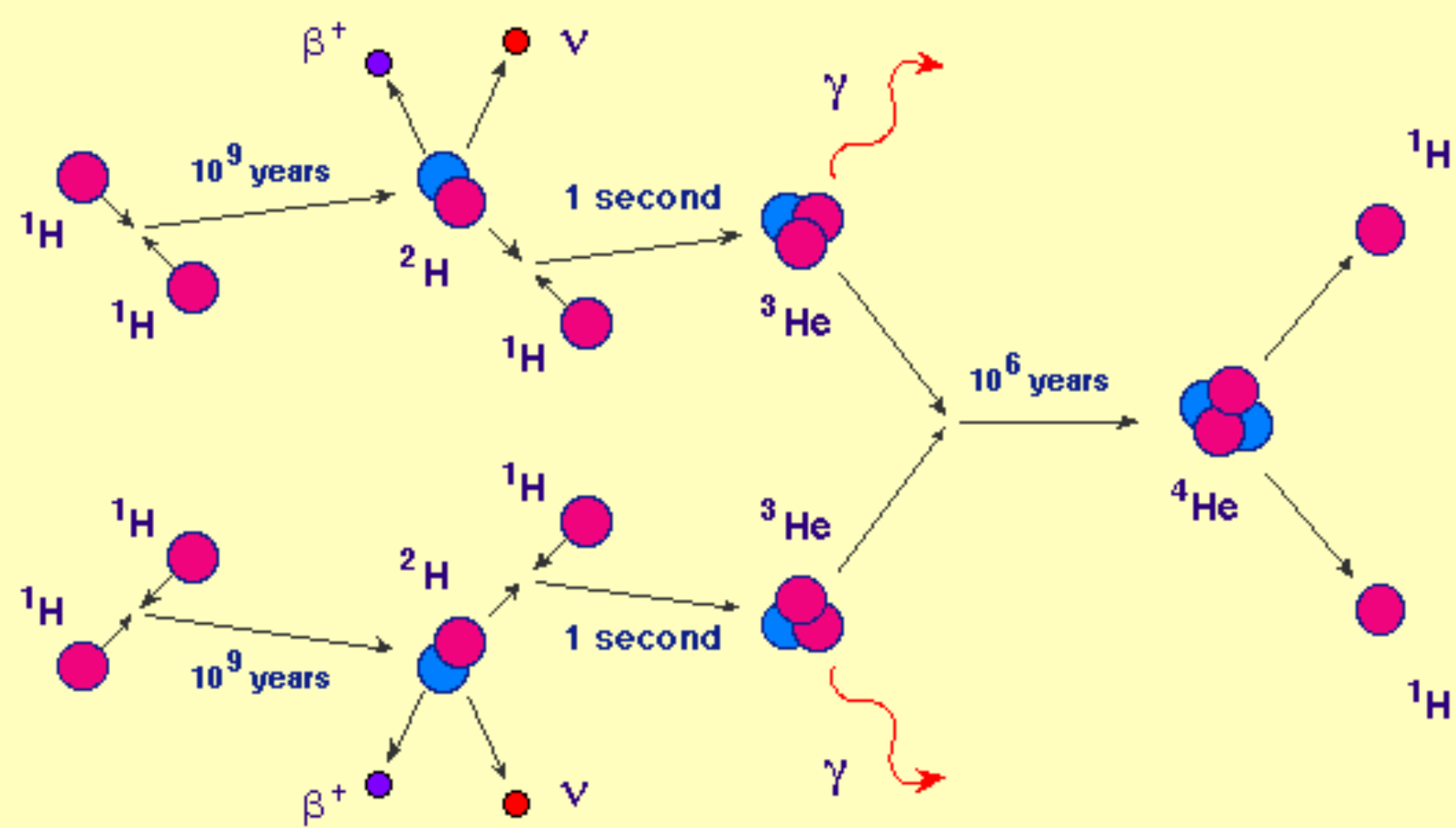


Warunki syntezy termojądrowej

Synteza termojądrowa wymaga dużej gęstości materii:

- by reakcje syntezy zachodziły wystarczająco często





----- ν Neutrino

 Positron

Modele gwiazd

- Równania budowy wewnętrznej
 - symetria sferyczna
 - równowaga hydrostatyczna
 - równowaga termiczna
 - transport promieniowania
 - promienisty, konwektywny
- Atmosfery gwiazd
 - widmo ciągłe (continuum)
 - widmo liniowe (absorpcyjne)

Modele gwiazd

- Dane wejściowe modelu (parametry):
 - masa gwiazdy (M)
 - skład chemiczny (X, Y, Z – obfitości masowe)
- Fizyczne własności materii:
 - równanie stanu $p(\rho, T)$
 - współczynnik ekstynkcji $\kappa(\rho, T)$
 - współczynnik generacji energii $\varepsilon(\rho, T)$

Modele gwiazd

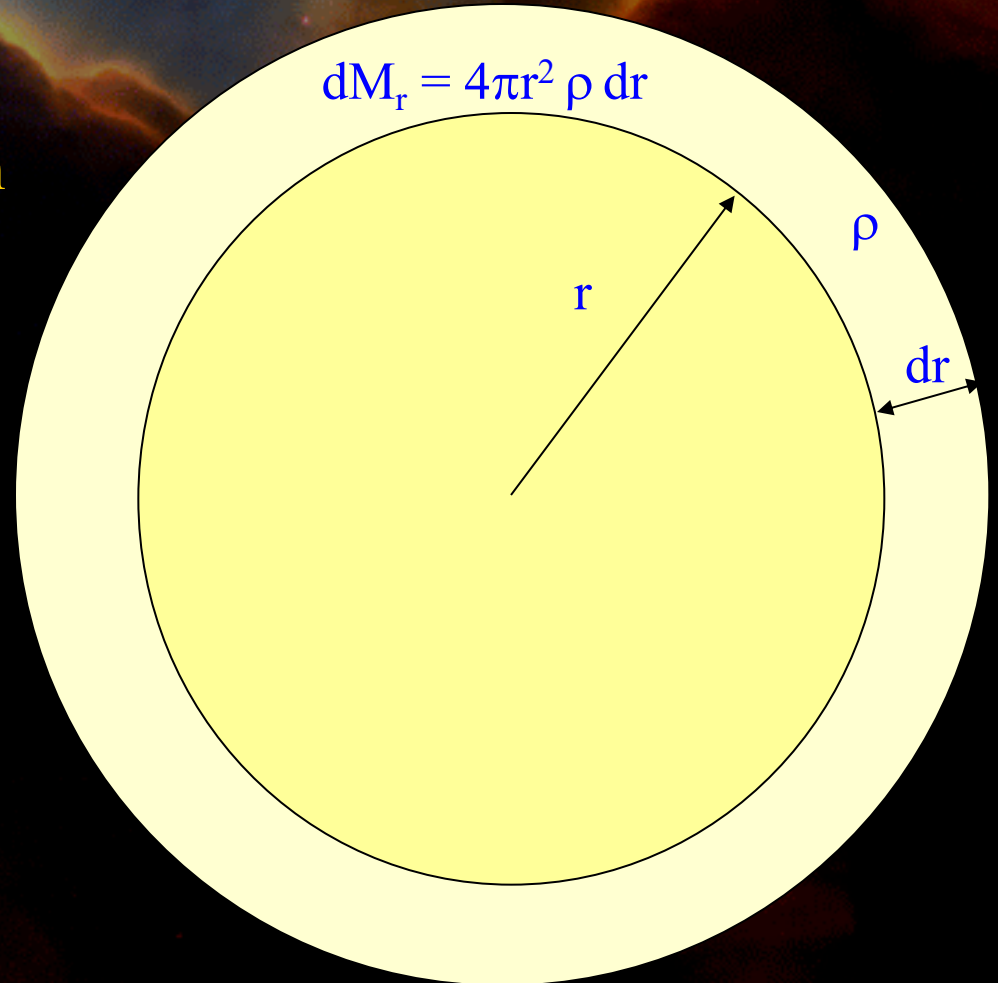
- Dane wejściowe modelu (parametry):
 - masa gwiazdy (M)
 - skład chemiczny (X, Y, Z – obfitości masowe)
- Fizyczne własności materii:
 - równanie stanu
 - współczynnik ekstynkcji κ
 - współczynnik generacji energii ϵ
- Warunki brzegowe:
 - we wnętrzu $M_r=0$: $r=0, L_r=0$
 - na zewnątrz: $M_r=M$: $r=R, L_r=L$
 - $m(r=R) = M$
 - $L(r=0) = 0$
 - $p(r=R)$ małe (np. 10^{-12})
 - $T(r=R)$ ze wzoru: $4\pi R^2 \sigma T^4(R) = L(R)$

Równanie ciągłości

Gwiazdę rozpatrujemy jako zespół koncentrycznych warstw o promieniu r , grubości dr i gęstości ρ .

Masa warstewki:

- $dM_r = 4\pi r^2 \rho dr$



$$dM(r,t) / dr = 4\pi r^2 \rho$$

Równowaga hydrostatyczna

- Skierowana do wnętrza gwiazdy siła ciężenia jest zrównoważona przez ciśnienie gazu.

masa warstewki:

- $dM_r = 4\pi r^2 \rho dr$

przyspieszenie grawitacyjne:

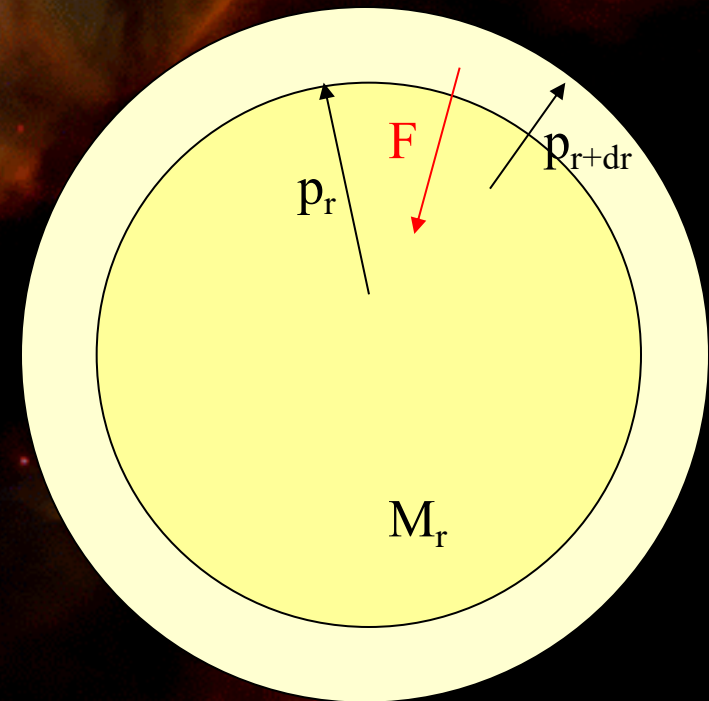
- $g = GM_r/r^2$

siła nacisku:

- $F = g dM_r = 4\pi r^2 \rho GM_r/r^2 dr$

siła pochodząca od różnicy ciśnień:

- $F = 4\pi r^2 (p_{r+dr} - p_r) = 4\pi r^2 dp$



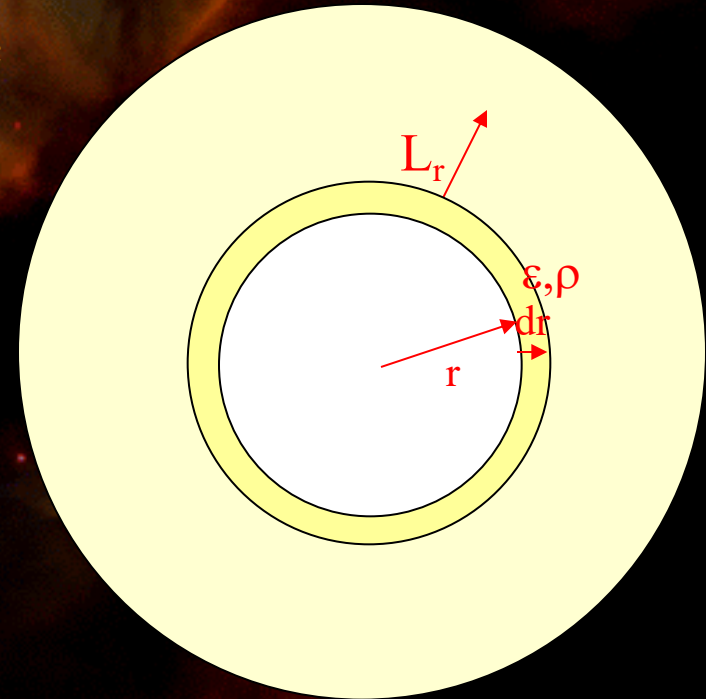
$$dp / dr = - \rho GM_r/r^2$$

Równowaga termiczna

- Energia wypromieniowywana z powierzchni gwiazdy powstaje w jej wnętrzu:

ilość energii uwalnianej w warstwie dr :

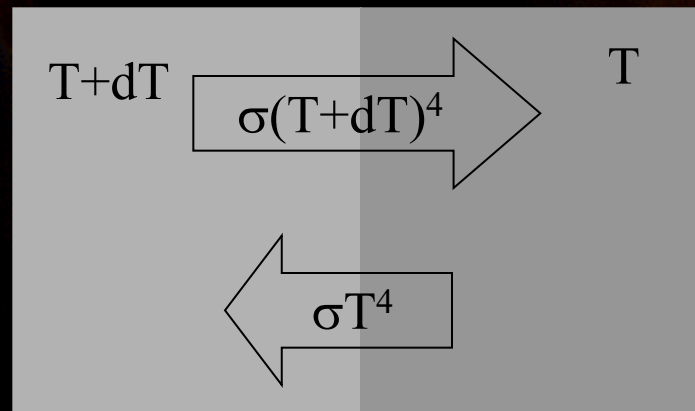
- $dL_r = \epsilon \rho 4\pi r^2 dr$
- ϵ oznacza tempo produkcji energii



$$dL_r / dr = 4\pi r^2 \epsilon \rho$$

Transport (przepływ) energii

- Transport przez promieniowanie
 - wskutek istnienia gradientu temperatury:
- dwa ciała doskonale czarne o temperaturach T i $T+dT$



Transport (przepływ) energii

- Różnica przepływającej energii:

$$dF = \sigma(T+dT)^4 - \sigma T^4 =$$

$$\sigma(T^4 + 4T^3 dT + 3T^2 (dT)^2 + 4T (dT)^3 + (dT)^4 - T^4) =$$

$$\approx T^3 dT$$

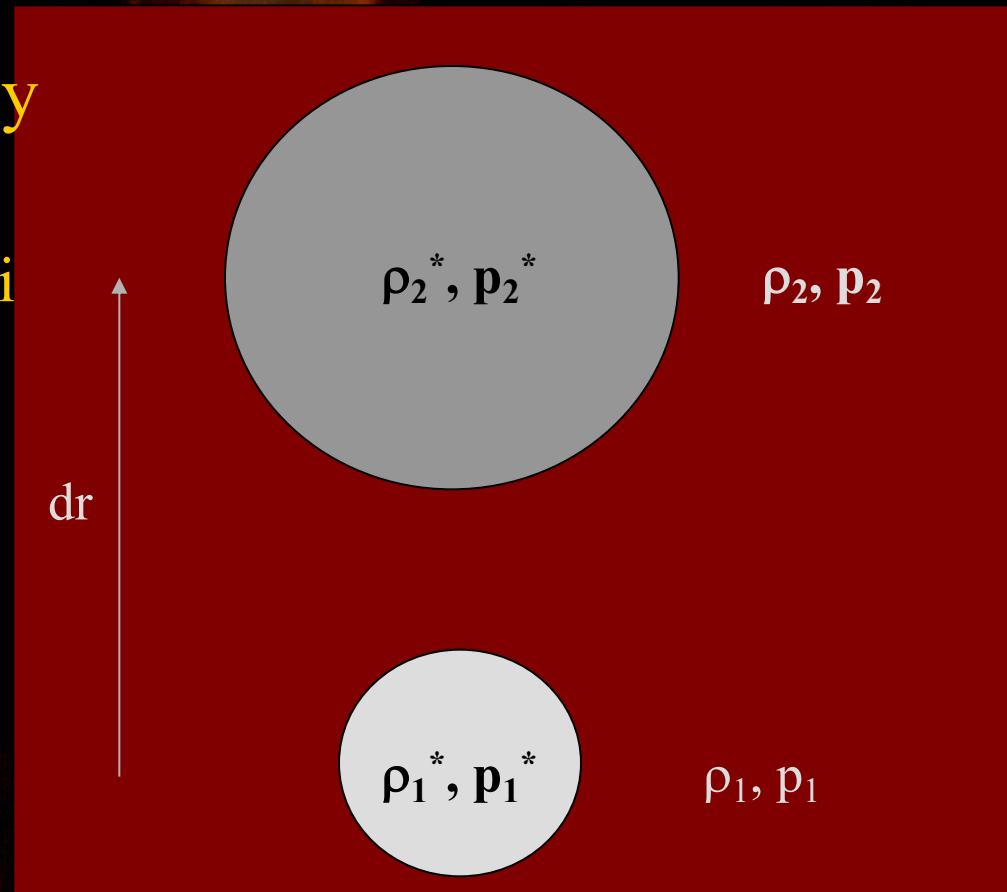
- Jasność gwiazdy w odległości r od środka:

$$L_r = 4\pi r^2 F_r$$

- Dostajemy $dT/dr = (3/64\pi^2\sigma) \kappa L_r / (T^3 r^2)$
gdzie κ jest „nieprzezroczystością”

Transport (przepływ) energii

- Transport przez konwekcję:
 - wskutek niewystarczającej wymiany ciepła z otoczeniem
- bąbelek gazu poruszający się w górę
 - opisany przez gęstość ρ^* i ciśnienie p^*
- otoczenie:
 - ρ i p
- przemiana adiabatyczna
 - $p_1^* (V_1^*)^\gamma = p_2^* (V_2^*)^\gamma$
 - $p_1^* (\rho_1^*)^{-\gamma} = p_2^* (\rho_2^*)^{-\gamma}$



Transport (przepływ) energii

- Na poziomie wyjściowym:

$$\rho_1^* = \rho_1 \text{ oraz } p_1^* = p_1$$

przemiana adiabatyczna w bąbelku poruszającym się w górę:

$$p_2^* = p_2 \text{ oraz: } \rho_2 = \rho_1^* (p_2^* / p_1^*)^{1/\gamma} = (p_2 / p_1)^{1/\gamma}$$

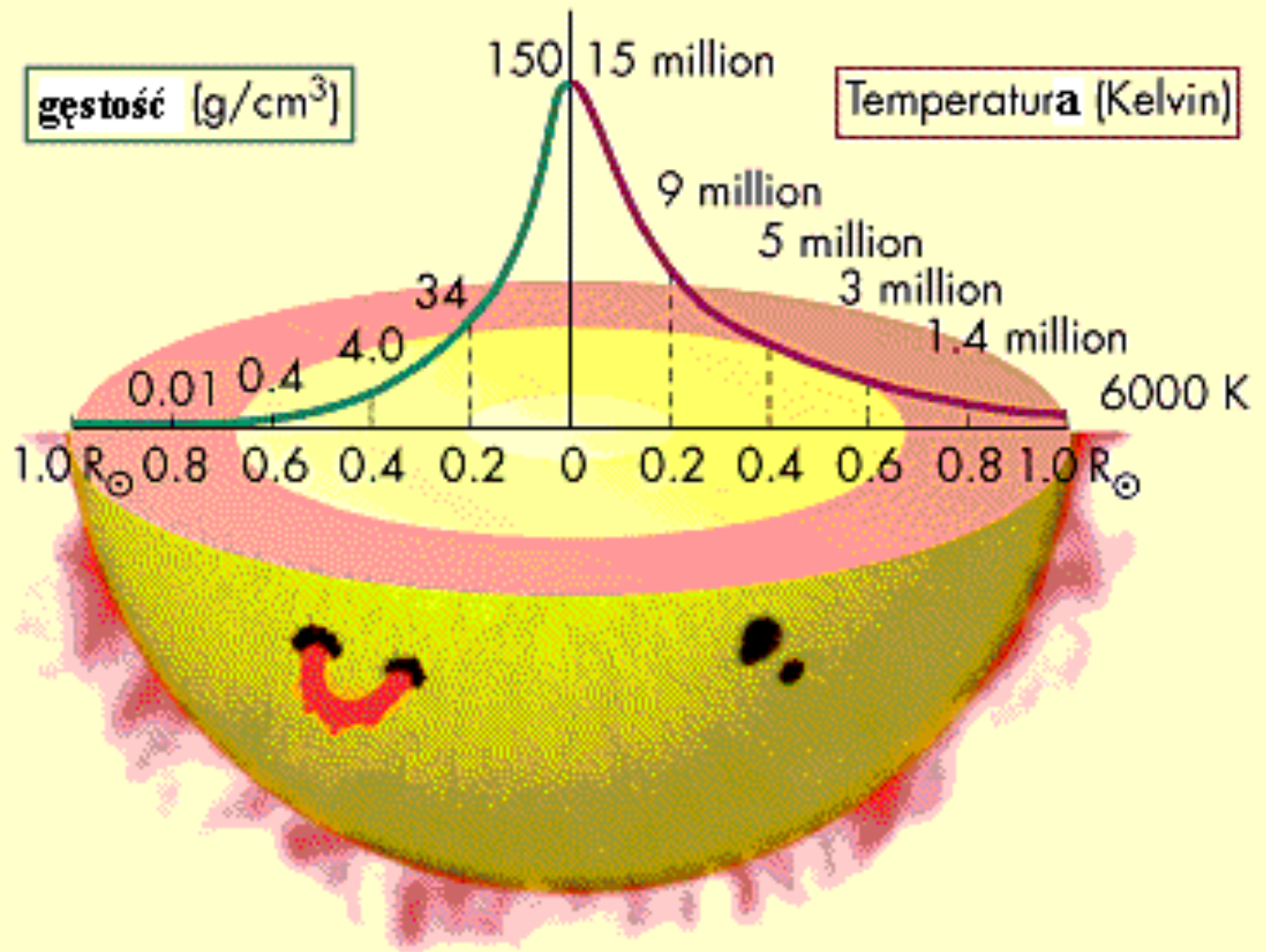
warunek stabilności:

$$\rho_2^* > \rho_2 \quad \rightarrow \quad \rho_2^* > \rho_1 (p_2 / p_1)^{1/\gamma}$$

- wykorzystując równanie stanu gazu doskonałego dostajemy:

$$(dT/dr)_{ad} > (dT/dr)_*$$

Gęstość i temperatura wnętrza



Ewolucja gwiazd

- zależność Masa-Jasność

$$dp/dr \sim -\rho GM/ r^2$$

$$\rho \sim M/ R^3$$

$$P/R \sim M^2 /R^5$$

$$T \sim \mu m_H/k (p/\rho)$$

$$T \sim M/R$$

$$dT/dr \sim \kappa L/ (T^3 r^2)$$

$$T/R \sim \kappa L/ (T^3 R^2)$$

przy czym $\kappa' = \kappa/\rho = \text{const}$

$$L \sim M^3$$

Twierdzenie o wiriale

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} = \Omega + 2 E_k$$

układ statyczny $\Rightarrow \frac{d^2 I}{dt^2} = 0$

tw. o wiriale $\Omega = -2 E_k$

energia całkowita $E = U + \Omega$

dla gazu jednost.
($E_k = U$)

$$\underline{E} = U - 2U = \underline{-U} = \underline{\frac{1}{2} \Omega}$$

Powstawanie gwiazd

$2E_k = -\Omega$, kula jednorodna o temp. T , gęstości ρ , prom R

$$E_k = \frac{3}{2} \frac{kT}{\mu m_H} \cdot M \quad , \quad \Omega = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$$
$$\Rightarrow \frac{3kT}{\mu m_H} M = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} \Rightarrow$$

Powstawanie gwiazd

$2E_k = -\Omega$, kula jednorodna o temp. T , gęstości ρ , prom R

$$E_k = \frac{3}{2} \frac{kT}{\mu m_H} \cdot M, \quad \Omega = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$$

$$\Rightarrow \frac{3kT}{\mu m_H} M = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} \Rightarrow$$

1. $M_J = 3.78 \cdot 10^{-9} \left(\frac{T}{\mu}\right)^{3/2} \rho^{-1/2} [M_\odot]$ masa JEANSA

$$\left. \begin{array}{l} \rho \sim 10^{-21} \div 10^{-18} \text{ kg/m}^3 \\ T \sim 20 \div 100 \text{ K} \end{array} \right\} \rightarrow M_J \sim 10^2 \div 10^5 M_\odot$$

$$s = \frac{a \cdot t^2}{2} \Rightarrow R = \frac{GM}{2R} t^2 \Rightarrow t_D \approx \left(\frac{R^3}{GM}\right)^{1/2} \sim 10^5 \frac{1}{\sqrt{\rho}} [s]$$

$$\rho \sim 10^{-18} \text{ kg/m}^3 \rightarrow t_D \sim 10^6 - 10^7 \text{ lat}$$

$\rho \uparrow \Rightarrow t_D \downarrow$

Powstawanie gwiazd

1. Obłok kurczy się w dynamicznej skali czasowej

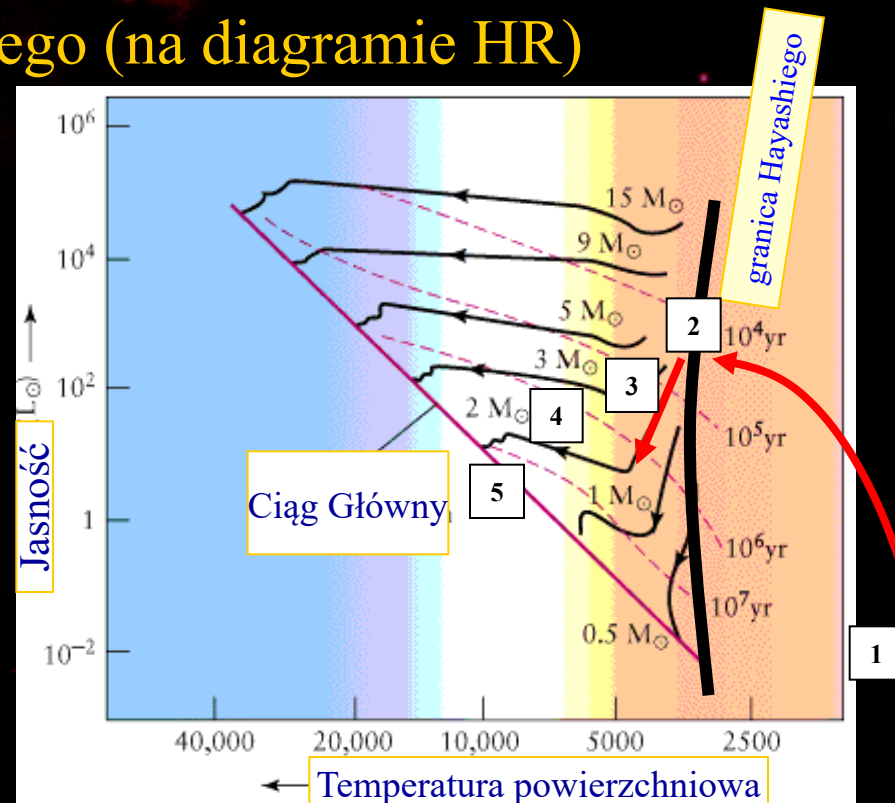
- $R \downarrow$ (maleje) ścieki energii:
- $L \uparrow$ (rośnie) 20,000 K - dysocjacja H_2
- $T \uparrow$ (rośnie) 40,000 K - jonizacja H, potem He

2. Obłok osiąga granicę Hayashiego (na diagramie HR)

- konfiguracja konwektywna
- w równowadze hydrostatycznej

3. Kurczy się w termicznej skaliczasowej wzdłuż drogi ewolucyjnej Hayashiego

- $R \downarrow$ (maleje)
- $L \downarrow$ (maleje)
- $T_{\text{eff}} \sim \text{stałe}$



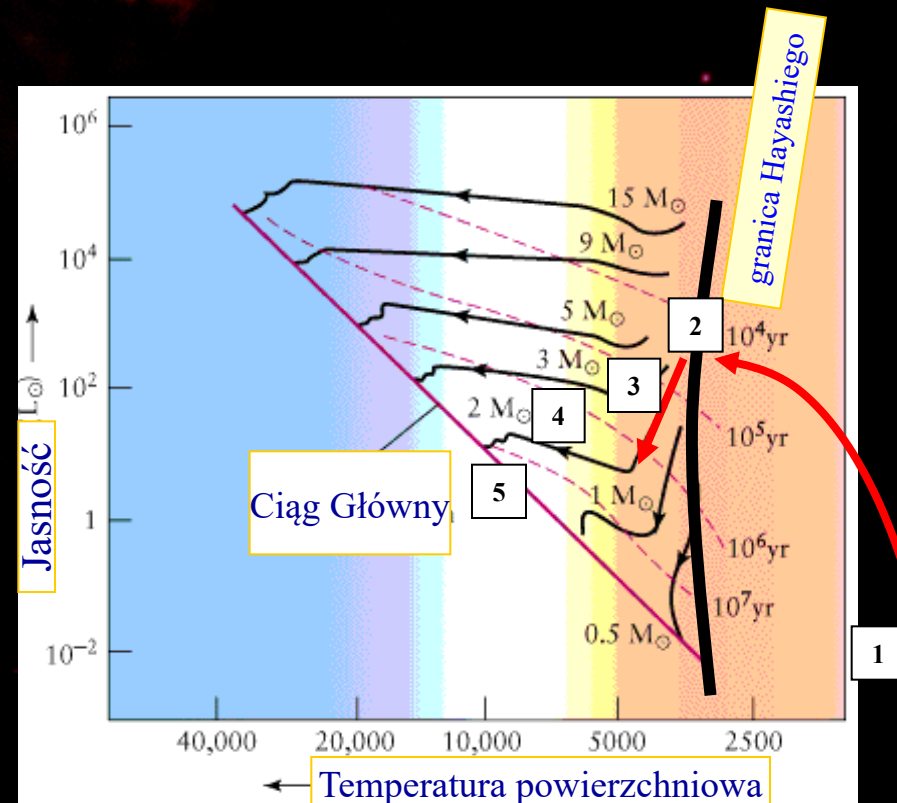
Powstawanie gwiazd

4. Powstaje promieniste jądro

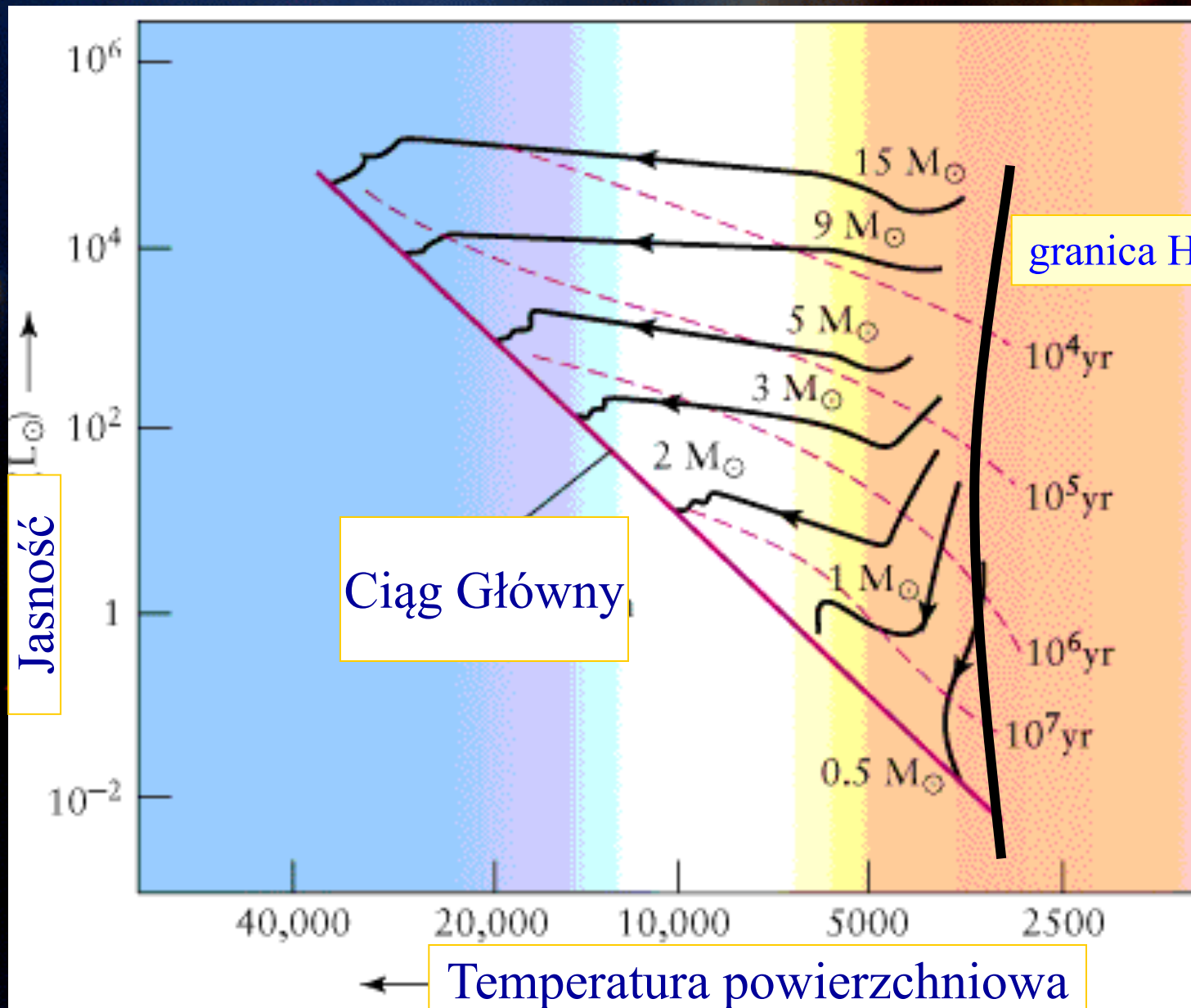
- $R \downarrow$ (maleje)
- $L \downarrow$ (maleje)
- $T_{\text{cent}} \uparrow, T_{\text{eff}} \uparrow$ (rosną)

5. Temperatura centralna wystarczająca do zapoczątkowania reakcji termojądrowych.

- Gwiazda jest na **Ciągu Głównym**



Przed Ciągiem Głównym



Istota ewolucji gwiazd

- $4 \text{ x H} \rightarrow {}^4\text{He}$
 - zmniejszenie liczby cząstek gazu $N \downarrow$
 - obniżenie ciśnienia ($p \sim \rho T$) $p_c \downarrow$
- wyrównanie (podniesienie) ciśnienia wymaga wzrostu temperatury $T_c \uparrow$
- jest to możliwe tylko dzięki grawitacyjnemu skurczeniu się jądra $R_j \downarrow$

Istota ewolucji gwiazd

- Wzrost temperatury centralnej powoduje zwiększenie się gradientu temperatury
– $dT/dR \uparrow$
- a ten nie może być zbyt duży, bo gwiazda odprowadzałaby więcej energii niż ma do dyspozycji;
- w tej sytuacji musi wzrosnąć zewnętrzny promień gwiazdy: $R \uparrow$
- temperatura efektywna zmienia się: $T_{\text{eff}} \uparrow \downarrow$

Ewolucja gwiazd

$$E=mc^2$$

4 jądra H :	6.693×10^{-24} g
1 jądro He :	6.645×10^{-24} g
różnica masy:	0.048×10^{-24} g

Synteza ta prowadzi do zamiany 0.7%
masy w energię

- nuklearna skala czasowa:

$$t_n = 0.007 \alpha Mc^2/L$$

- $0.007 = 26.7 \text{ MeV} / (4 * 931.5 \text{ MeV})$

- $\alpha \sim 0.1$

$$t_n = 10^{10} (M/M_\odot) / (L/L_\odot) \text{ lat}$$

Ewolucja gwiazd

Gwiazdy małomaszywne, np. $1 M_{\odot}$

1. spalanie wodoru w jądrze konwektywnym

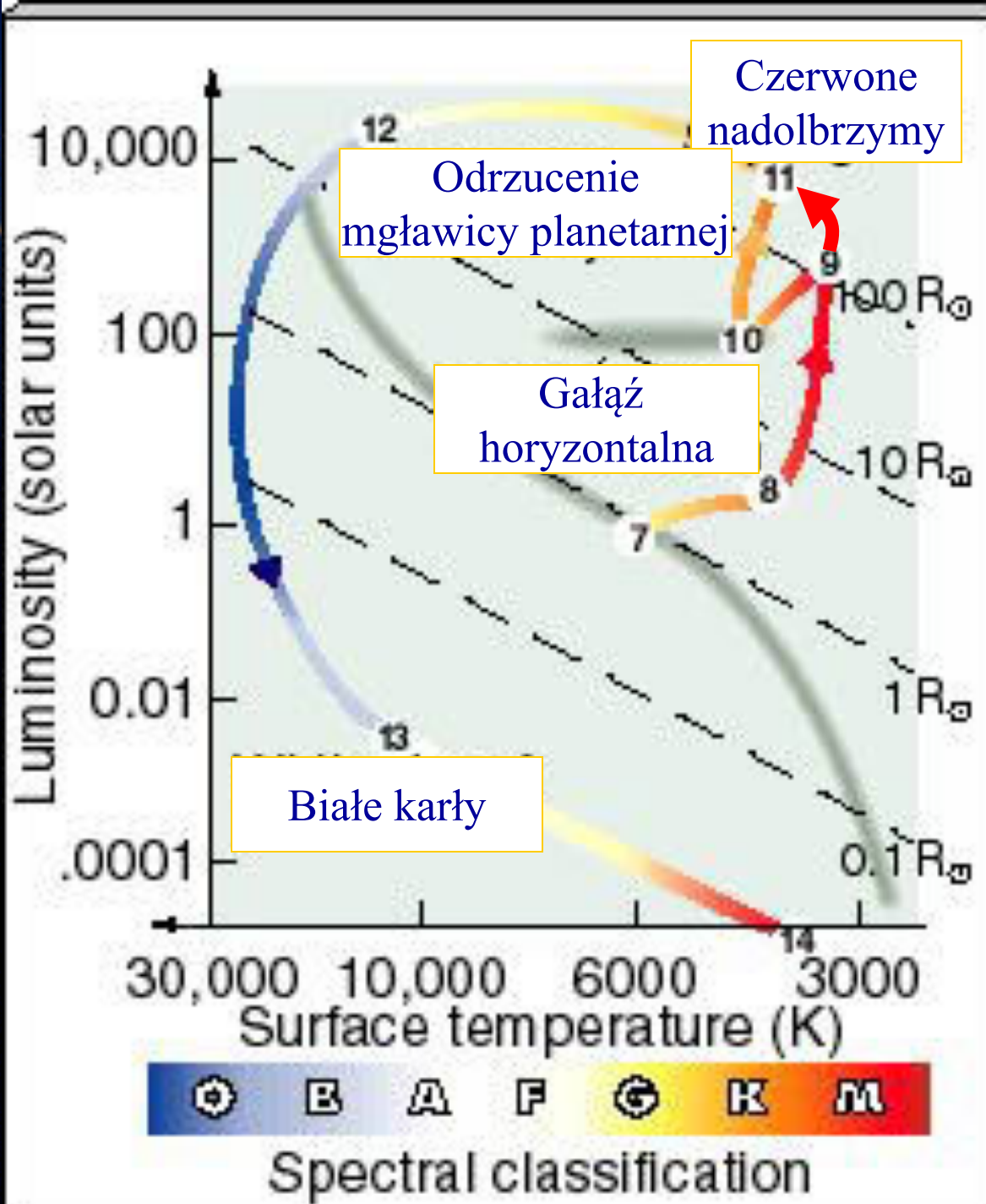
– profil łagodny – brak wyraźnej granicy jądra

7×10^9 lat

2. Palenie wodoru w otoczce jądra

5×10^9 lat

3. Konwekcja – ewolucja wzdłuż granicy Hayashiego



Ewolucja gwiazd

Najmniej masywne gwiazdy: $M < 0.8 M_{\odot}$

4. zdegenerowane jądro helowe kurczy się a otoczka ekspanduje
 - czerwone nadolbrzymy
 - wiatr gwiazdowy
5. $R \sim 100-200 R_{\odot}$ - odrzucenie otoczki
 - mgławice planetarne
6. pozostaje odsłonięte jądro z $T \sim 50,000 \text{ K}$
 - biały karzeł helowy (z liniami H w widmie) - DA

Ewolucja gwiazd

Mało masywne gwiazdy: $0.8 M_{\odot} < M < 3M_{\odot}$ (np. Słońce)

4. Zapalenie helu

- jądro zdegenerowane: $p(\rho, T) = p(\rho) \rightarrow T \uparrow$, ale $p = \text{const!}$
- błysk helowy: $T_{\text{cent}} \uparrow^{2x}$, $L_{\text{cent}} \sim 10^{11} L_{\odot}$
- gwiazda kurczy się $R \downarrow$, $L \downarrow$, $T_{\text{eff}} \uparrow$
- gałąź horyzontalna- czerwone olbrzymy
 - palenie helu („helowy ciąg główny”)

5. odrzucenie otoczki

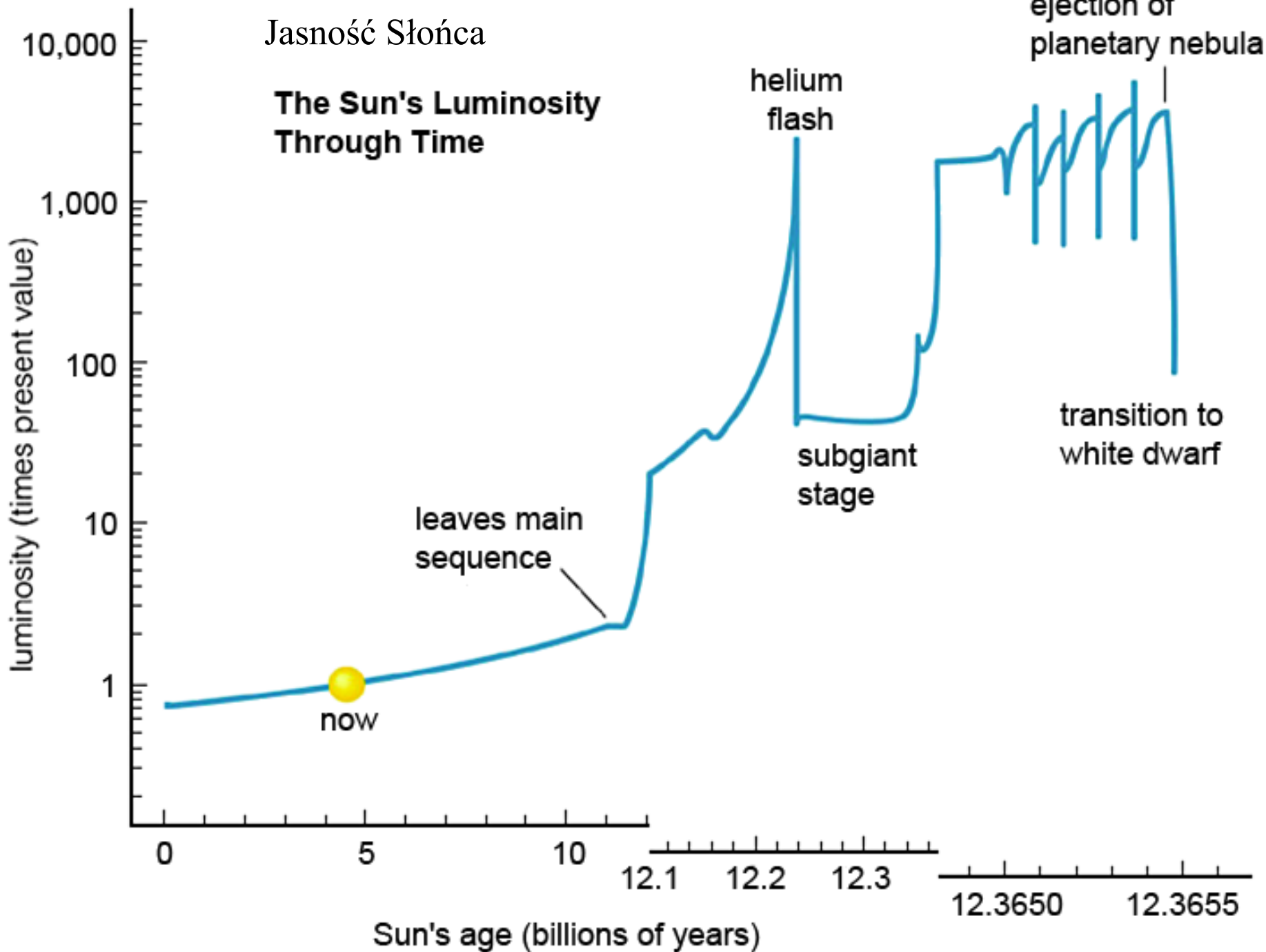
- mgławice planetarne

6. jądro mgławicy planetarnej

- biały karzeł węglowy (z liniami He w widmie) - DB

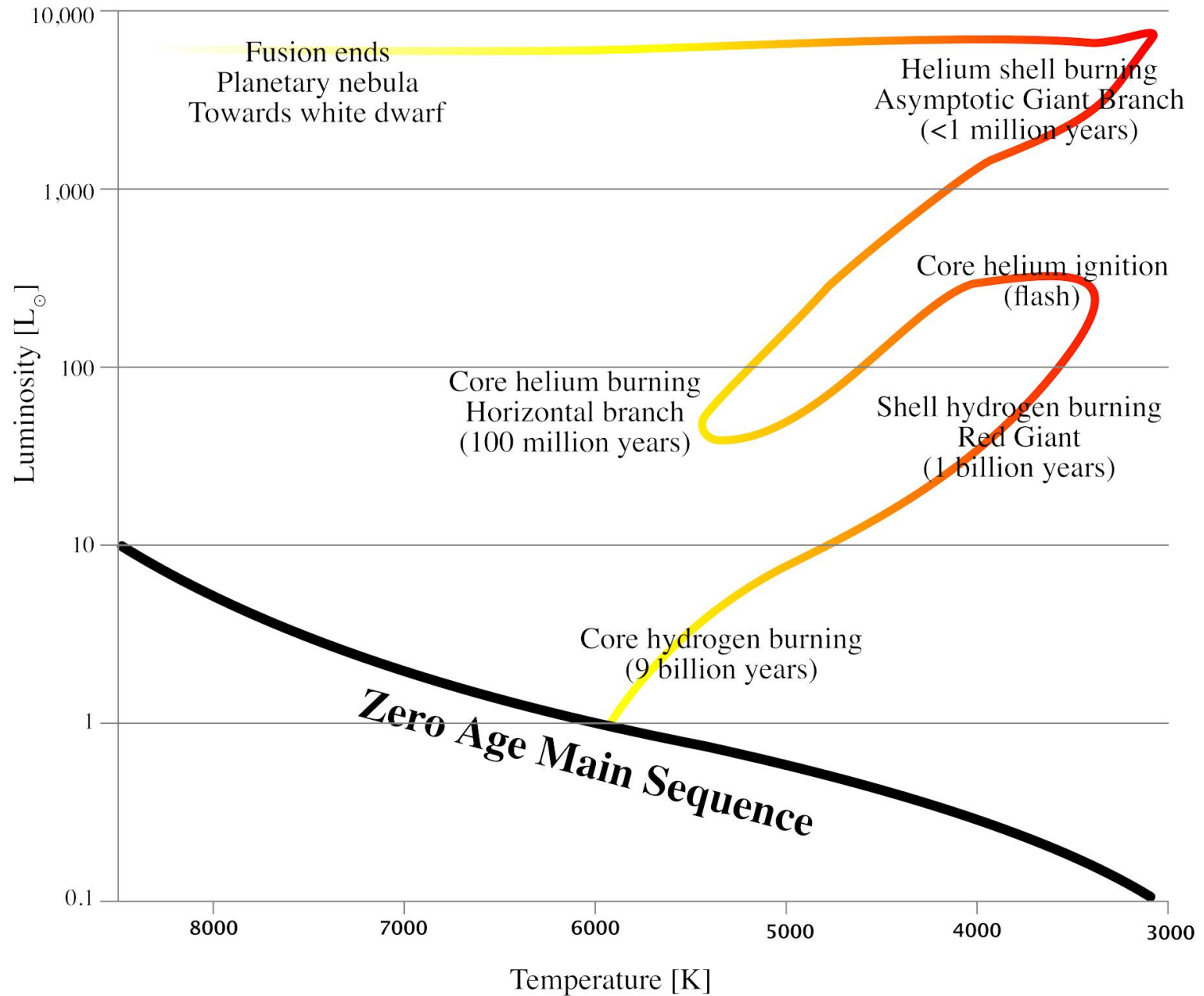
Jasność Słońca

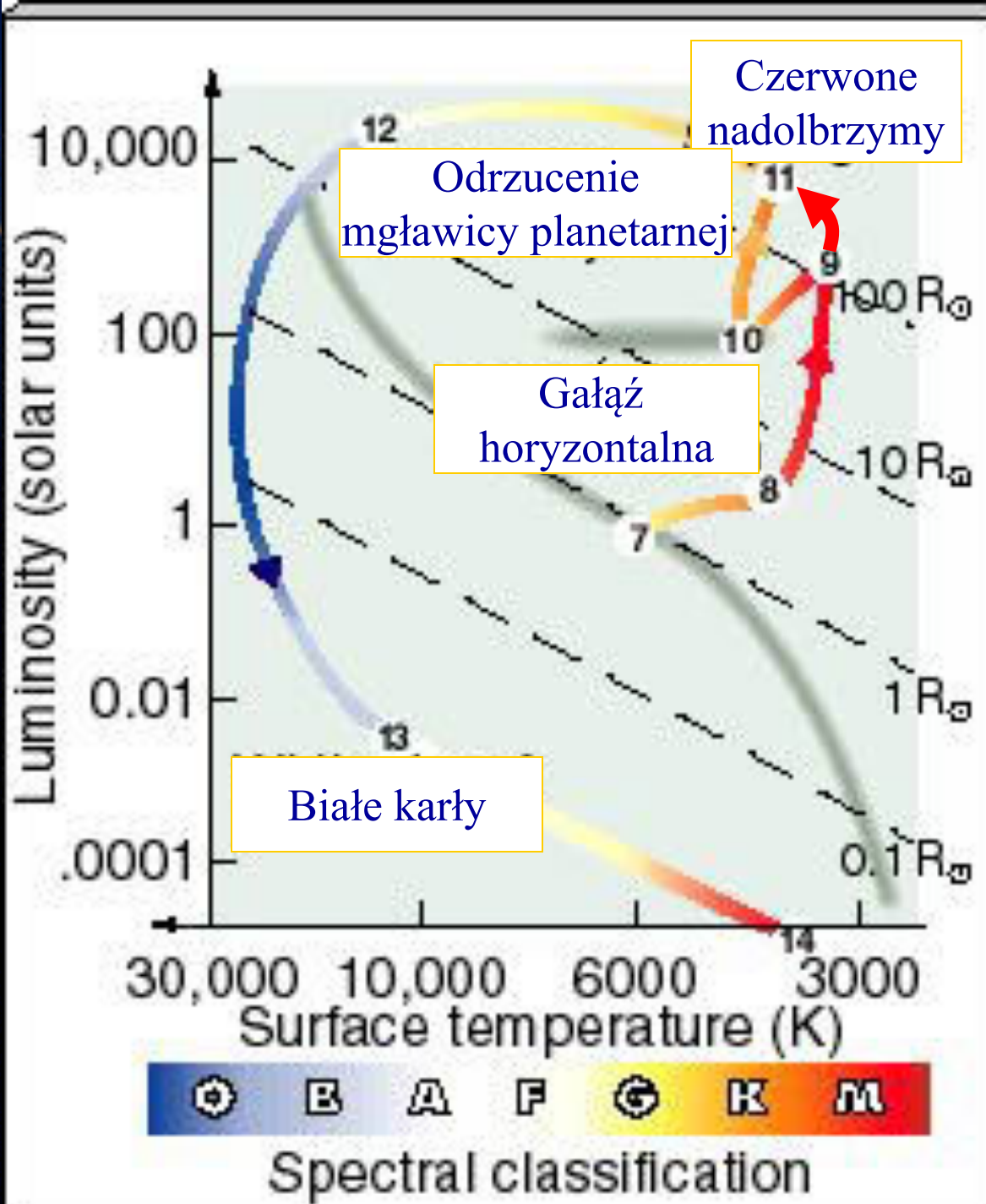
The Sun's Luminosity Through Time



Evolution of the Sun

from main sequence to end of fusion





Ewolucja gwiazd

Gwiazdy masywne: np. $9 M_{\odot}$

1. spalanie wodoru w jądrze

- jądro obejmuje 20% masy gwiazdy
- $\mu \uparrow$ (masa cząsteczkowa rośnie) \rightarrow jądro kurczy się
- $(T_c, L, \rho_c) \uparrow \rightarrow (T_c - T_p) \uparrow \rightarrow dT/dr \sim L \uparrow \rightarrow R \uparrow \rightarrow T_{\text{eff}} \uparrow$
- jądro 8% masy, ponad jądrem sporo helu

20x10⁶ lat

2. dopalanie wodoru w jądrze

- cała gwiazda kurczy się $\rightarrow T_c \uparrow$

600 tys lat

3. palenie wodoru w „skorupce”

- helowe jądro kurczy się i staje izotermiczne
- „skorupka” paląca wodór przesuwa się na zewnątrz
- $dT/dr \uparrow \rightarrow L \uparrow \rightarrow R \uparrow \rightarrow T_{\text{eff}} \uparrow$

10 tys lat

Ewolucja gwiazd

4. Przebudowa jądra

- $T \uparrow \rightarrow \varepsilon \uparrow \rightarrow \Delta R \downarrow \rightarrow L \downarrow \rightarrow$
- $\rightarrow dT/dr \uparrow \rightarrow R \uparrow \rightarrow T_{\text{eff}} \downarrow$

150 tys lat

5. Ewolucja na gałęzi olbrzymów

- pojawia się konwekcja (50% R) – mieszanie
- jądro kurczy się $\rightarrow R \uparrow L \uparrow$

60 tys lat

6. Zapalenie helu (proces $3\alpha \rightarrow C$)

- ekspansja jądra, $(T, L, R) \downarrow \rightarrow T_{\text{eff}} \uparrow$

500 tys lat

7. Konwekcja zanika, równowaga promienista

- palenie He w jądrze (5% L i \uparrow)
- palenie H w otoczce (95% L i \downarrow)

100 tys lat

Ewolucja gwiazd

- wzrost znaczenia reakcji 3α
- ciąg główny „helowy”
- palenie helu w otoczce

3 mln lat

160 mln lat

Gwiazdy średnio masywne ($< 10 M_{\odot}$)

- powstaje zdegenerowane jądro węglowe
 - kurczy się do $T \sim 10^9$ K
- błysk węglowy lub **supernowa** ($\epsilon \sim T_c^{120}$)

→ mgławica + gwiazda neutronowa

Gwiazdy bardzo masywne ($> 10 M_{\odot}$) :

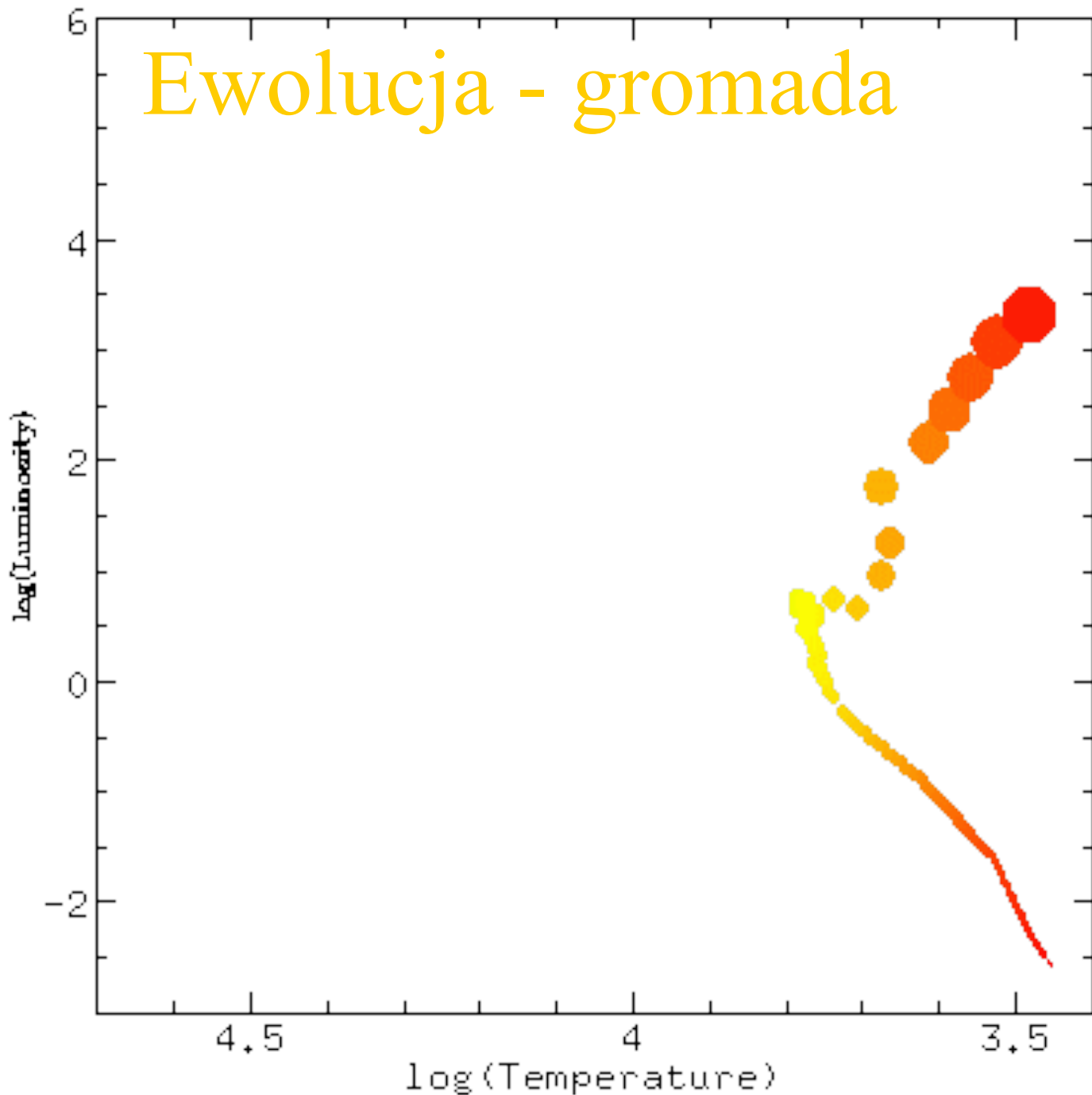
- nigdy nie wytwarzają zdegenerowanego jądra
- powstają koncentryczne warstwy spalania pierwiastków
- zapadnięcie się jądra - **supernowa**

→ mgławica + ??

Supernowe

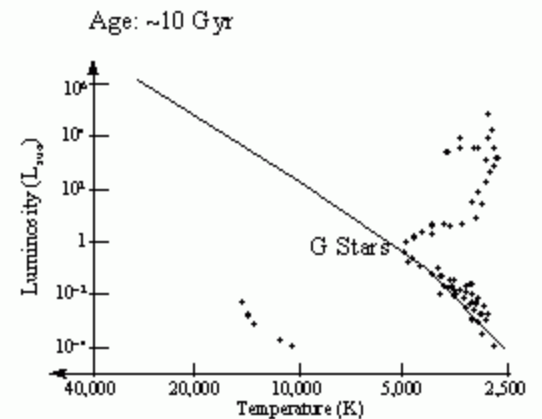
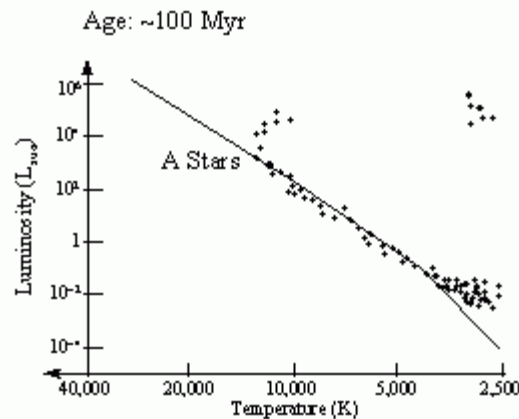
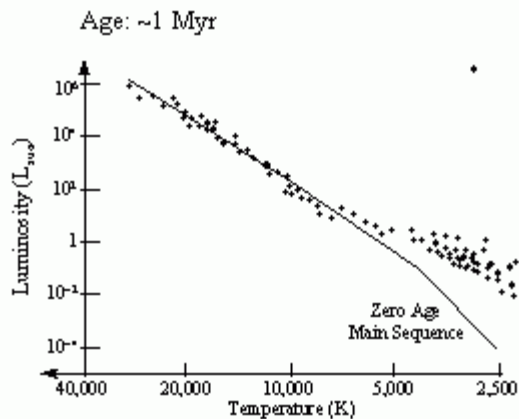
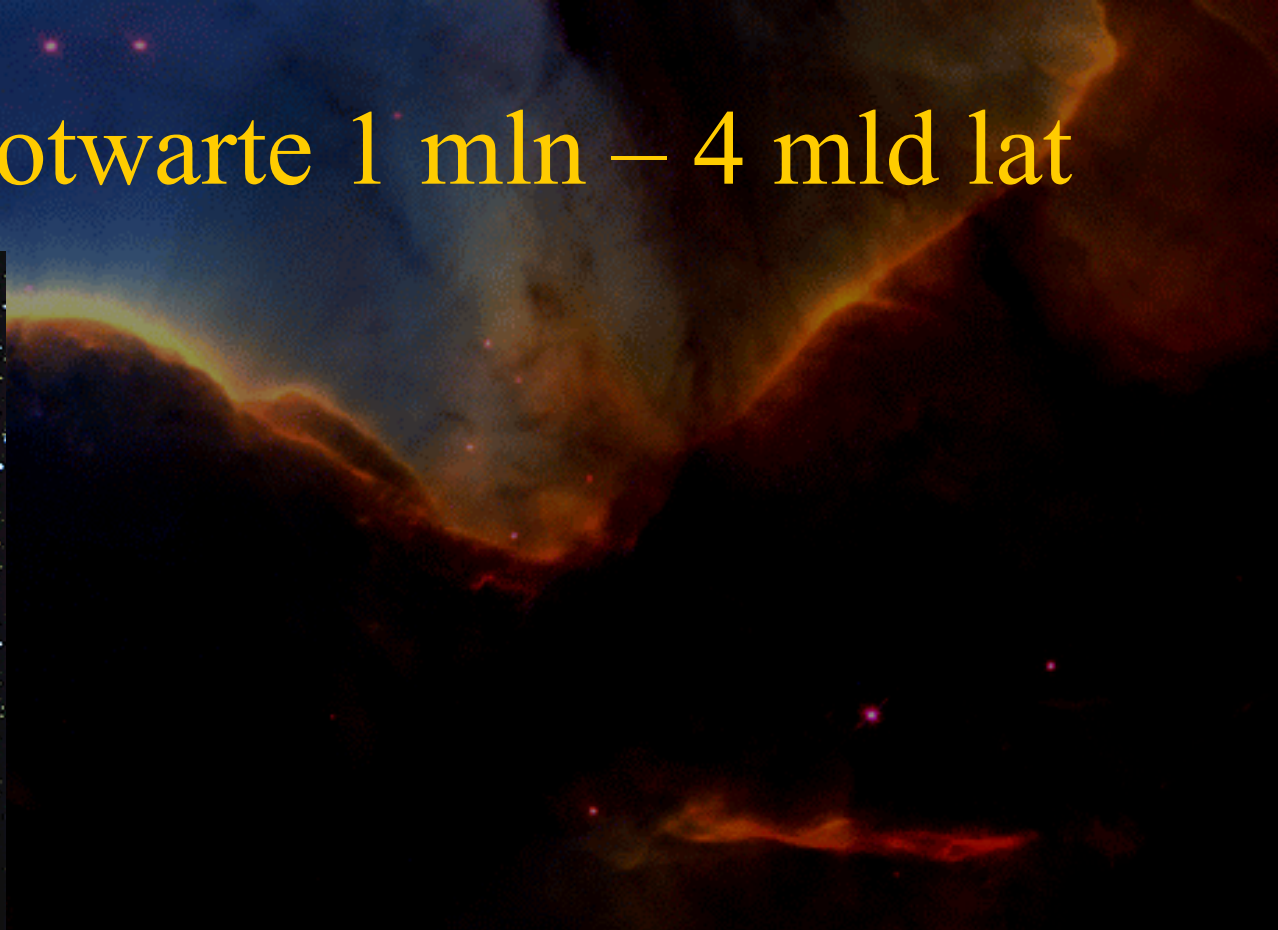
SN Ia	SN Ib	SN II
brak linii Sp wodoru	brak linii wodoru	linie wodoru
$M_B = -19.69 \pm 0.45$	$\sim -18^m$	$-18^m \pm 0.8$
$v_0 > 10^4 \frac{\text{km}}{\text{s}}$	$> 10^4 \frac{\text{km}}{\text{s}}$	$< 10^4 \frac{\text{km}}{\text{s}}$
$\Delta M \sim 1 M_\odot$	$\sim 1 M_\odot$	$\sim 5 M_\odot$
progenitor		
biały karol $\sim 1 M_\odot$	gwiazda W-R 15-20 M_\odot	nadolbny $> 8 M_\odot$
przebieg		
akrecja na białego karła	zapadnięcie się jądra - fotodisintegracja żelaza	zapadnięcie się jądra - neutronizacja materii
prostota		
mątwica	mątwica + ?	mątwica + gwiazda neutronowa

Ewolucja - gromada



Start
80 mld
256 mld
3 mld
8 mld

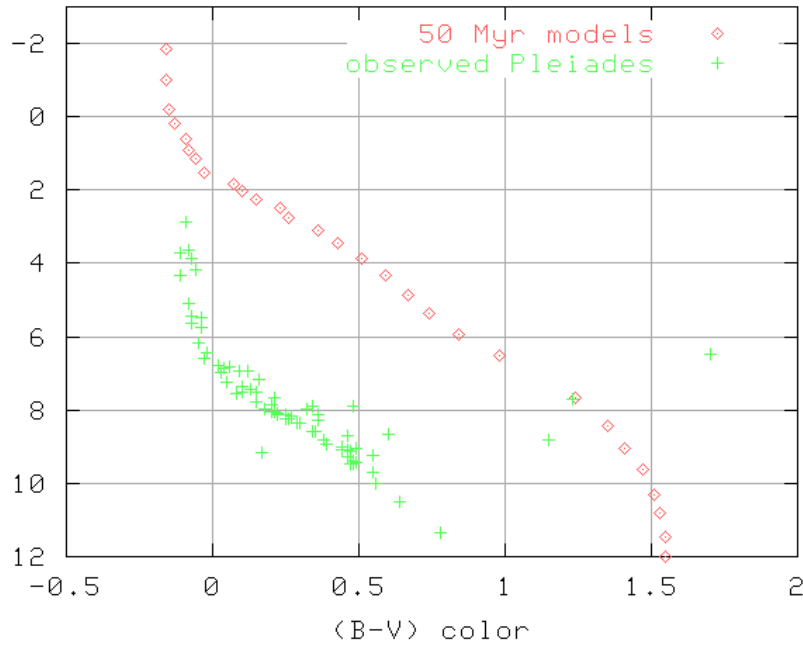
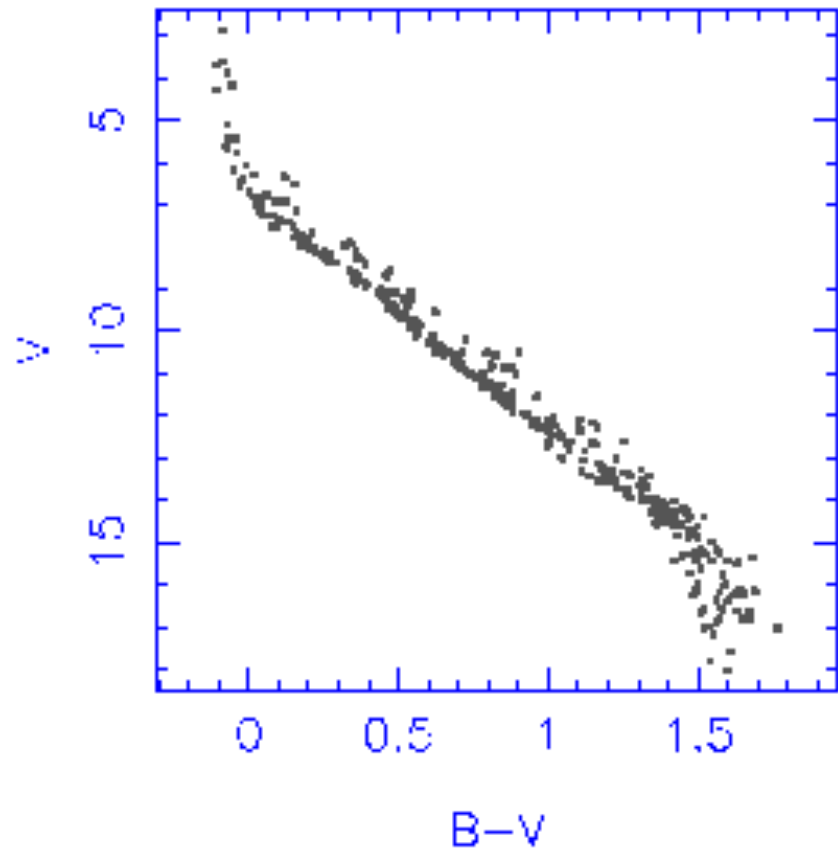
Gromady otwarte 1 mln – 4 mld lat



Plejady – M45



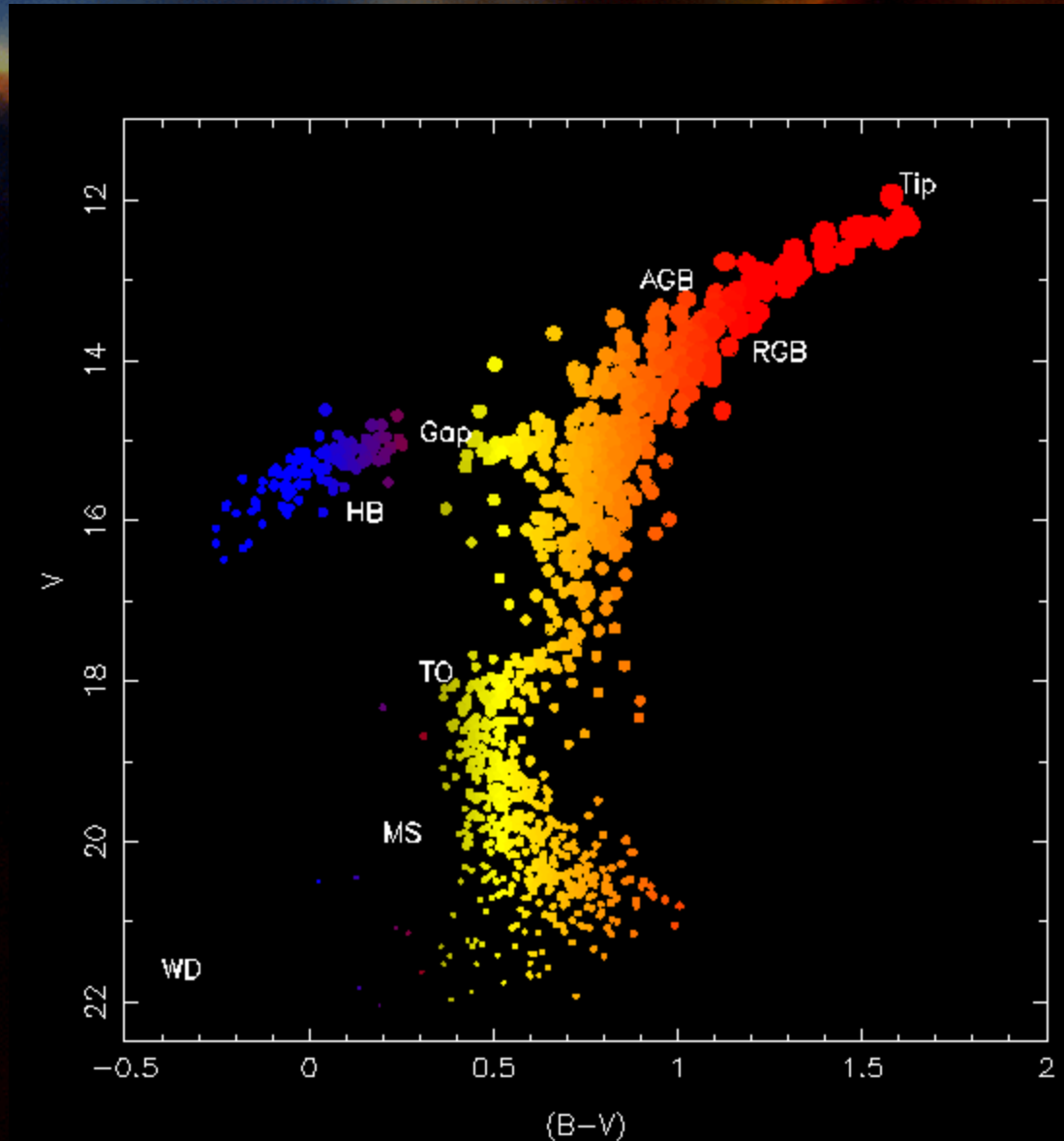
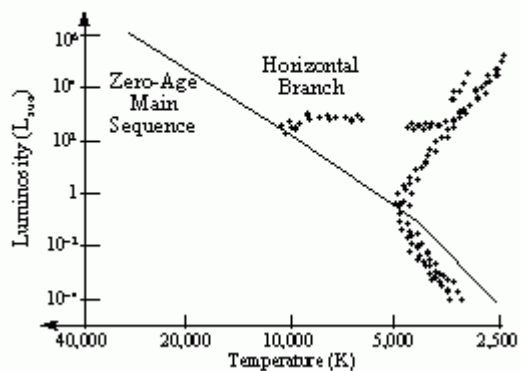
Pleiades

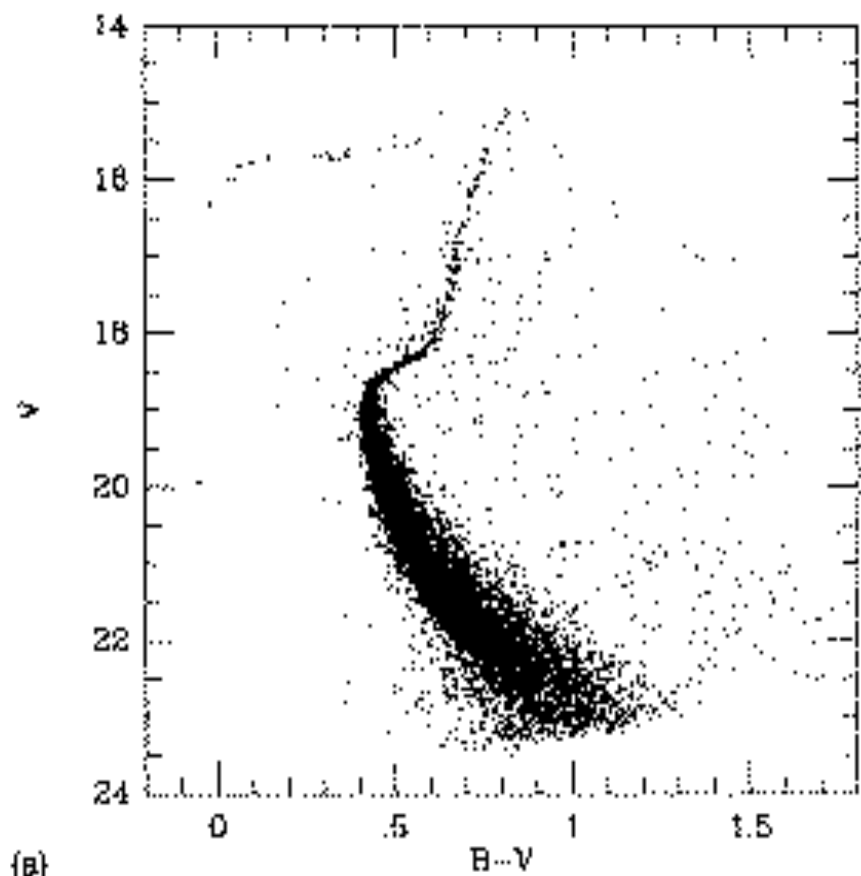


Gromada kulista M5

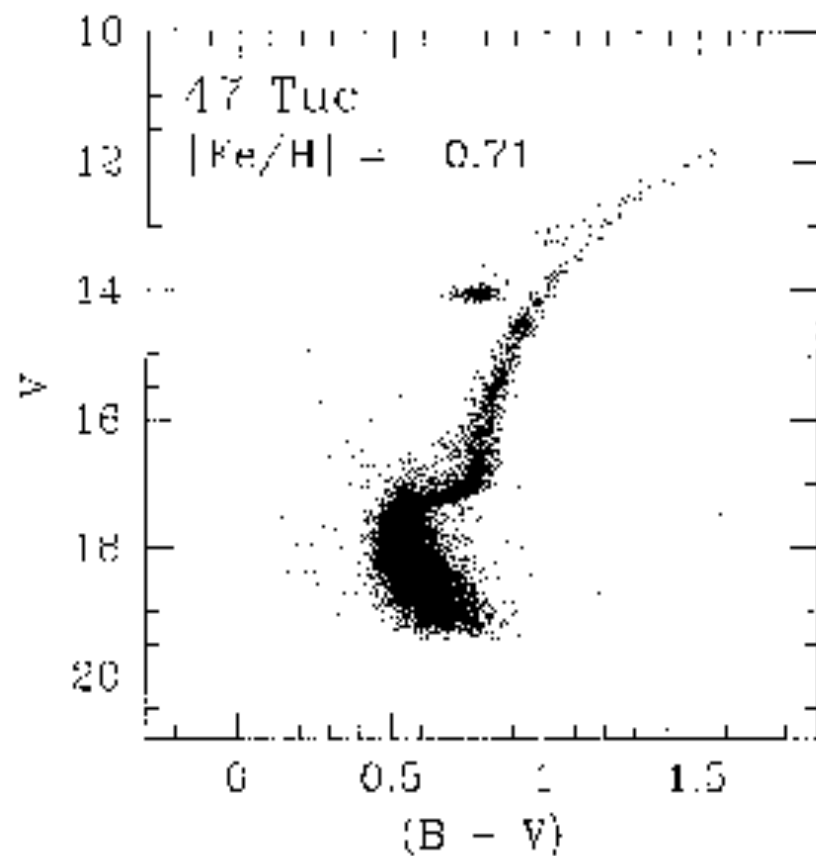


Typical Globular Cluster H-R Diagram



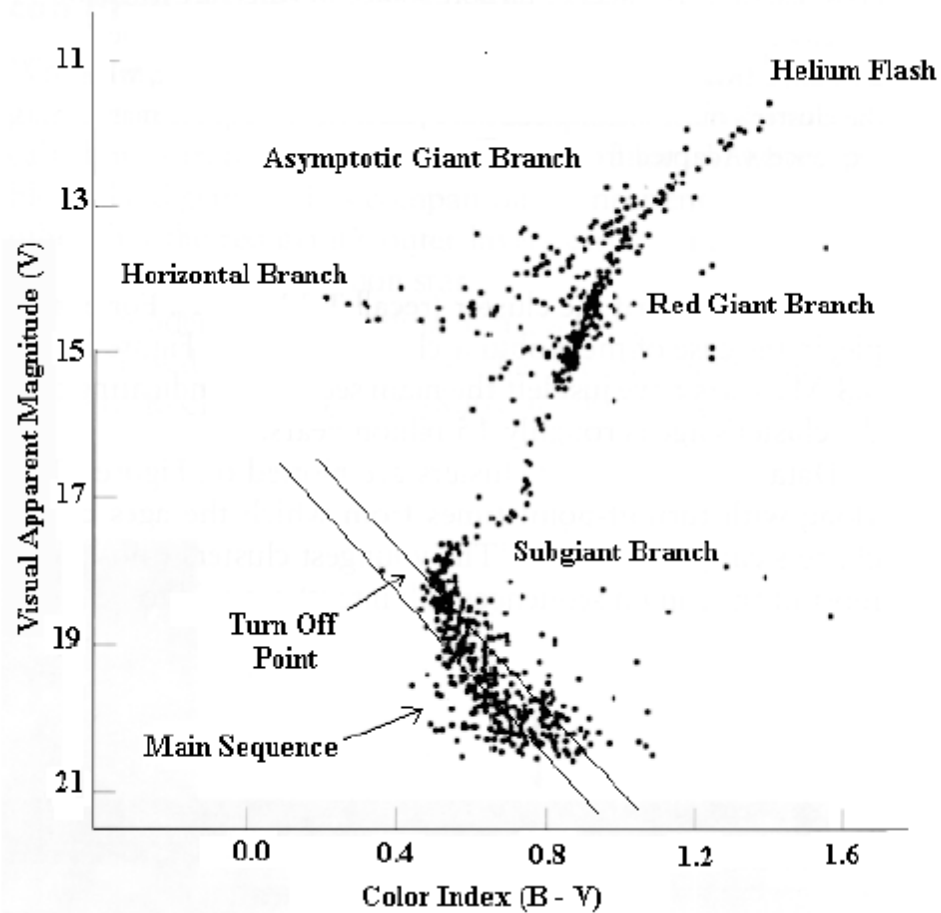


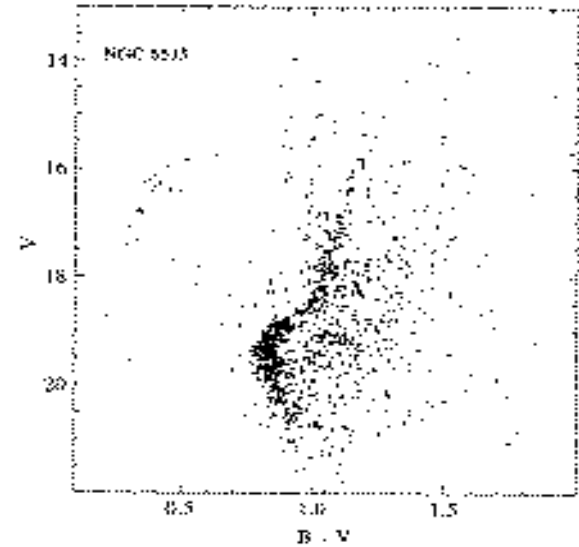
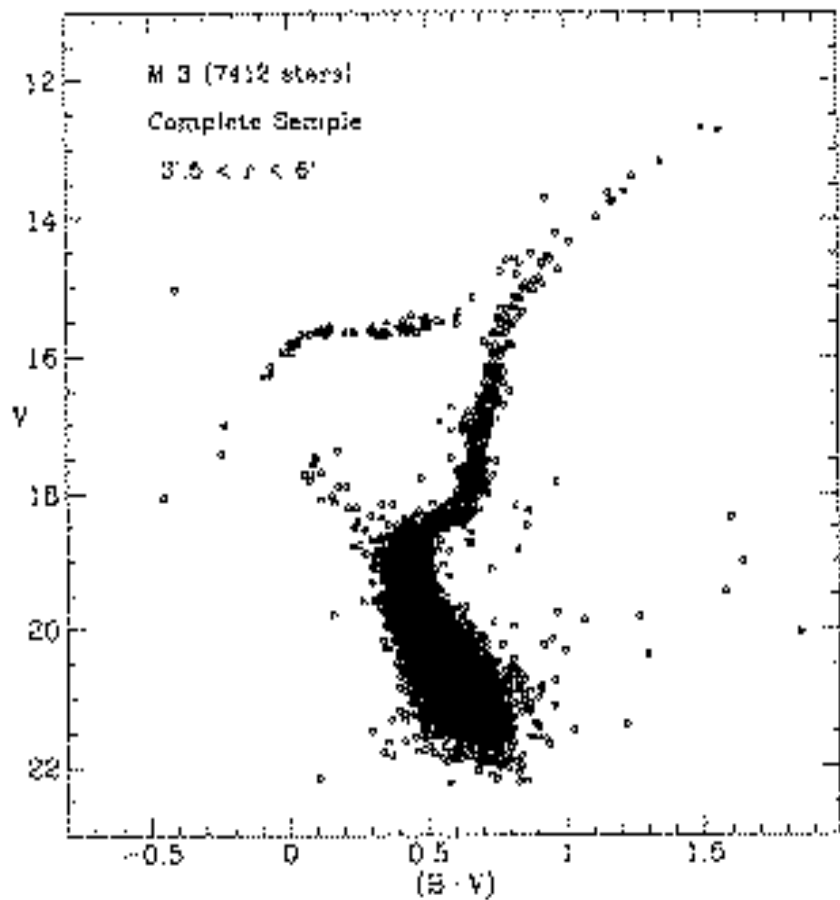
M68 from Walker 1994, AJ 108 555



47 Tuc

47 Tucane – 10^9 lat

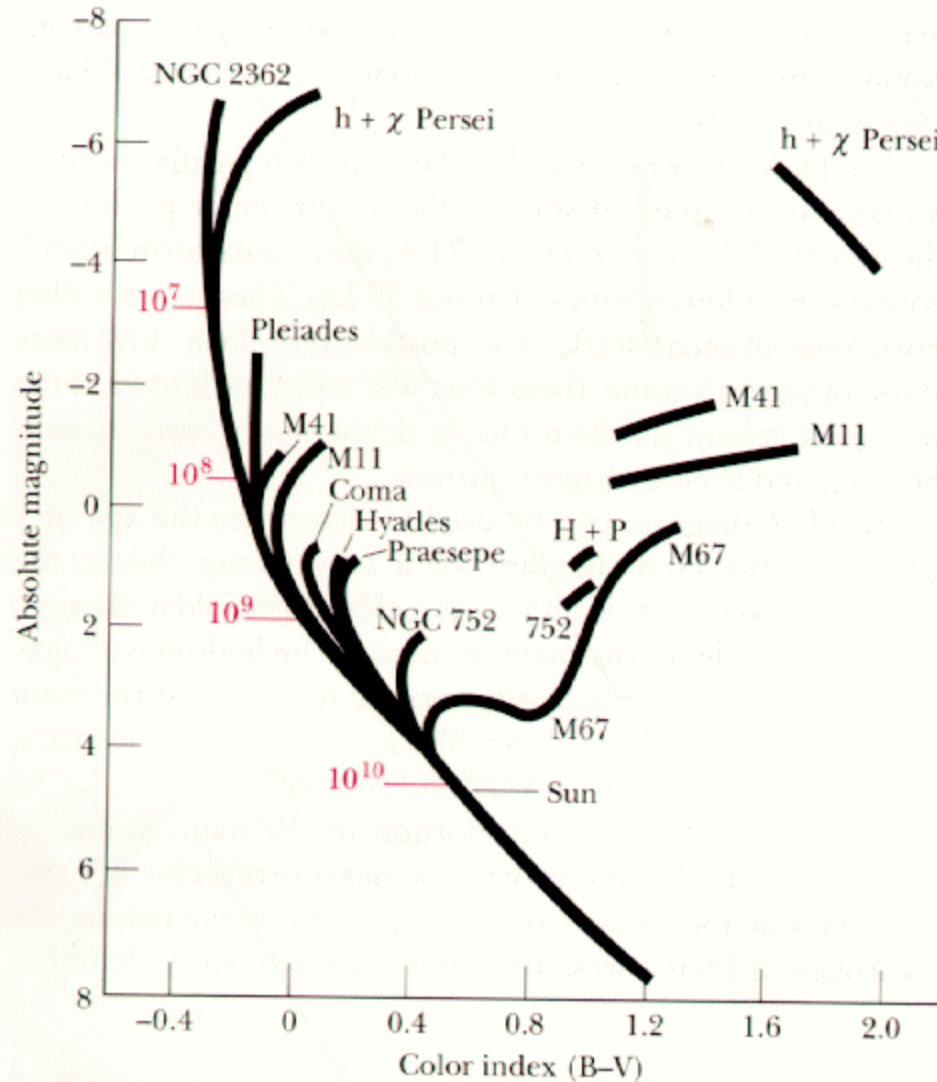




NGC 6535 from Sarajedini 1994 PASP 106 404

M 3 from Buonanno et al 1994 AA 290 69

Izochrony

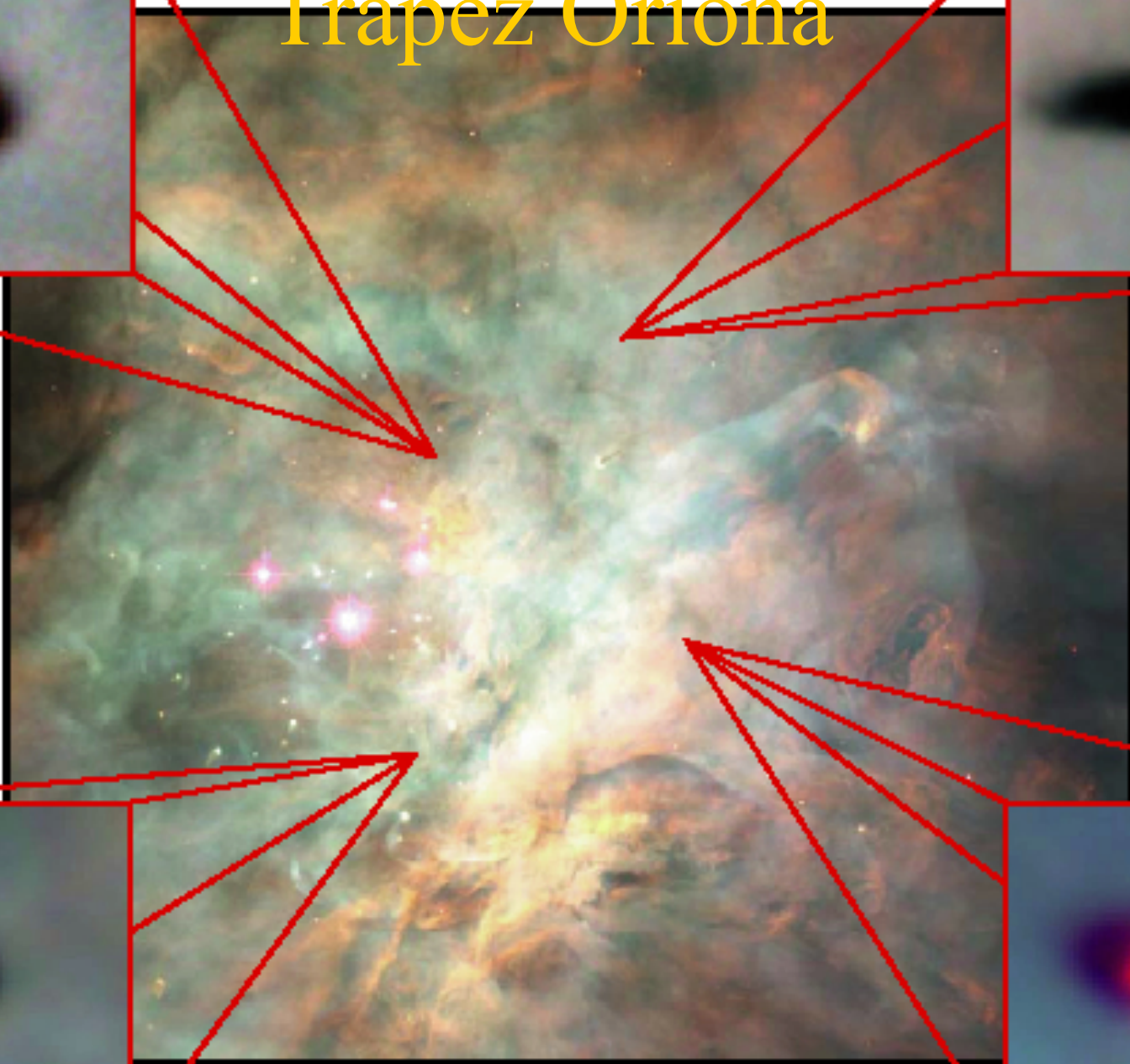


Kalibracja $(B-V)_{\text{turnoff}}$ - wiek

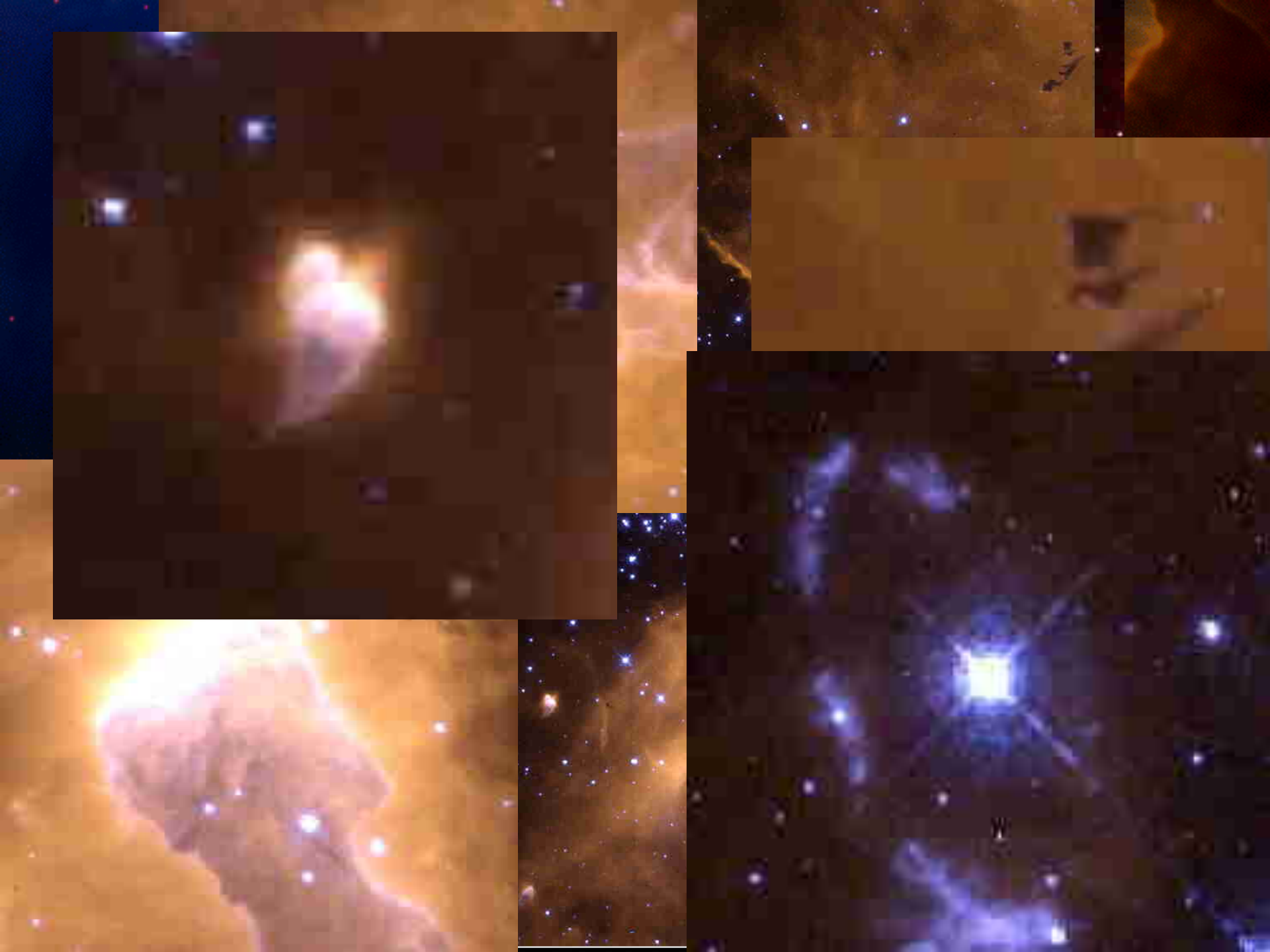
B-V	wiek
-0.4	3.2 mln lat
-0.3	16 mln lat
0.0	500 mln lat
0.4	4 mld lat
0.6	7.9 mld lat
0.9	25mld lat



Trapez Orionis



Size of four Solar System



Mgławica Orła - M 16



Star-Birth Clouds · M16

HST · WFPC2

PRC95-44b · ST ScI OPO · November 2, 1995

G: J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

Ciemne mgławice, globule Boka



Mgławice emisyjne

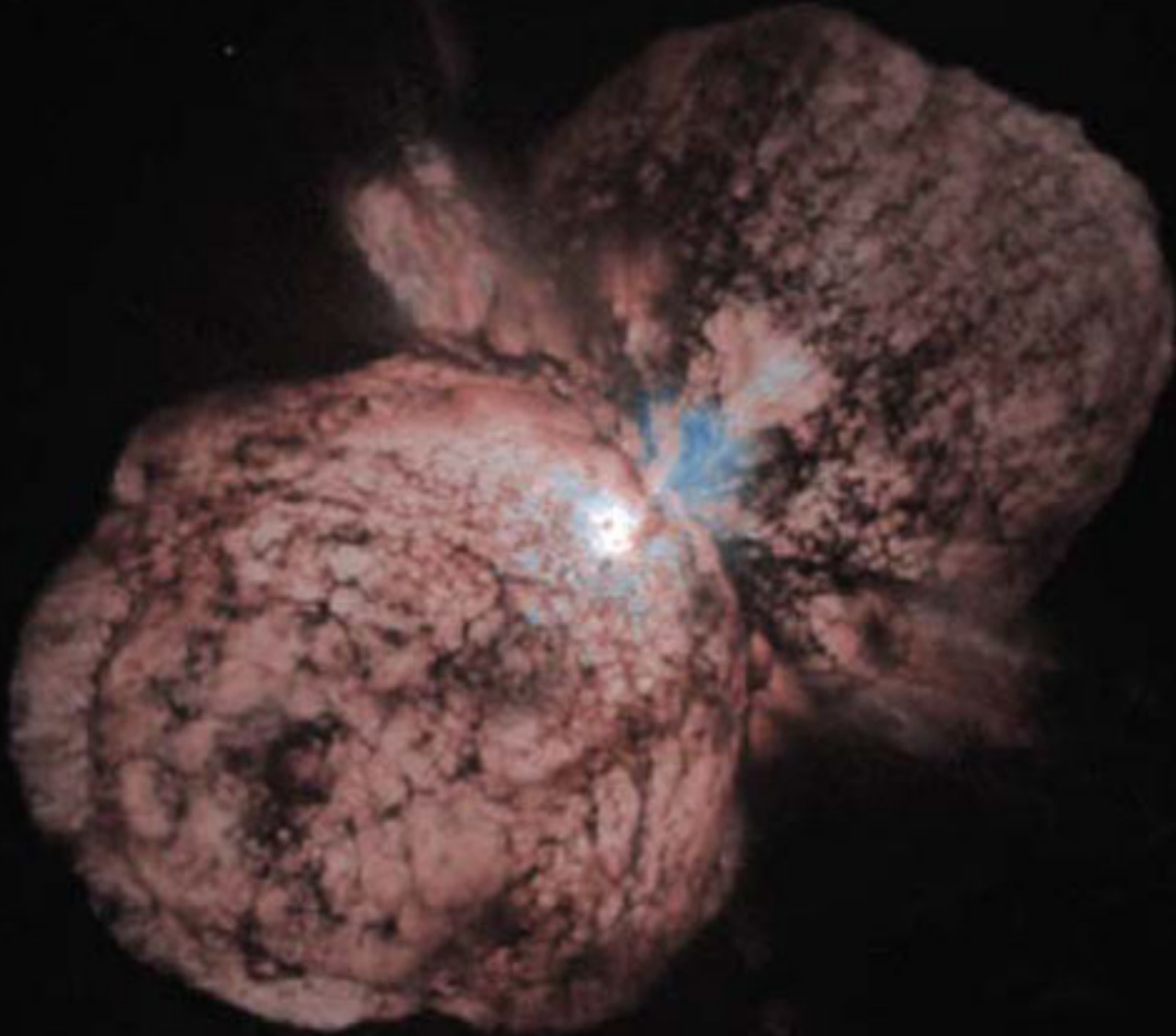


M20 © Anglo-Australian Observatory
Photo by David Malin

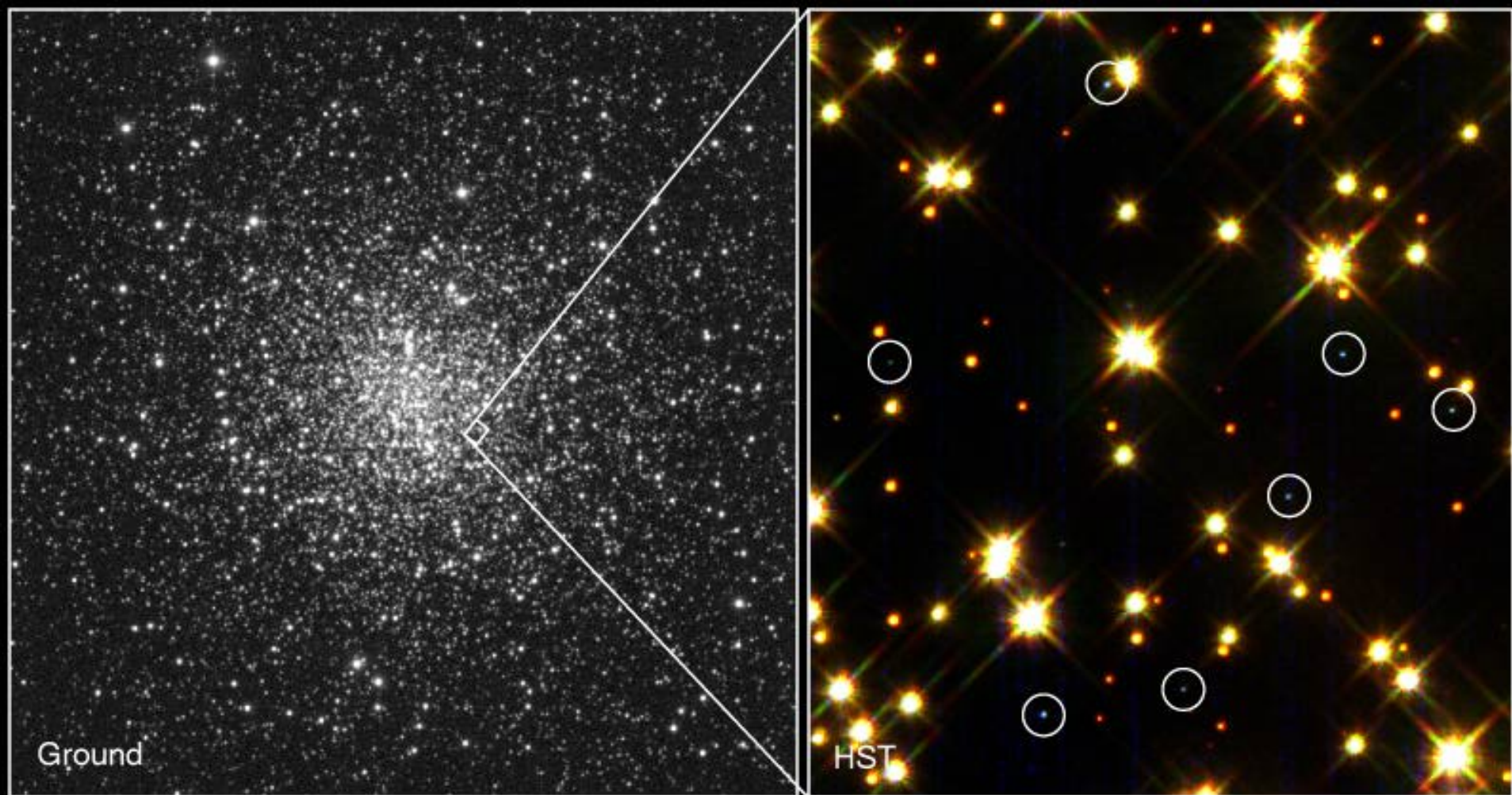
Меланже рефлективне



Wiatr gwiazdowy



Białe karły

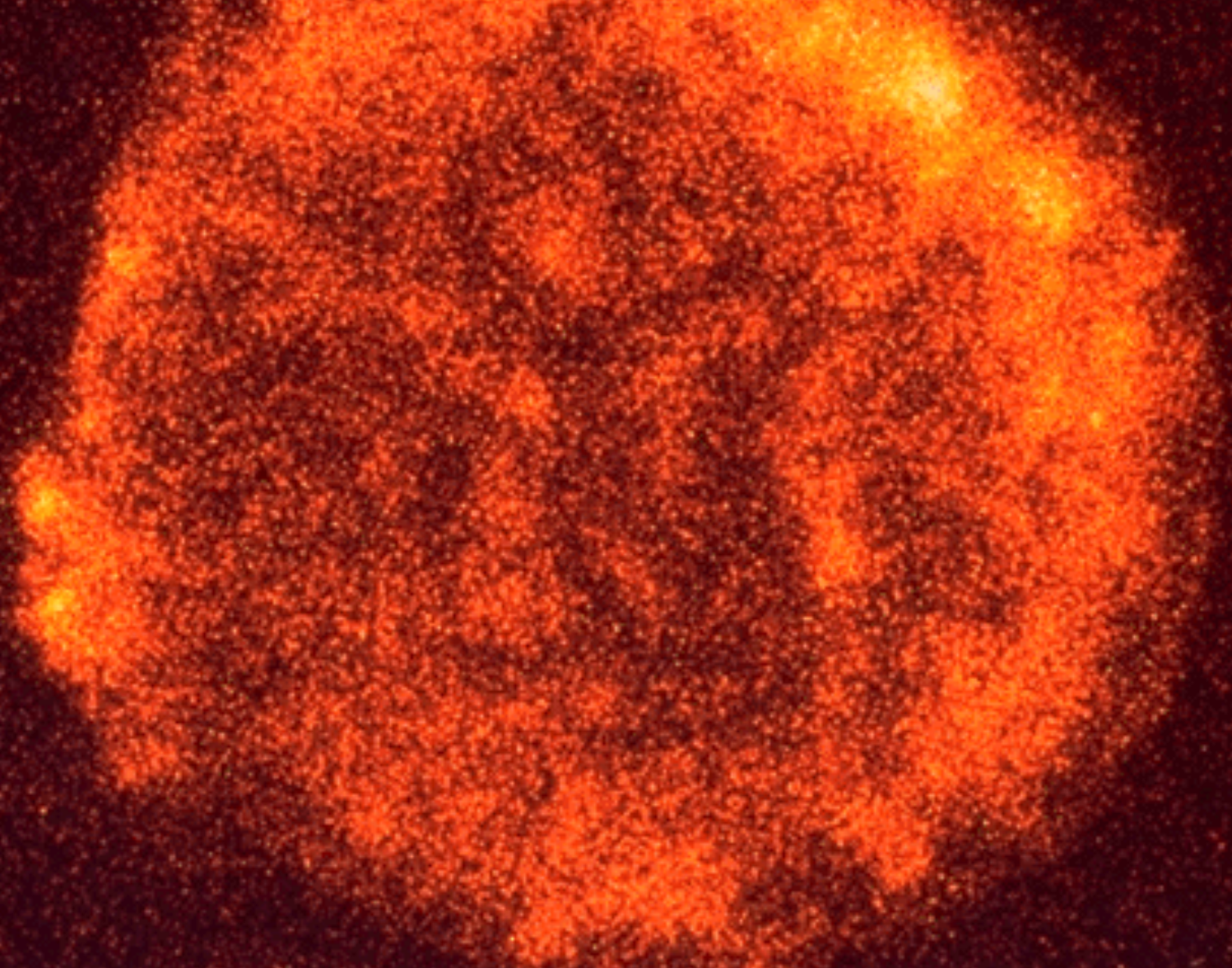


White Dwarf Stars in M4

PRC95-32 · ST ScI OPO · August 28, 1995 · H. Bond (ST ScI), NASA

HST · WFPC2

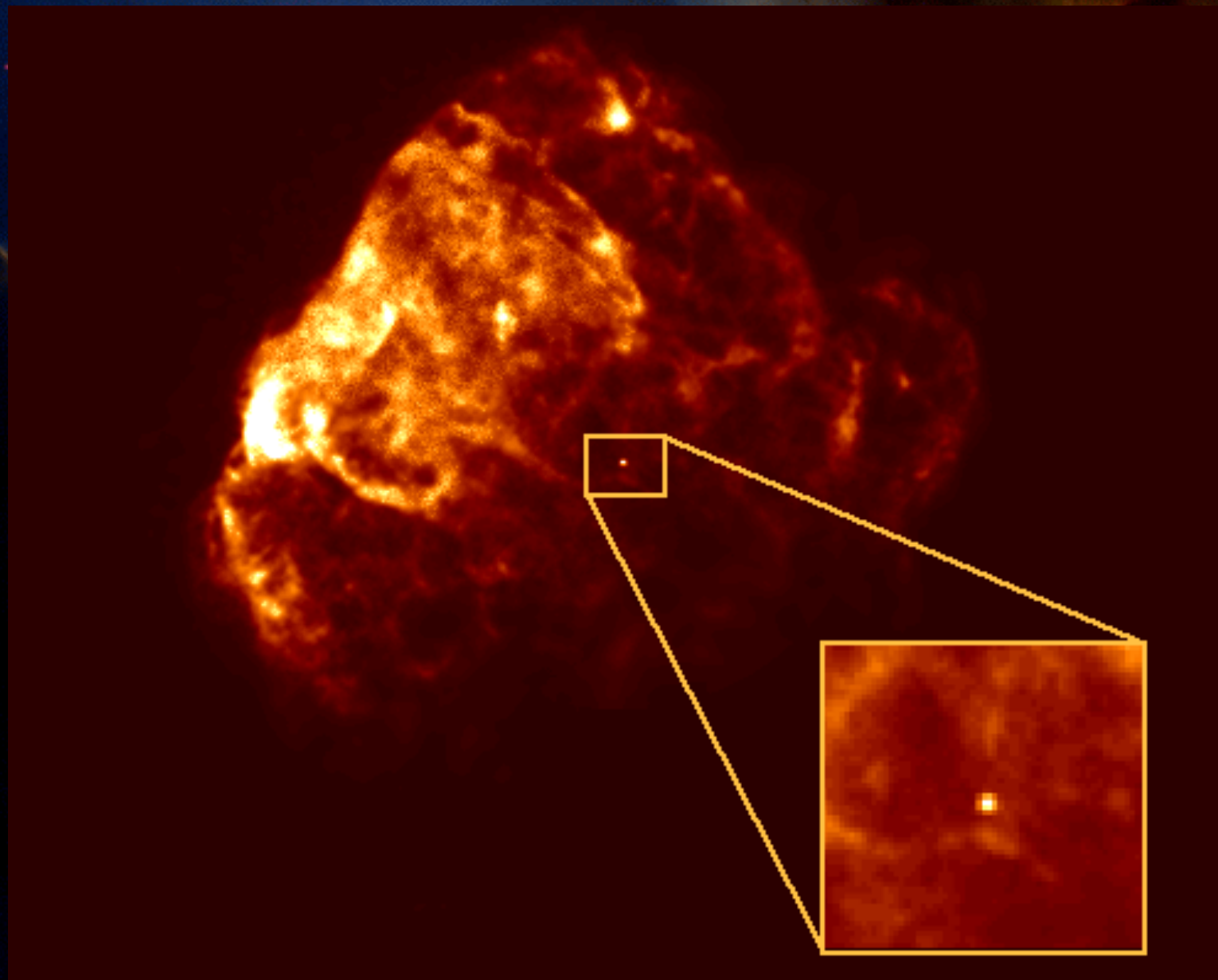
Pozostałości po supernowych



koniec 29/05/2021



Gwaizdy neutronowe



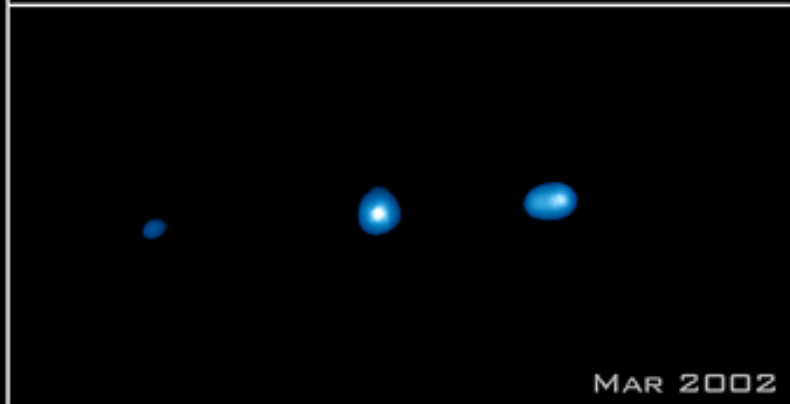
NGC 3377

NGC 3379

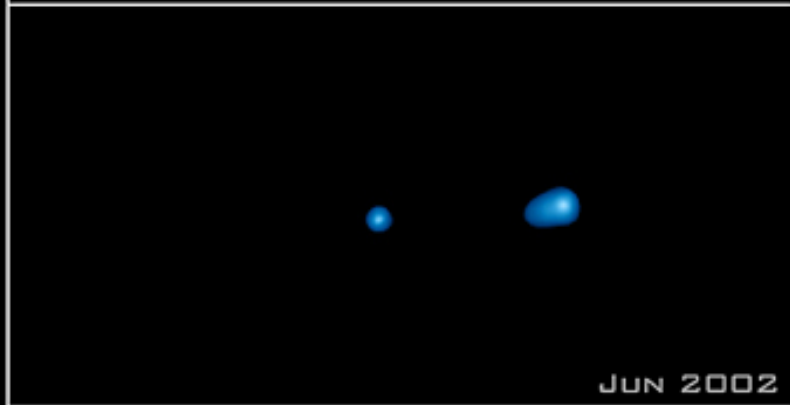
Czarne dziury



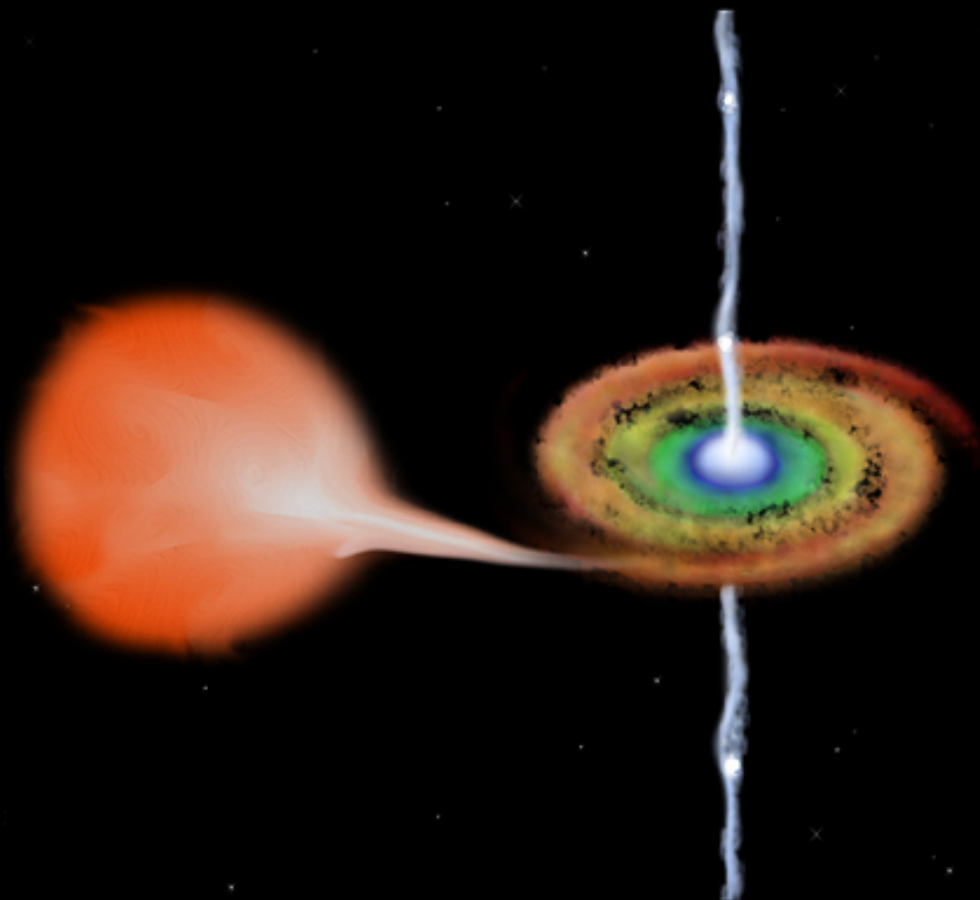
AUG 2000



MAR 2002



JUN 2002



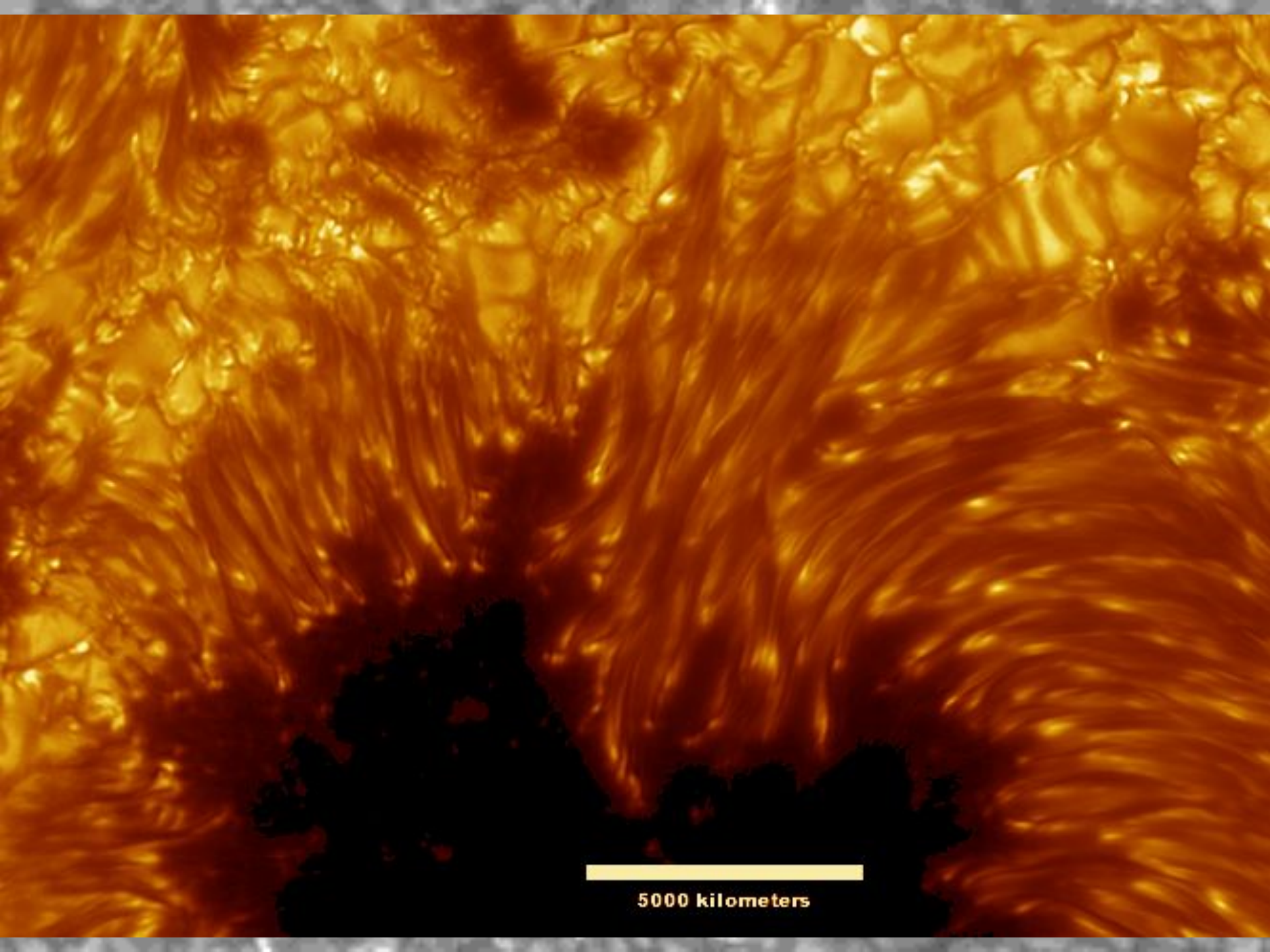
X-RAY BINARY SCHEMATIC

Słońce

- Masa: 1.991×10^{30} kg (333 tys. mas Ziemi)
- Promień: 6.96×10^8 m (109 promieni Ziemi)
- Moc: 3.86×10^{33} erg/s.
- Jasność bolometryczna: -26.82 mag
- Jasność absolutna: +4.75 mag
- Oświetlenie: 137 000 luksów
- Typ widmowy G2 ($T_{\text{eff}}=5800\text{K}$)

Słońce

- Wnętrze:
 - jądro palące wodór ($T = 15$ mln K)
 - otoczka promienista
 - otoczka konwektywna



5000 kilometers

Słońce

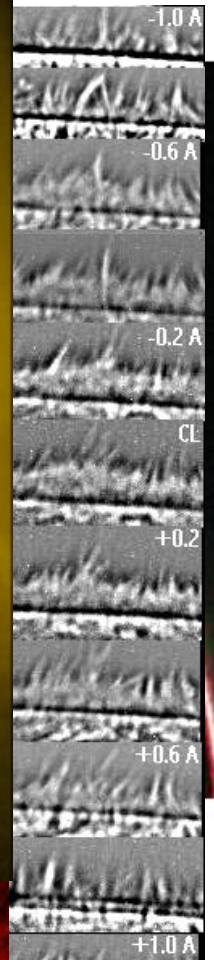
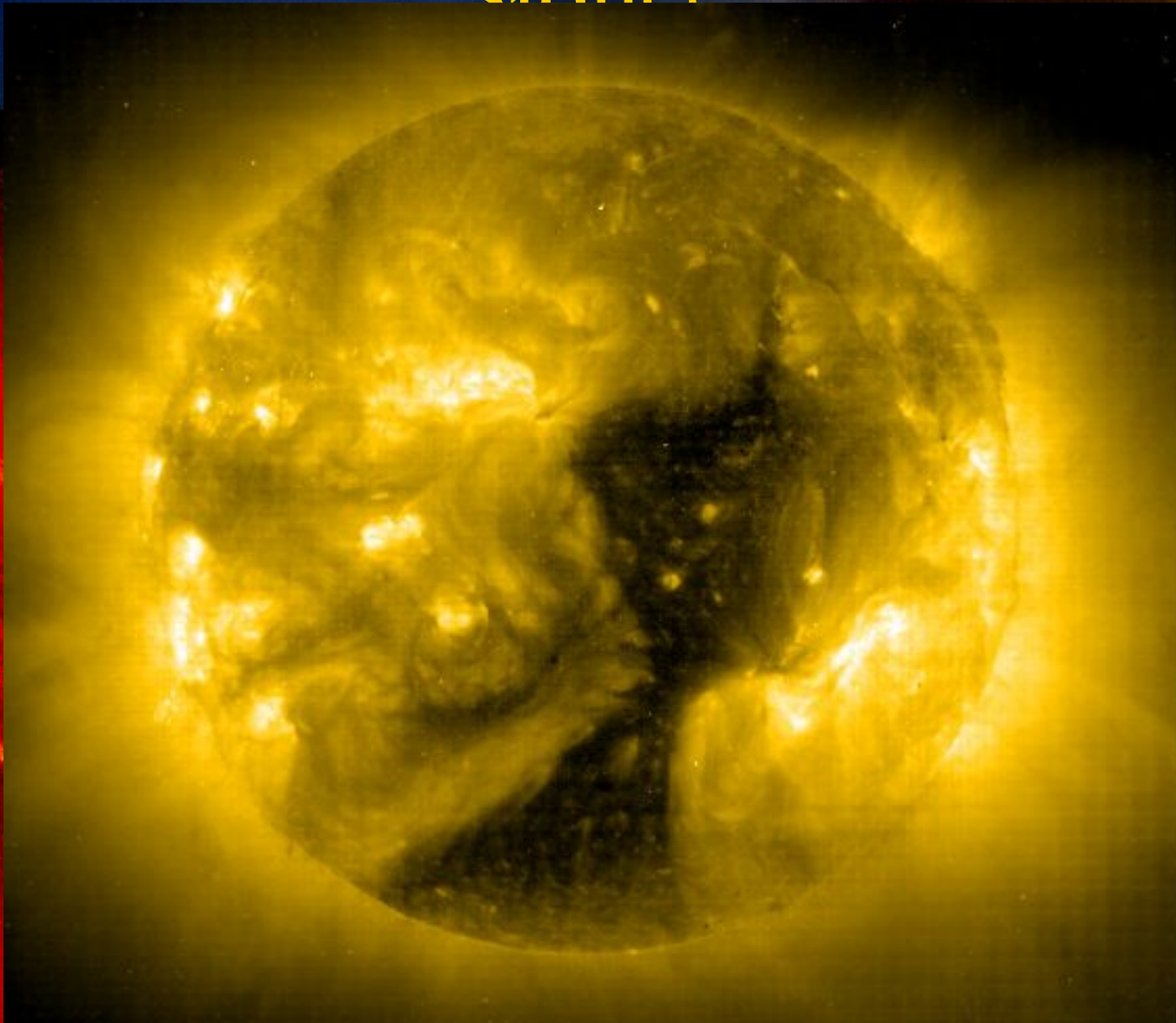
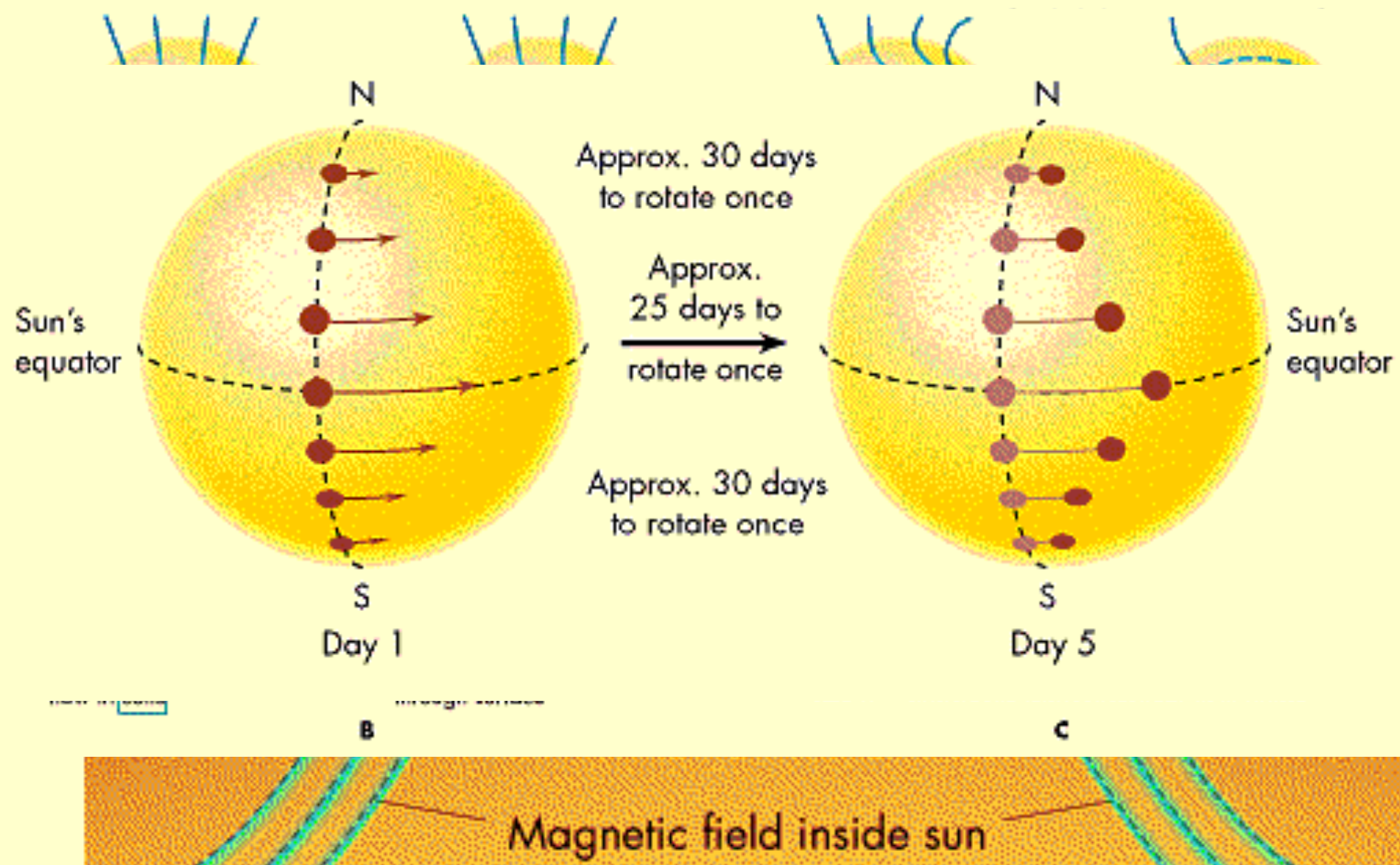


Figure 11-15



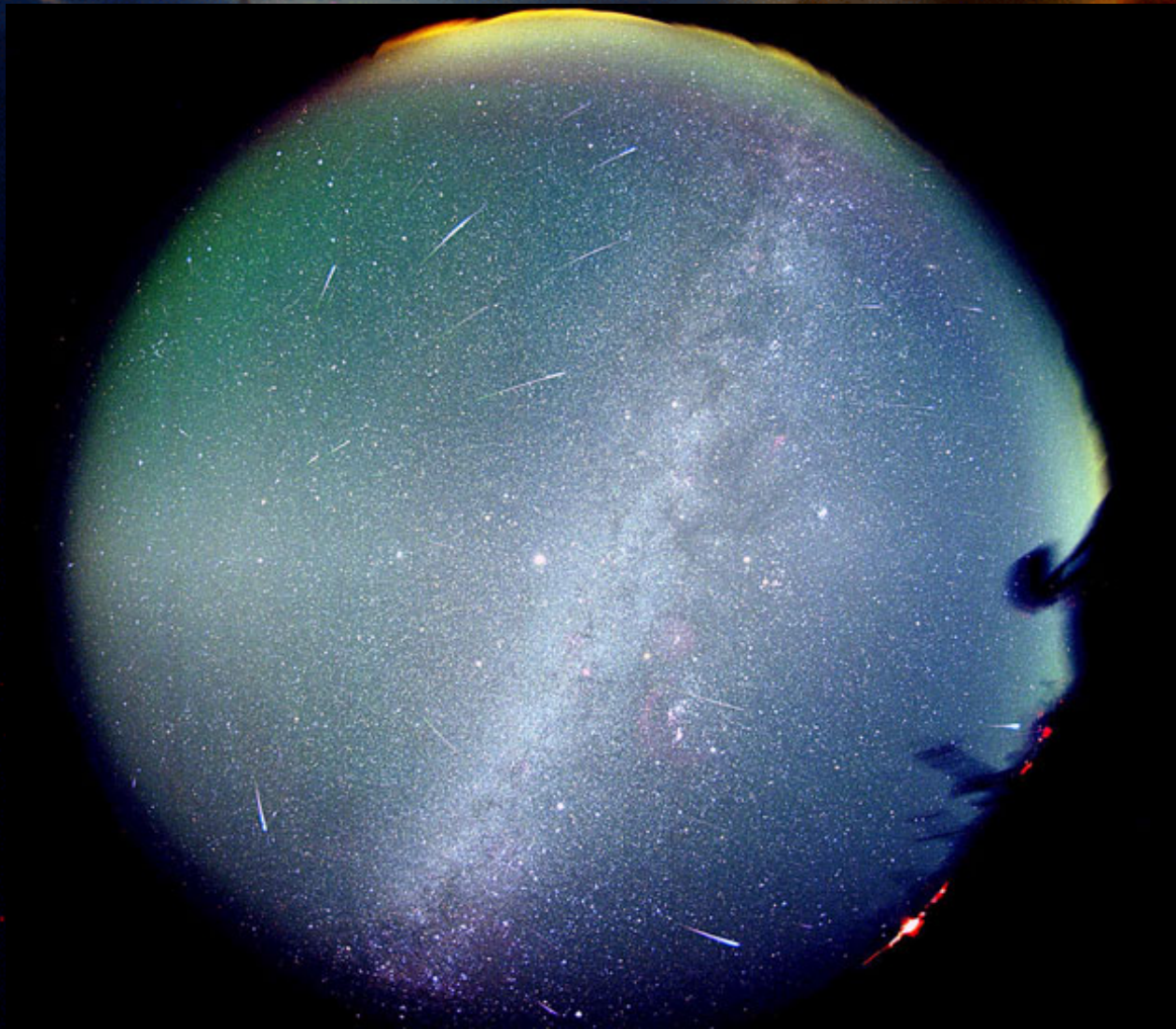
01 /



rozbiysk

1920 1930
Year

Gwiazdy zmienne



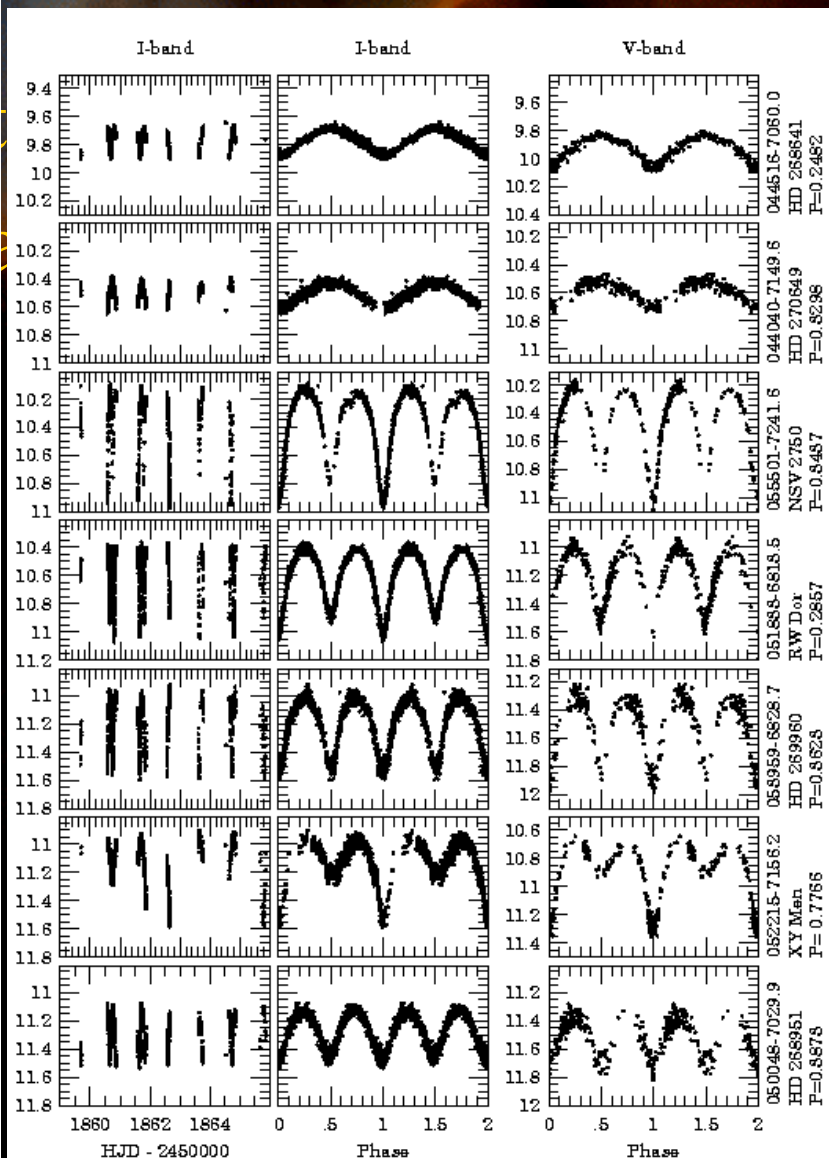
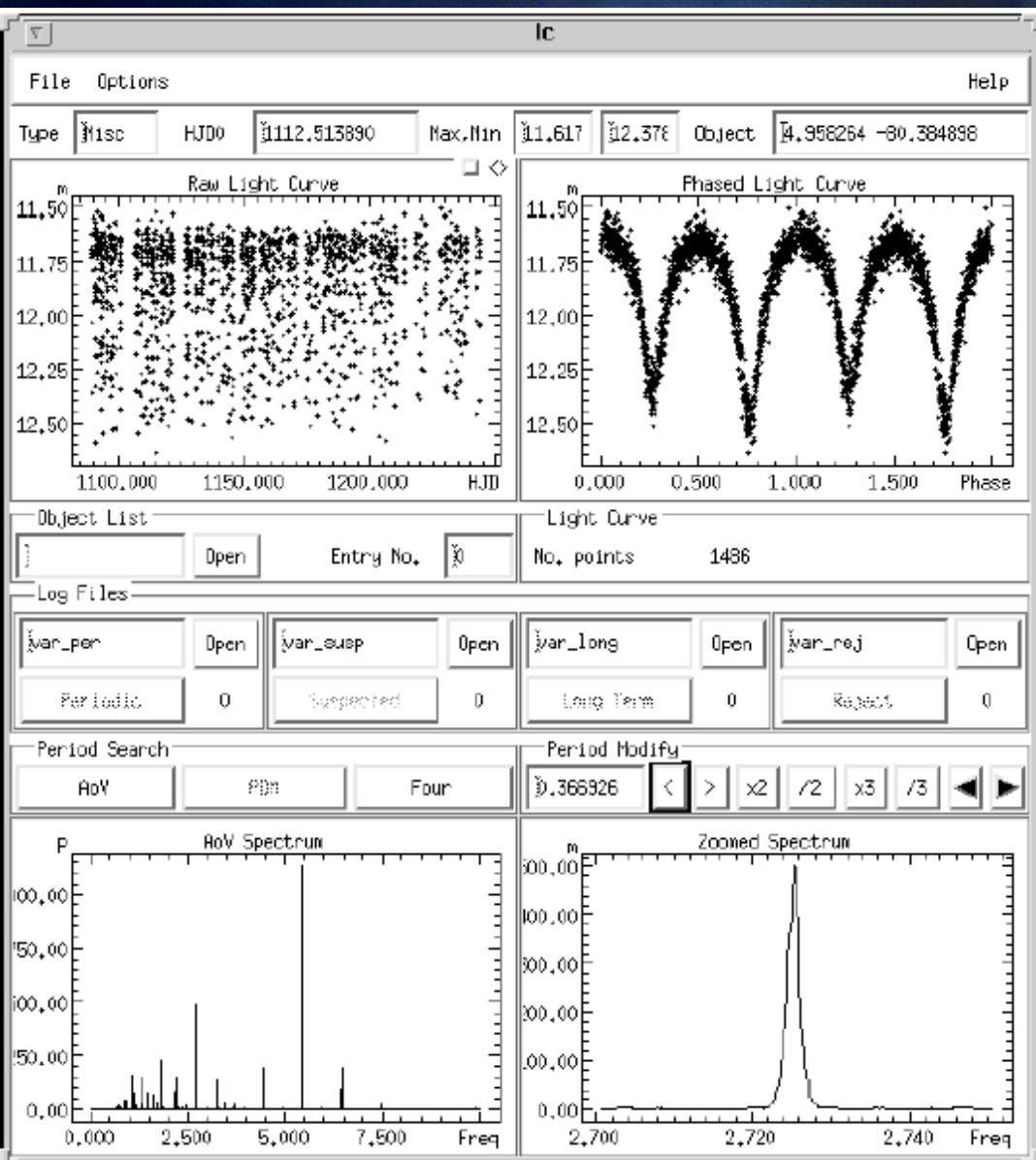
Gwiazdy zmienne

- Gwiazdy zmienne podwójne
 - zaćmieniowe
 - elipsoidalne
- Gwiazdy zmienne fizycznie
 - pulsujące (okresowe)
 - niestacjonarne
 - aktywne chromosferycznie (rotujące)

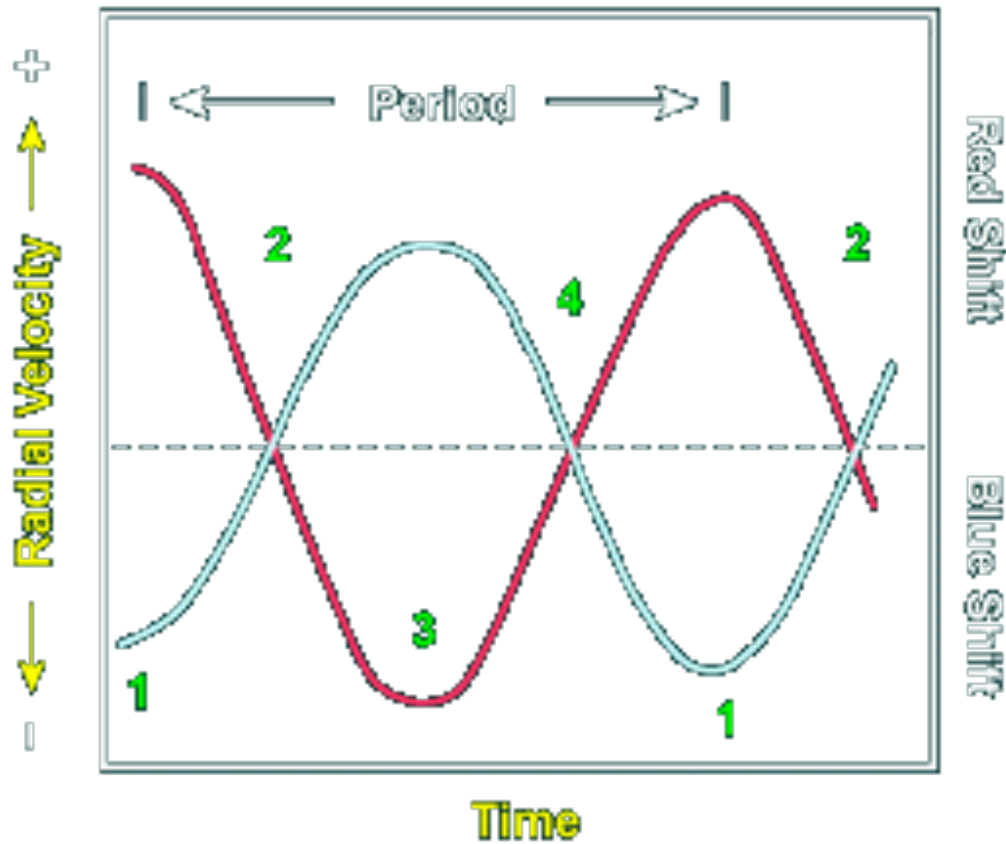
Gwiazdy podwójne

- 1/2 gwiazd w układach podwójnych
- jedyne źródło informacji o masach gwiazd
- promienie gwiazd

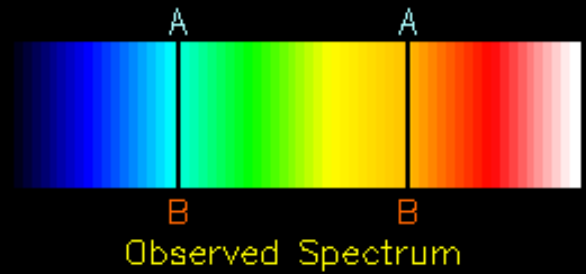
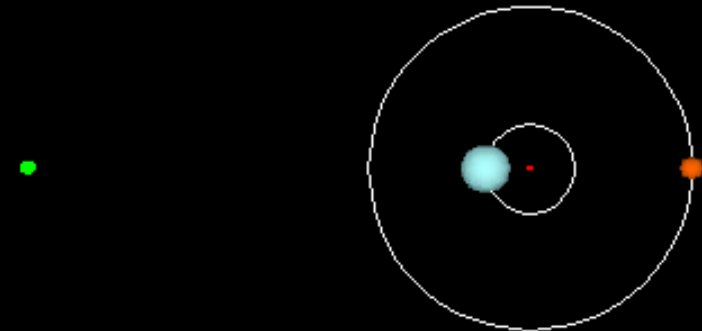
Gwiazdy podwójne - zaćmieniowe



Gwiazdy podwójne spektroskopowo

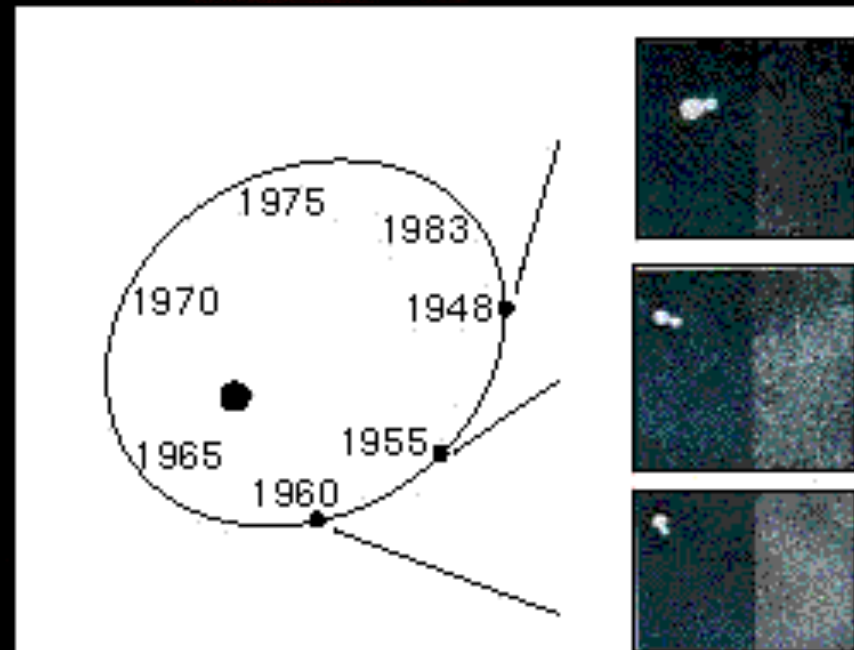


...e (ruchome)
...ków



Gwiazdy podwójne wizualnie

- Odległość kątowa $> 1''$
 - odległość rzeczywista $> 1 \text{ j.a.}$
 - okres obiegu $> 1 \text{ rok}$



Gwiazdy pulsujące

Light curve of omicron Cet from VSNET observations

1995

1996

1997

1998

1999

2000

2001

- **pas niestabilności**

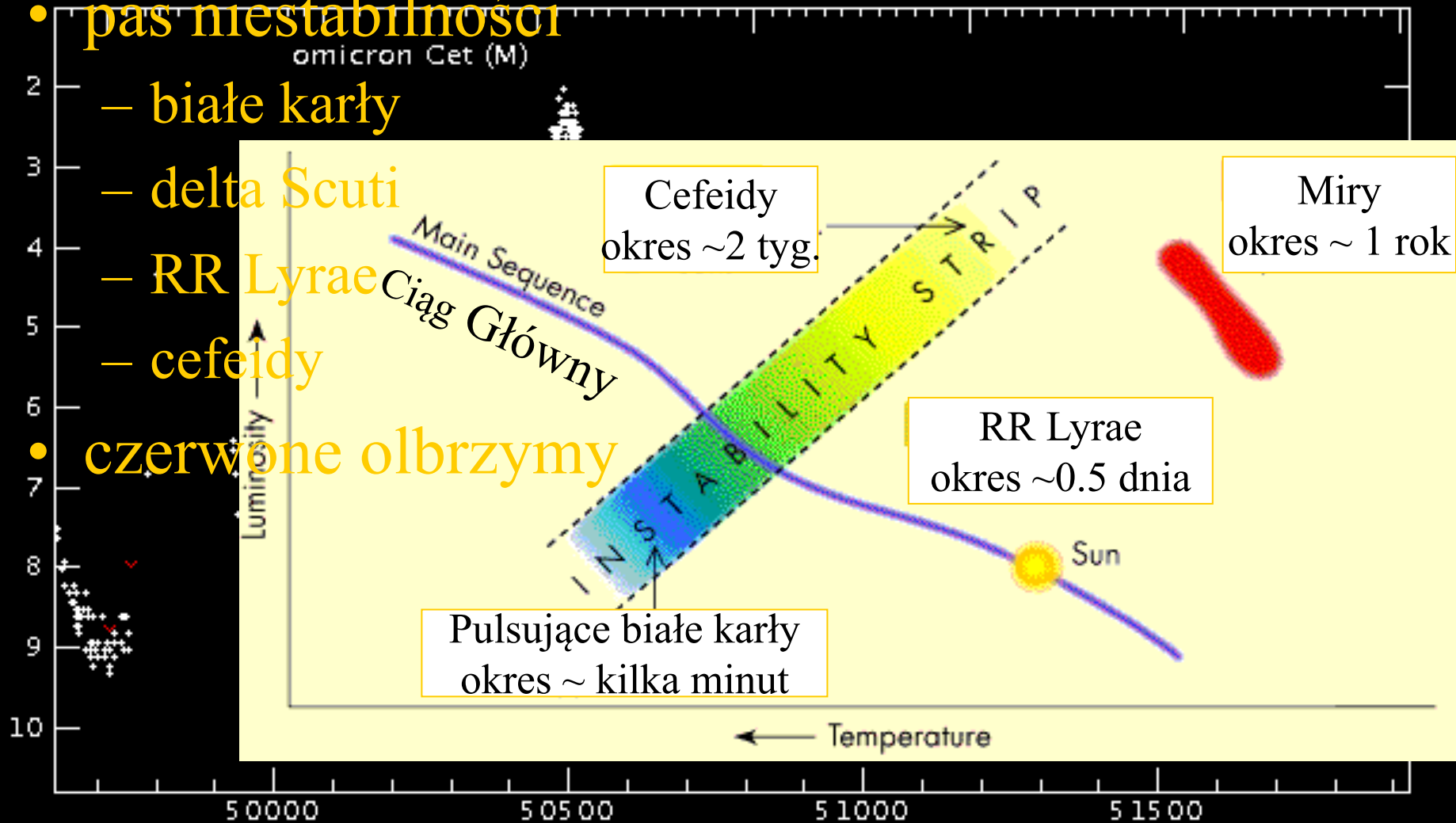
- białe karły

- delta Scuti

- RR Lyrae

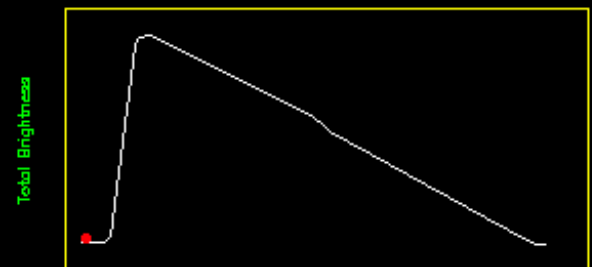
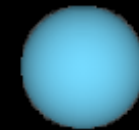
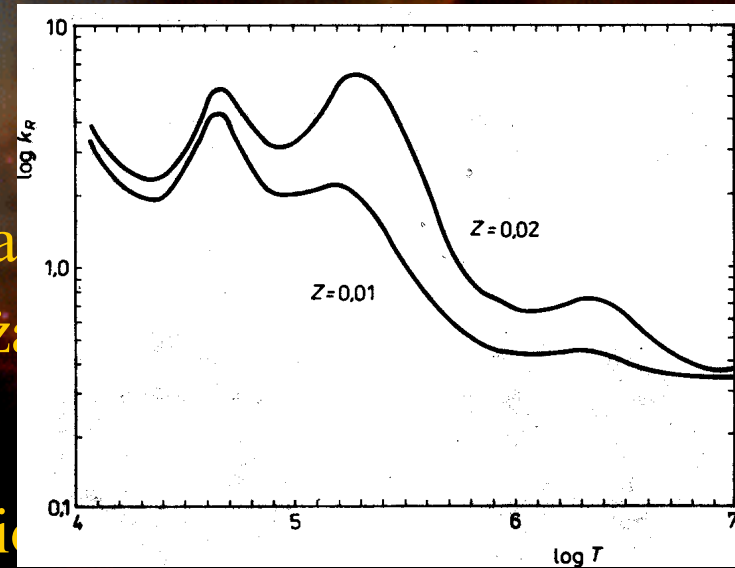
- cefeidy

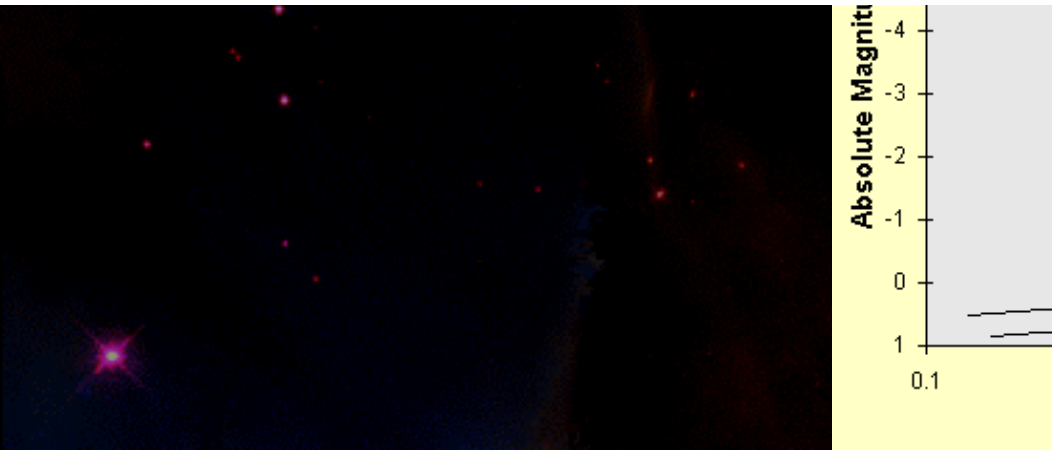
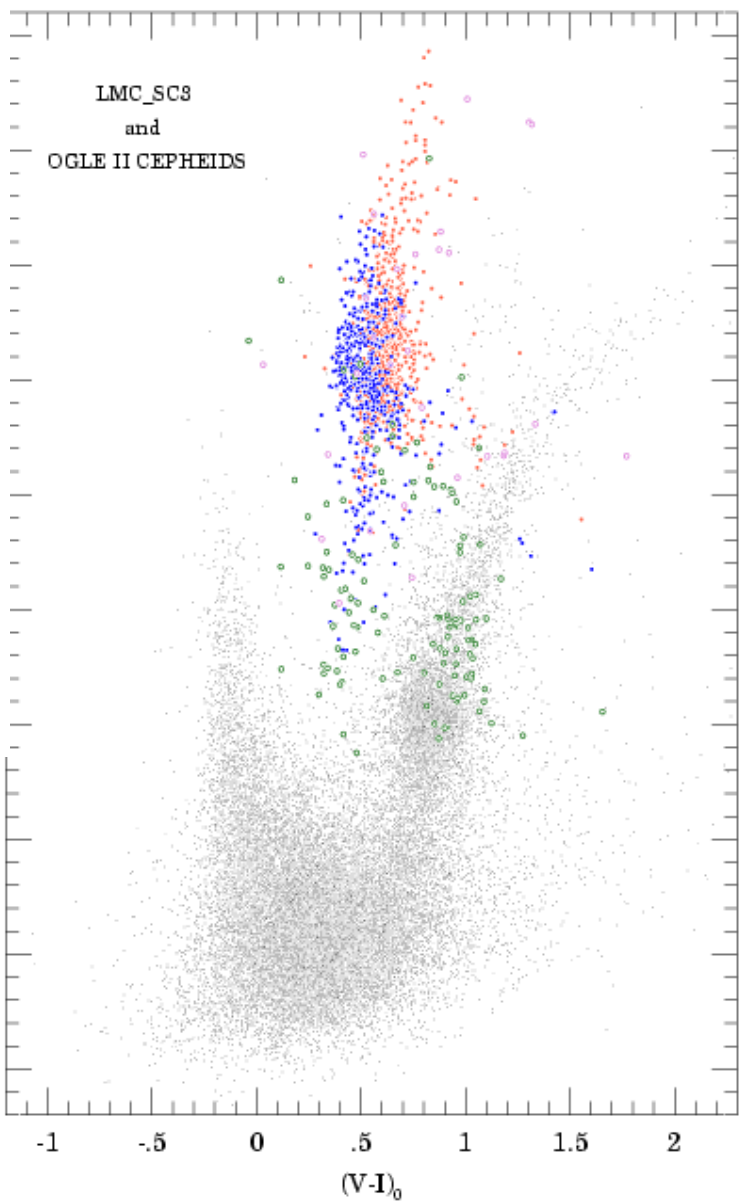
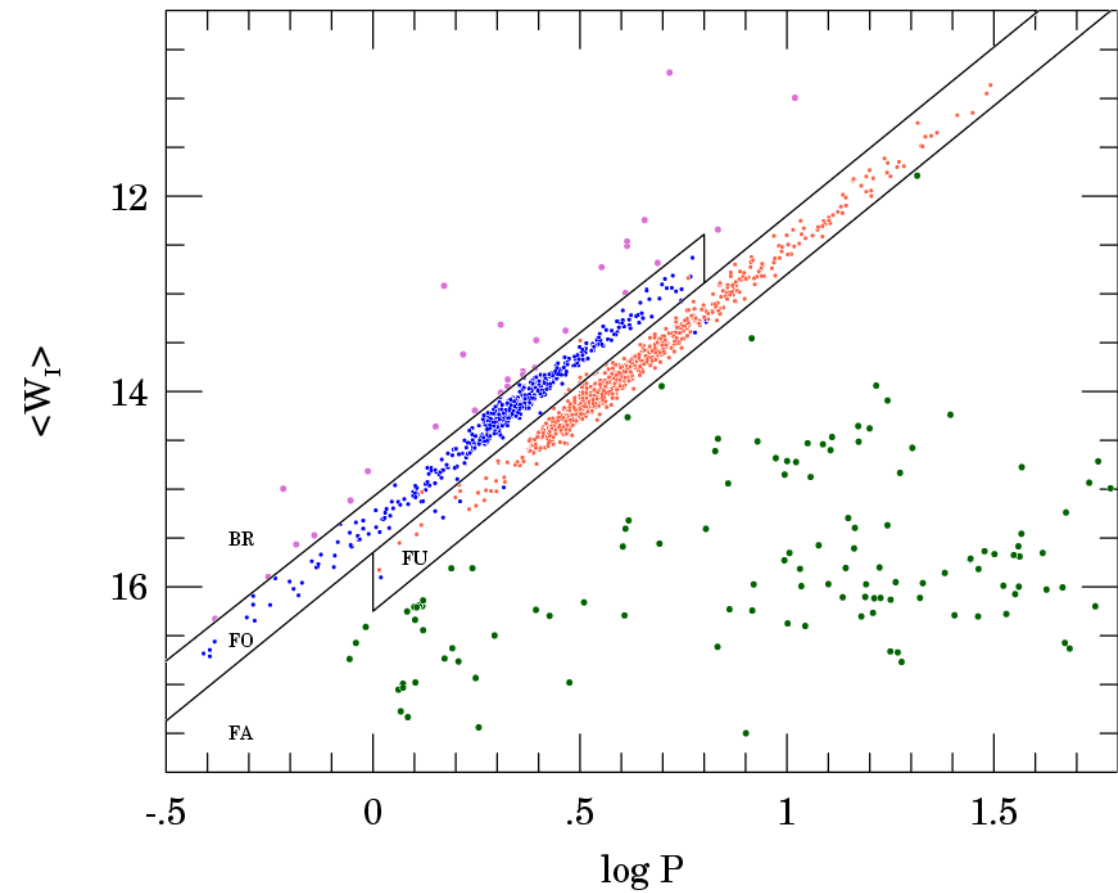
- **czerwone olbrzymy**



Gwiazdy pulsujące

- maszyna cieplna:
 - doprowadza energię w fazie sprężania
 - zamienia na pracę podczas rozprężania
- przyczyny pulsacji
 - źródło energii – strumień promieniowania
 - mechanizm nieprzezroczystości:
 - nieprzezroczystość zwykle maleje z temperaturą - ale:
 - mechanizm κ - gdy κ rośnie z T
 - mechanizm γ - gdy γ maleje w obszarach częściowej jonizacji – mniejszy wzrost T i większy wzrost κ





Gwiazdy aktywne

- szybka rotacja

+

- konwekcja

=

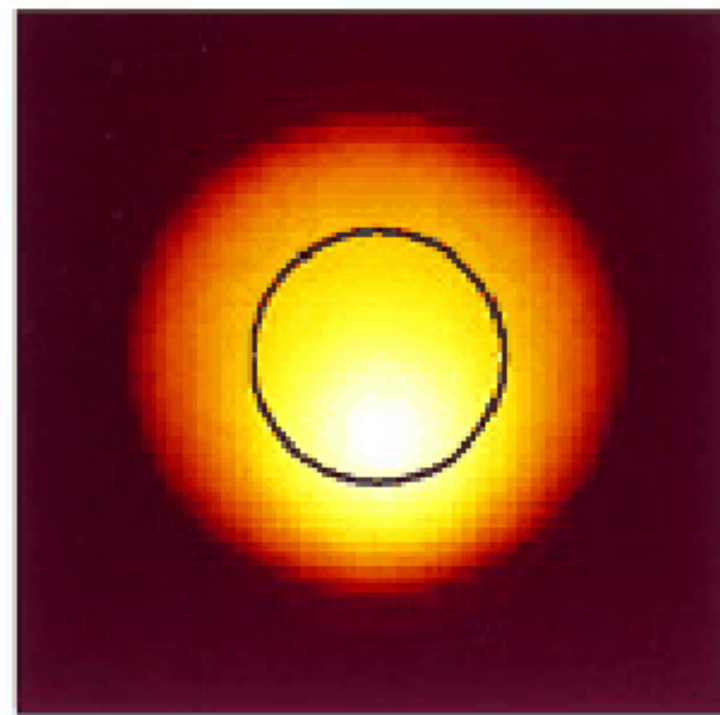
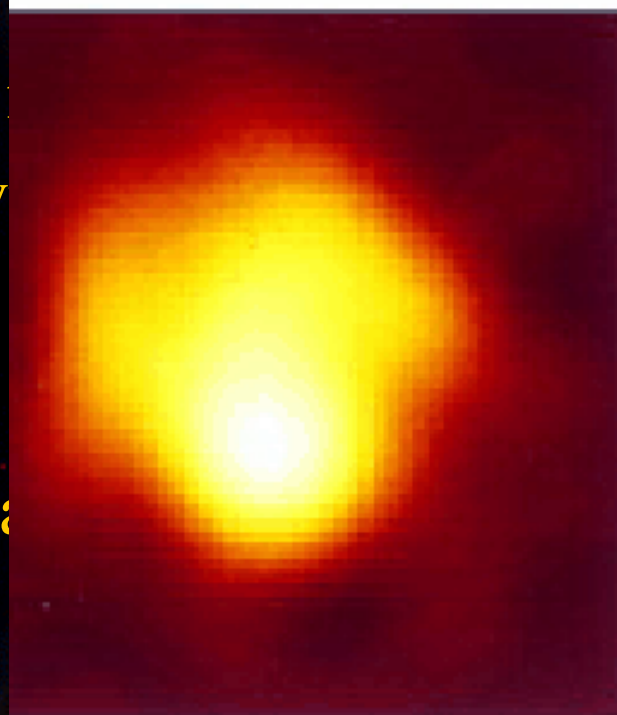
- silne pole magnetyczne

– efekt „dymping”

- plamy

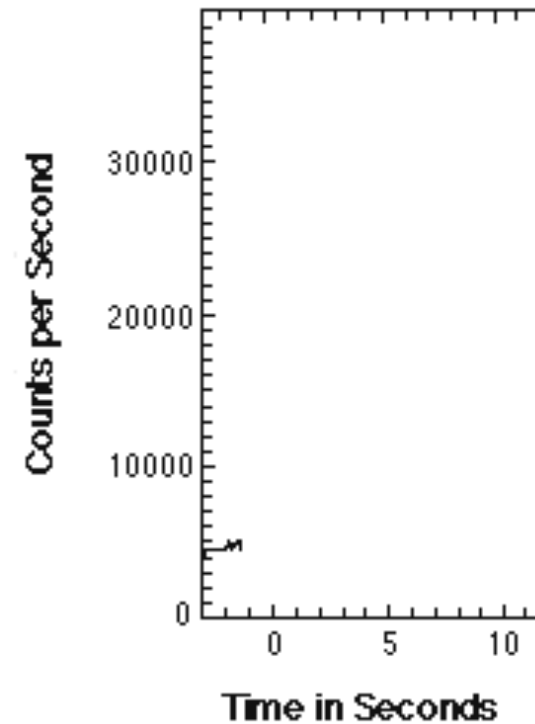
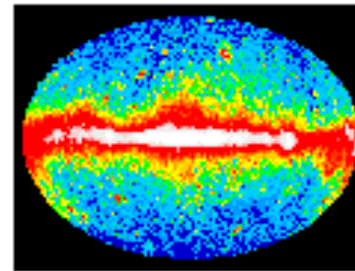
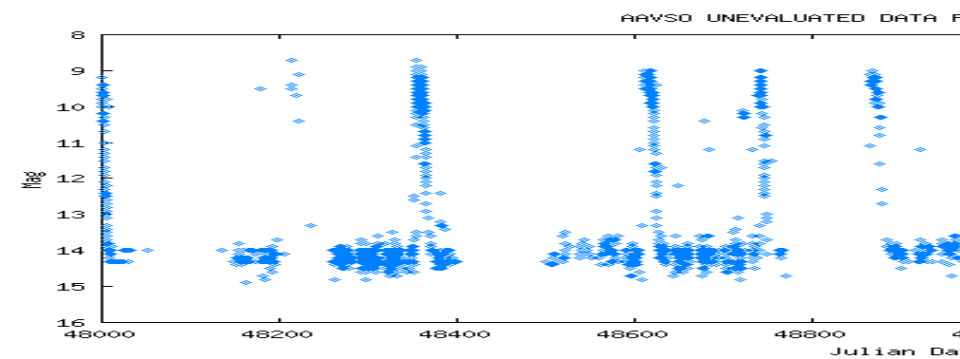
- rozbłyski

- rozbudowa

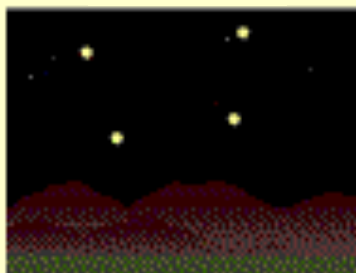


Gwiazdy kataklizmiczne

- Supernowe
- Nowe
- Nowe powrotne
- Nowe karłowate
- Błyski gamma (GRB)

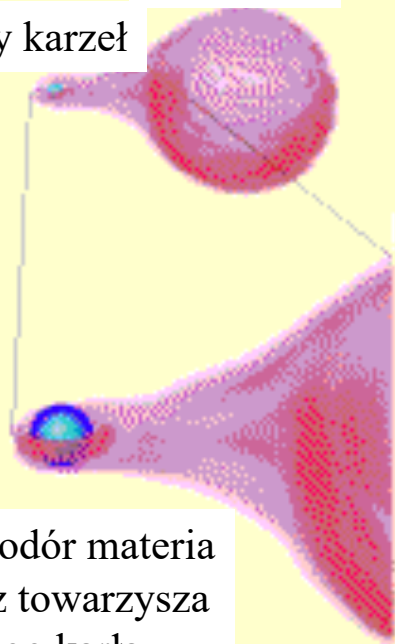


Gwiazdy nowe



biały karzeł

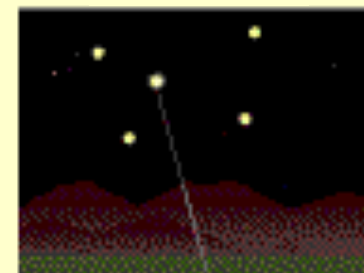
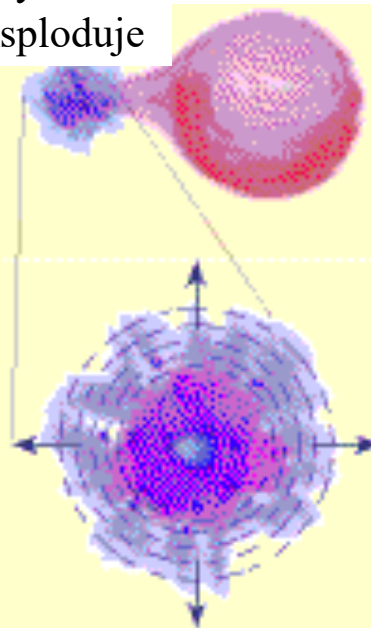
towarzysz



Bogata w wodór materia
przeływa z towarzysza
na białego karła

biały karzeł
eksploduje

towarzysz



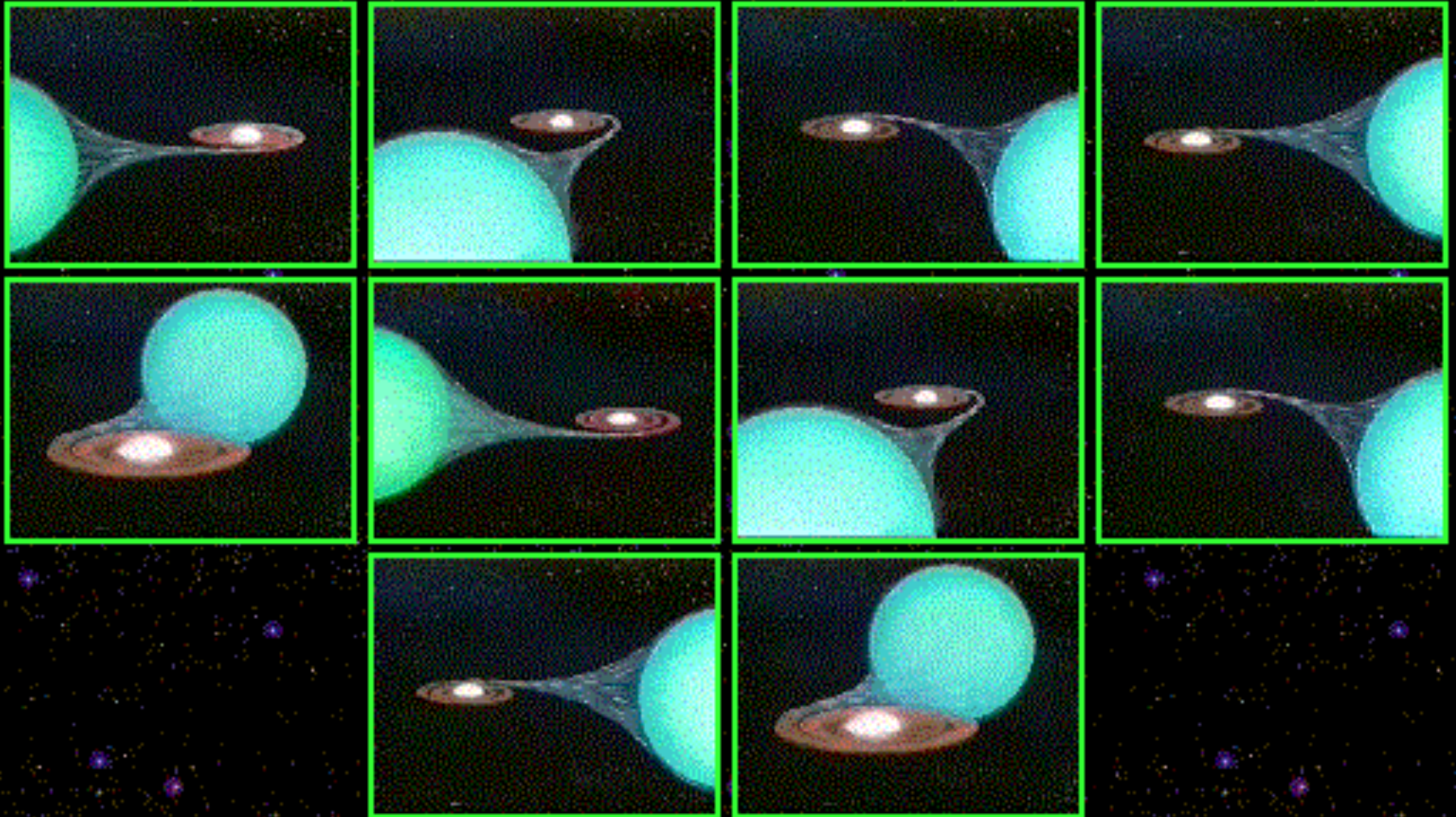
„Nowa”

Bogata w wodór materia
ulega wybuchowej fuzji.
Gwiazda odrzuca
nagromadzoną materię

TOWARZYSZ

Nowe karłowate

Niestabilność dualno-kluczowa



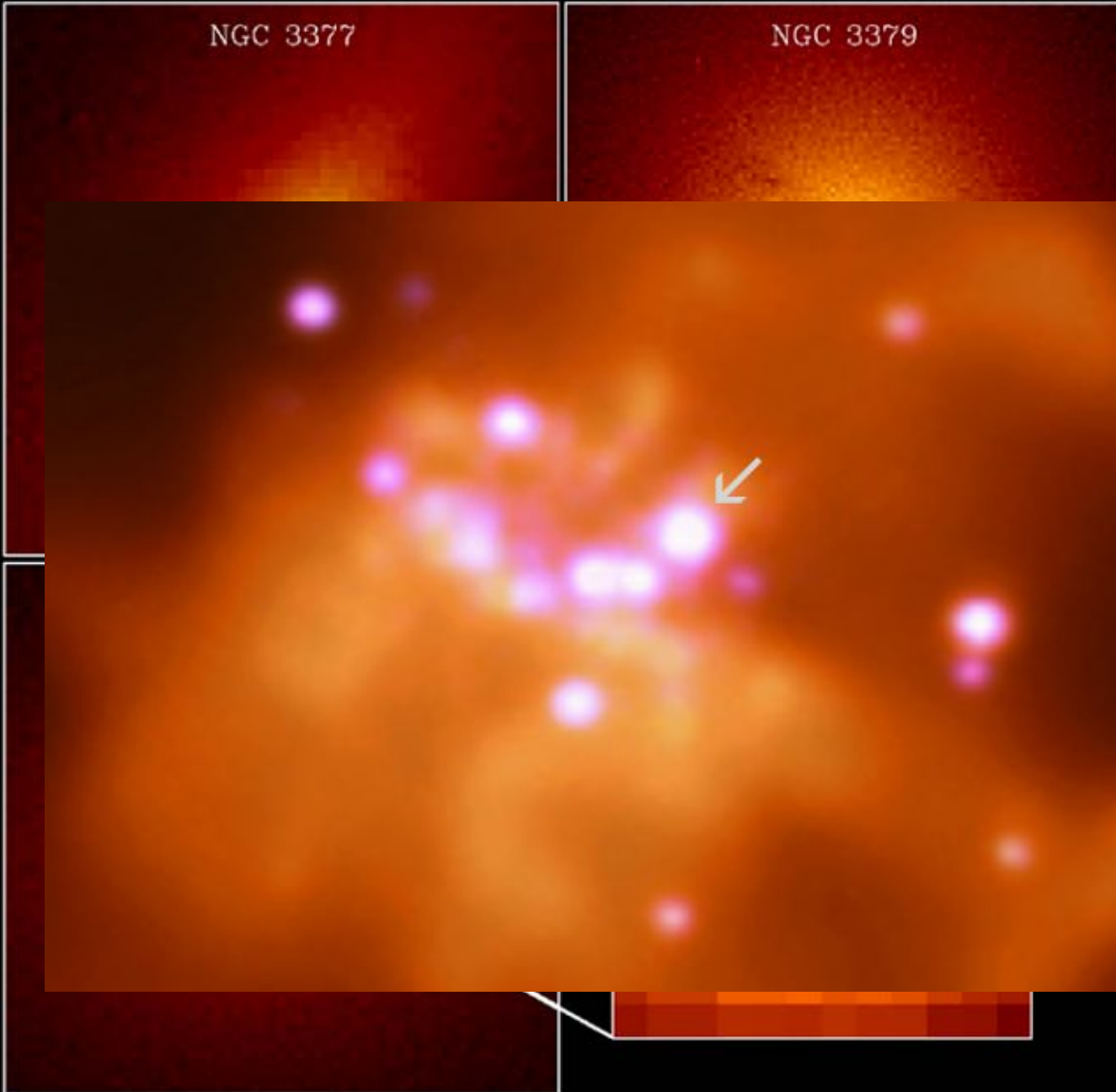
Gwiazdy supernowe

- supernowe typu Ia
 - przekroczenie masy Chandrasekhara przez białego karła w układzie podwójnym ($M > 1.44$)
 - zderzenie (złanie) dwóch białych karłów
 - nic nie zostaje
- supernowe typu II
 - zapadnięcie się jądra żelaznego gwiazdy masywnej
 - neutronizacja jądra
 - pozostaje gw. neutronowa lub czarna dziura

NGC 3377

NGC 3379

Galaxy



WFPC2

Hubble S

STIS

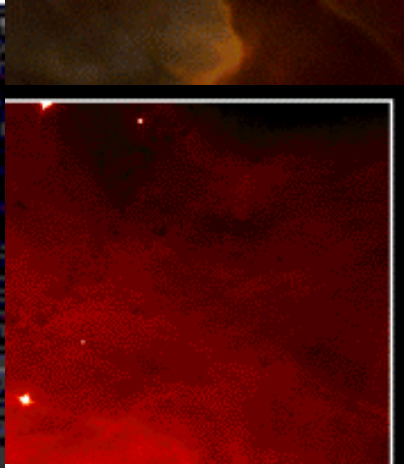
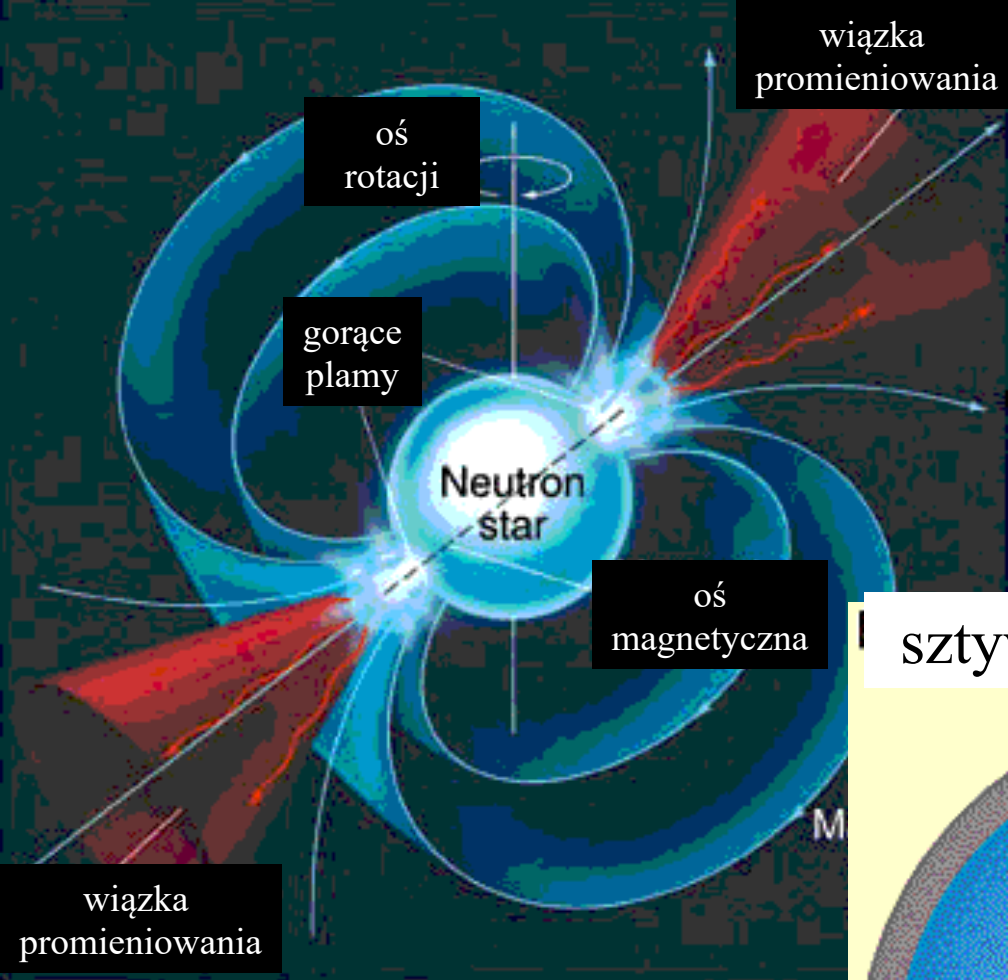
ka

PRC97-12 • S

Galaxies Possibly Containing Black Holes

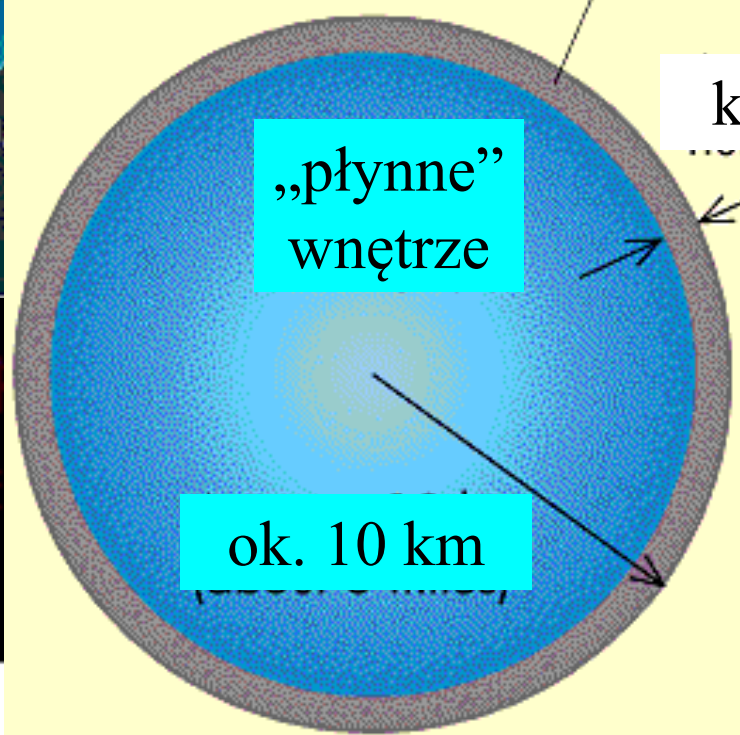
HST • WFPC2 NASA

PRC97-01 • ST Scl OPO • January 13, 1997 • K. Gebhardt (U. MI), T. Lauer (NOAO) and NASA



0329+54

sztywna skorupa (Fe?)



kilkaset m



— mg

Palomar
PRC96-22a · ST Sci O
J. Hester and P. Scow



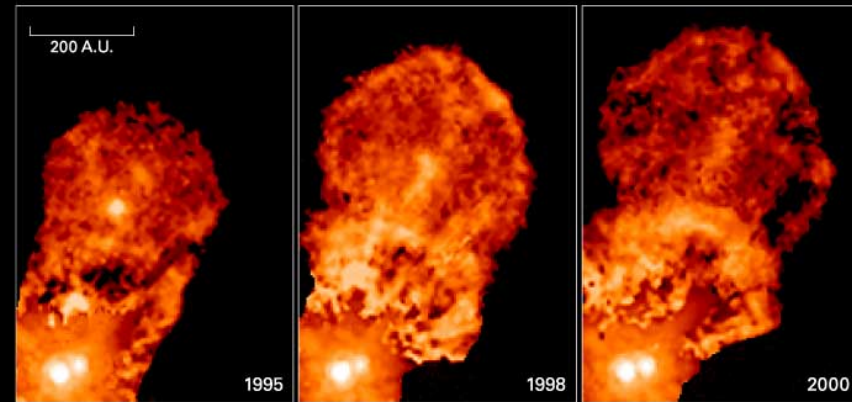
(b)

Is

2

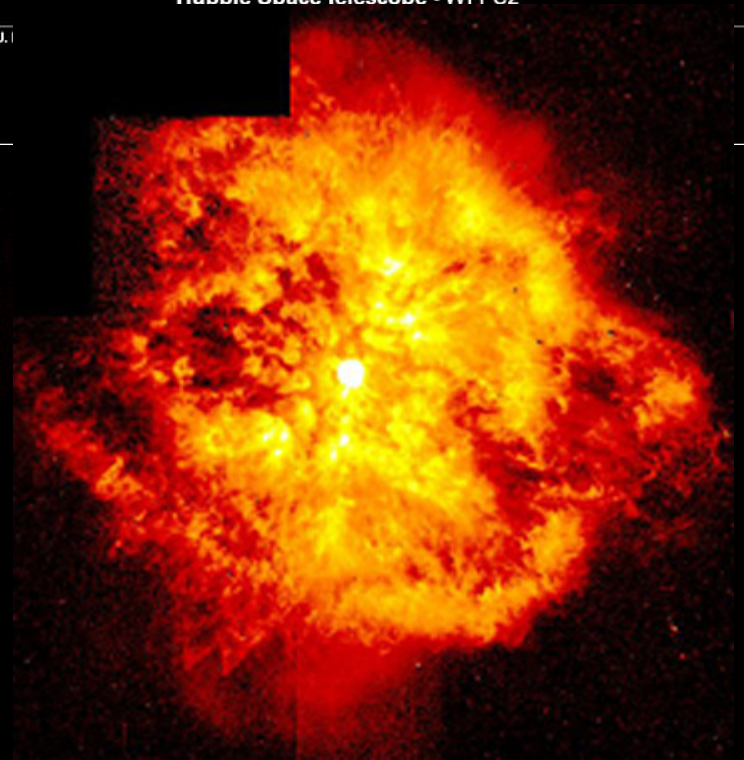
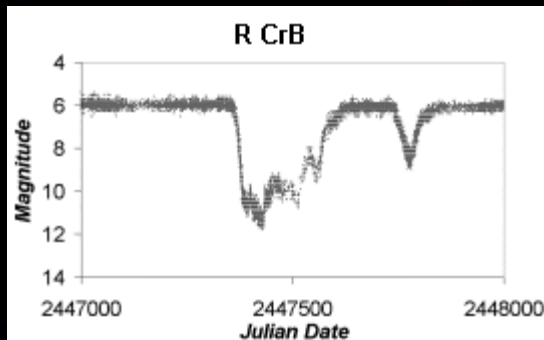
Inne zmienne

- gwiazdy T Tauri
- gwiazdy rozblyskowe
- gwiazdy Wolfa-Rayeta
- R Coronae Borealis

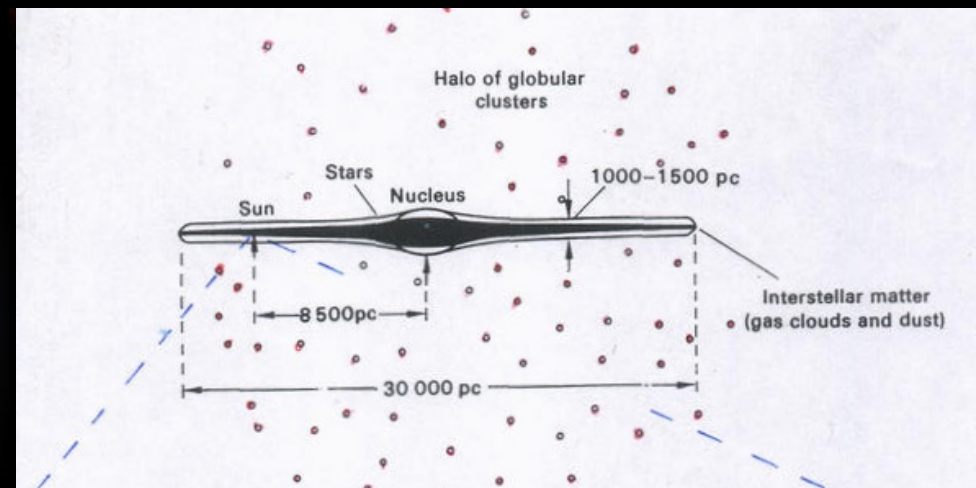


Hot Gas Bubble Ejected by Binary Star XZ Tauri
Hubble Space Telescope • WFPC2

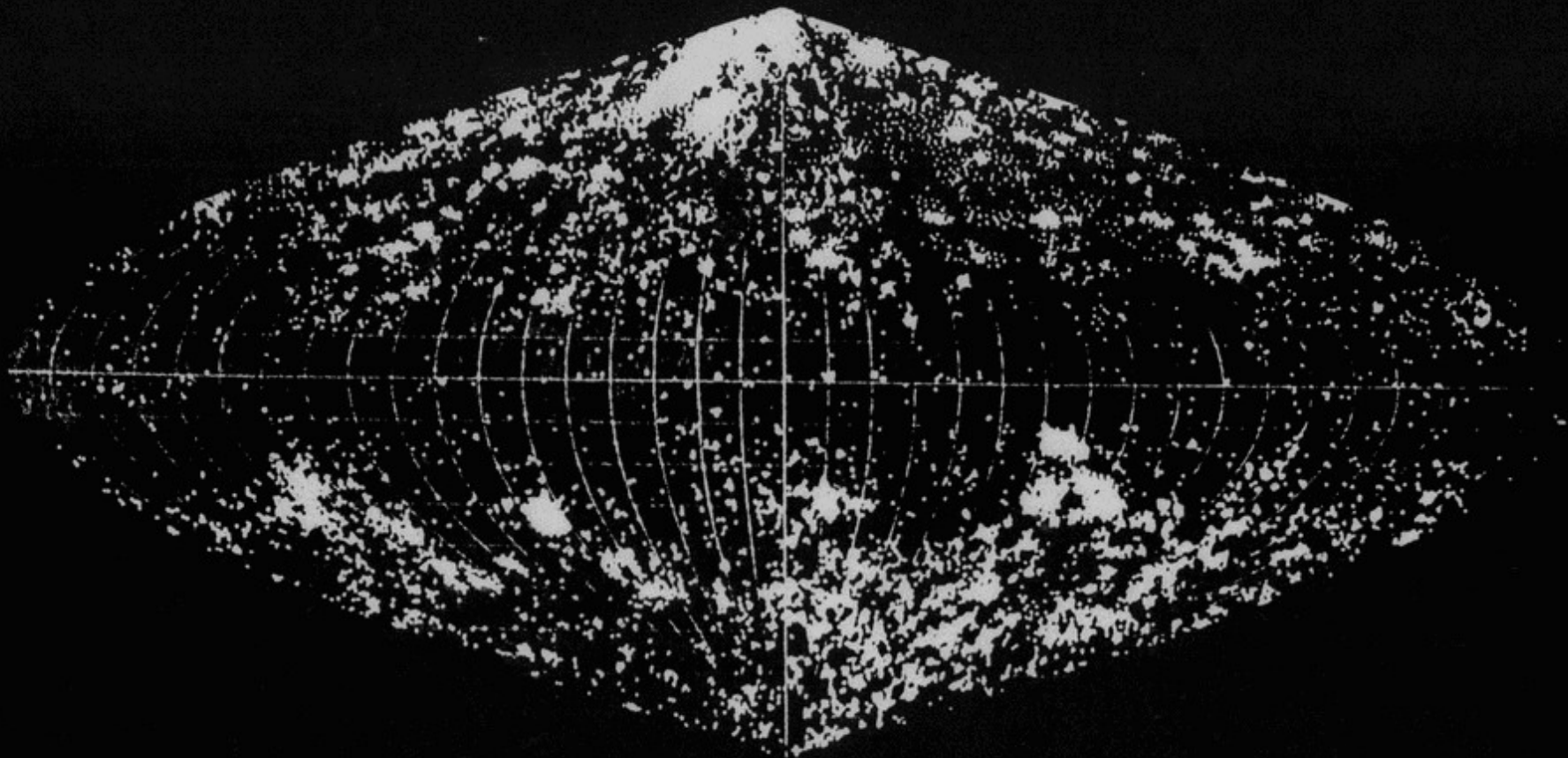
NASA and J.



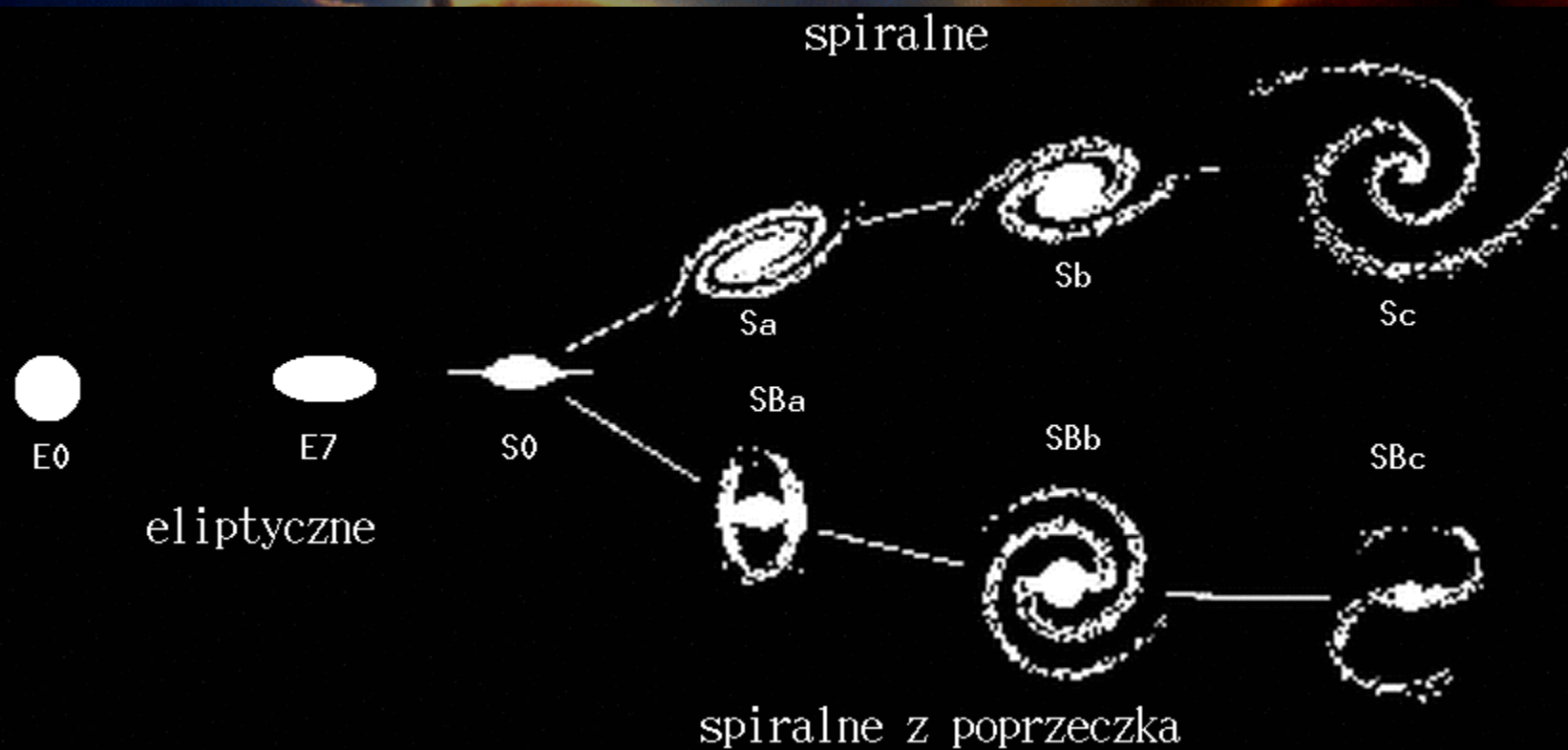
Nasza Galaktyka



Rozkład mgławic na niebie: Charlier (1922):



Galaktyki



Galaktyki

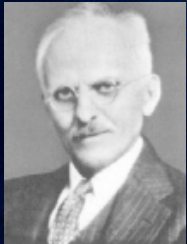


M87 © Anglo-Australian Observatory

Galaktyki



Curtis i Shapley 1920



Mgławice spiralne są układami gwiazd
równoważnymi Drodze Mlecznej

Heber D. Curtis
1872 - 1942



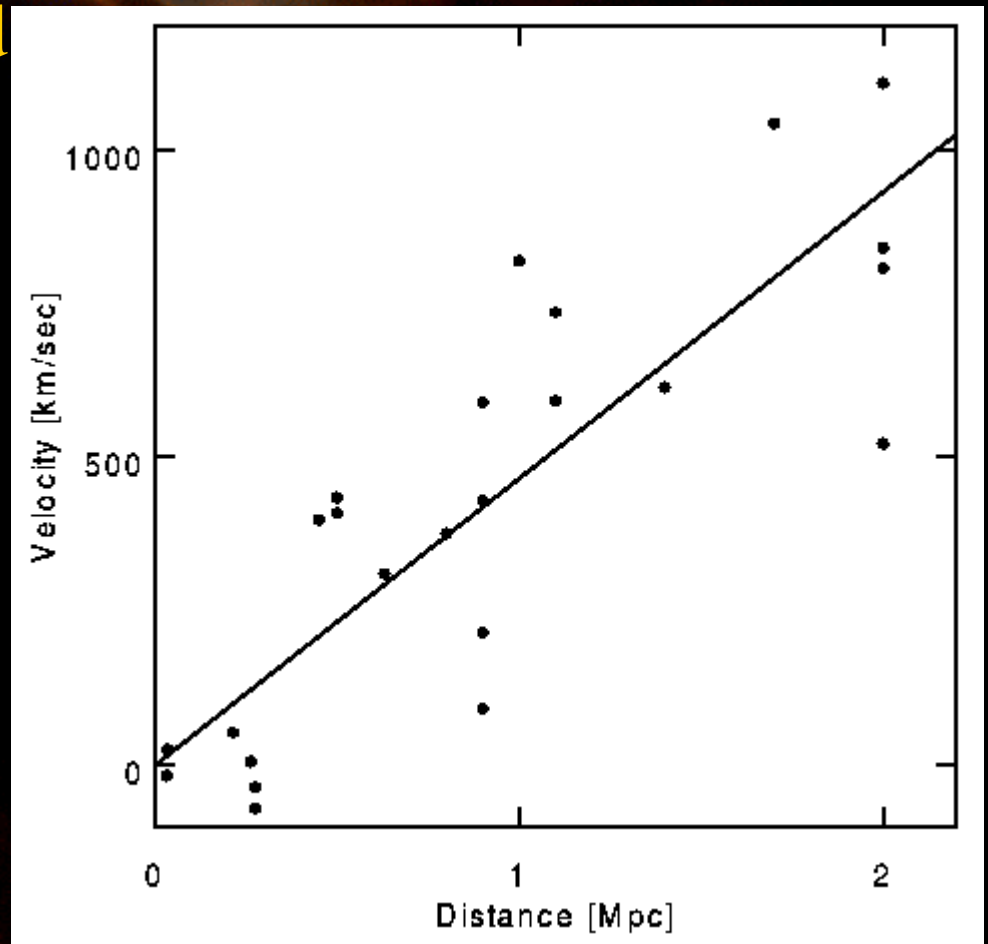
Mgławice spiralne należą do Galaktyki

Harlow Shapley
1885 - 1972

	Shapley	Curtis
Main point	The Milky Way is large and the 'spiral nebulae' are part of it.	The Milky Way is small and there may be other galaxies like it.
Evidence	Milky Way is so large that if the spiral nebulae have the same size, they are at inconceivably large distances from us.	The large range in angular sizes of the spiral nebulae indicates that there is a huge range in distances to them. They cannot all be in our small Milky Way.
	<p>The surface brightness of the Milky Way is lower than that of the spiral nebulae. So they cannot be similar things. <i>We now know that this observation is caused by dust absorption.</i></p> <p>Observations show that some spirals revolve once in about 10^8 years. If they are bigger than 5kpc, their outer regions travel at more than the speed of light. <i>It later turned out that these observations were simply wrong...</i></p>	<p>(Super-)Novae observed in the Andromeda nebula are much fainter than those in the Milky Way. This implies large distances. <i>In fact, Curtis even underestimated the distance to Andromeda as he looked at supernovae, not novae, without knowing.</i></p> <p>Emission lines from the spiral nebulae are similar to those you would get if you summed up the spectra of stars in the solar neighbourhood. Their Doppler shifts are huge and so they travel at much larger speeds than stars. Therefore they cannot be part of the Milky Way.</p>

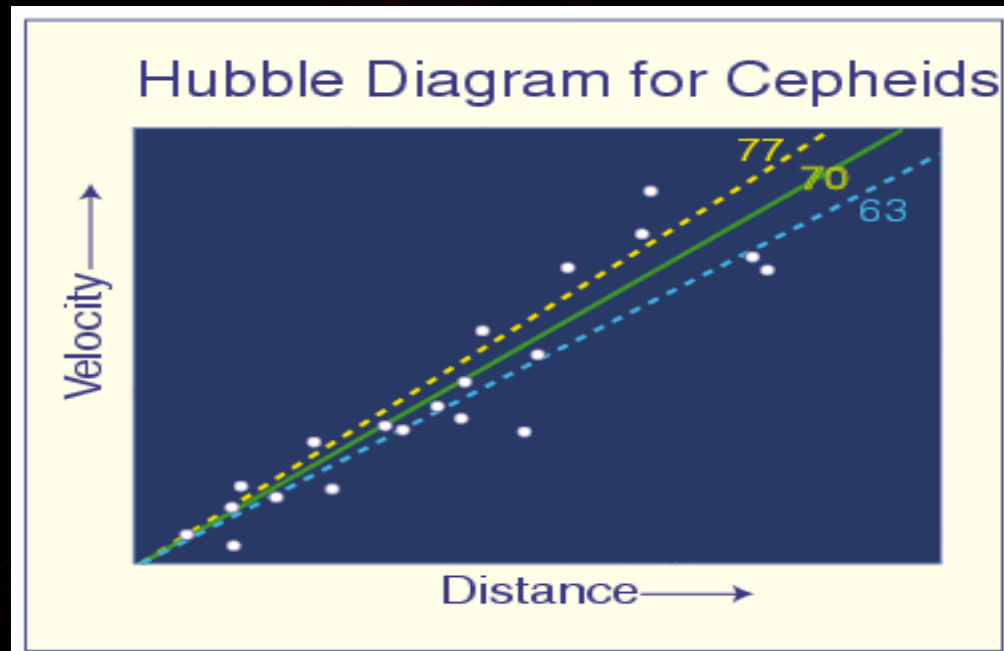
Prawo Hubble'a

- Edwin Hubble
 - 1929, pomiary Cefeid
 - $v = H_0 \cdot r$
 - $H_0 = 464 \text{ km/s/Mpc}$

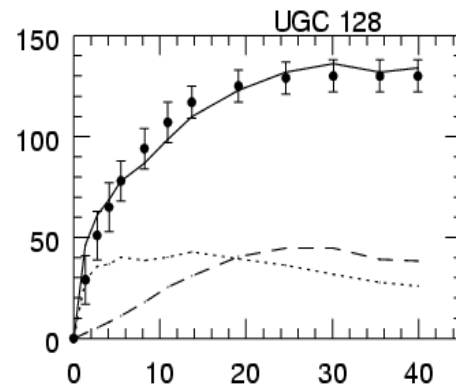
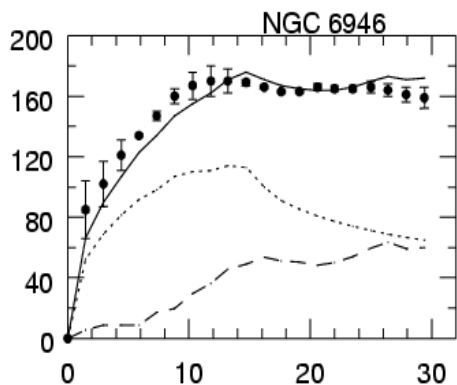
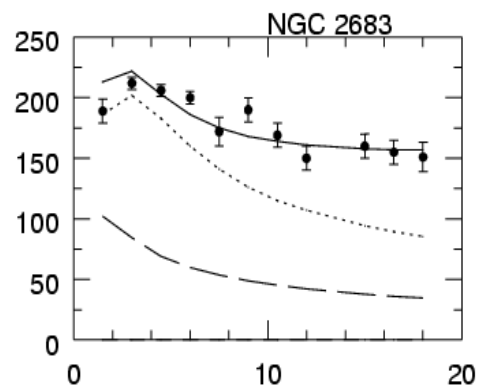
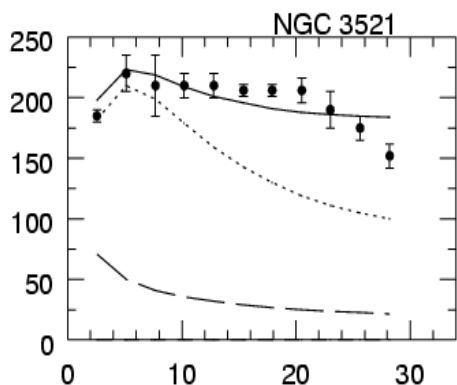
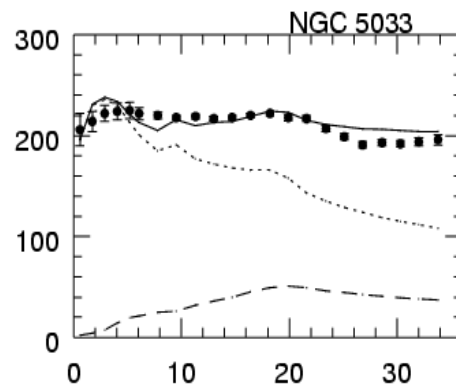
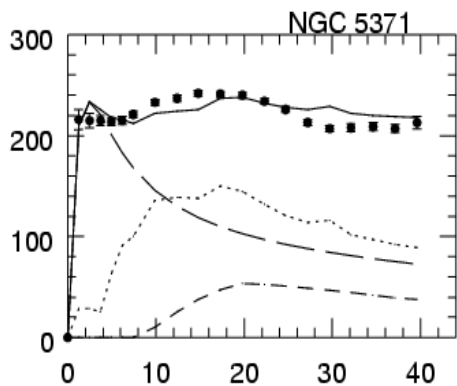


Prawo Hubble'a

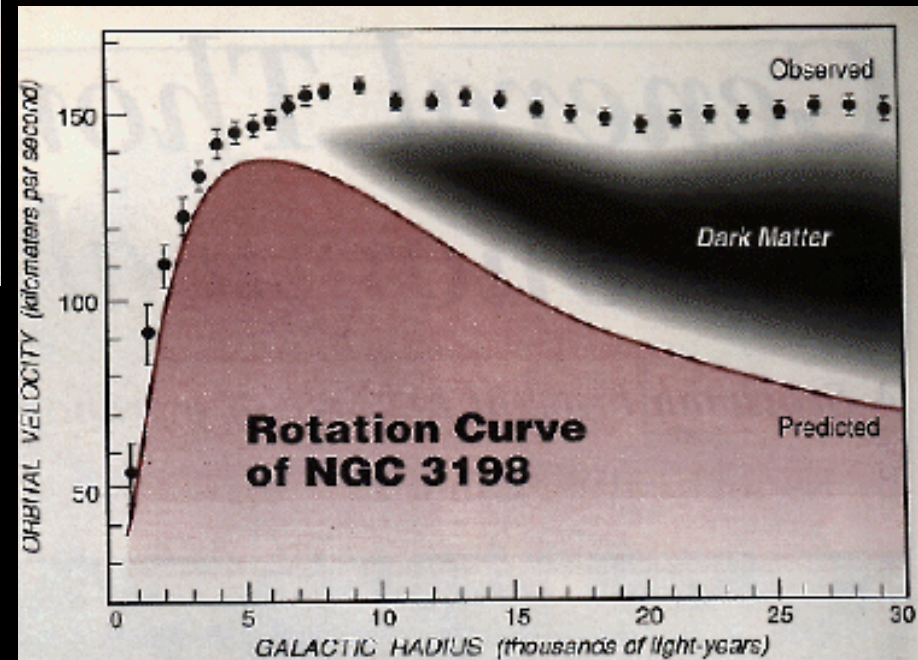
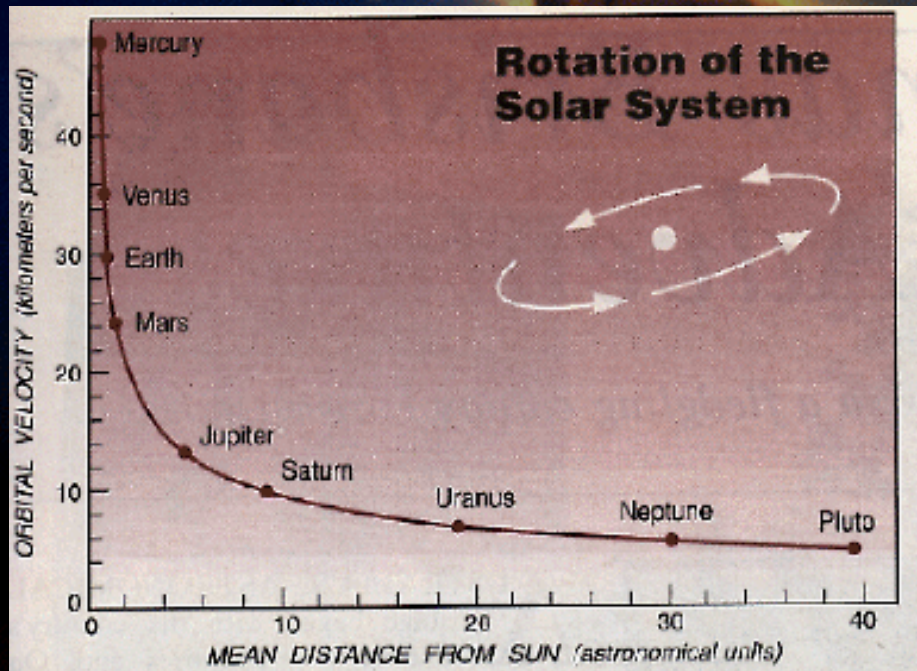
- $v = H_0 \cdot d$
 - $H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$
- z - redshift (przesunięcie ku czerwieni)
 $z = \Delta\lambda/\lambda = (\lambda - \lambda_0)/\lambda = v/c$ (prawo Dopplera)
 $\lambda = (1+z) \lambda_0$



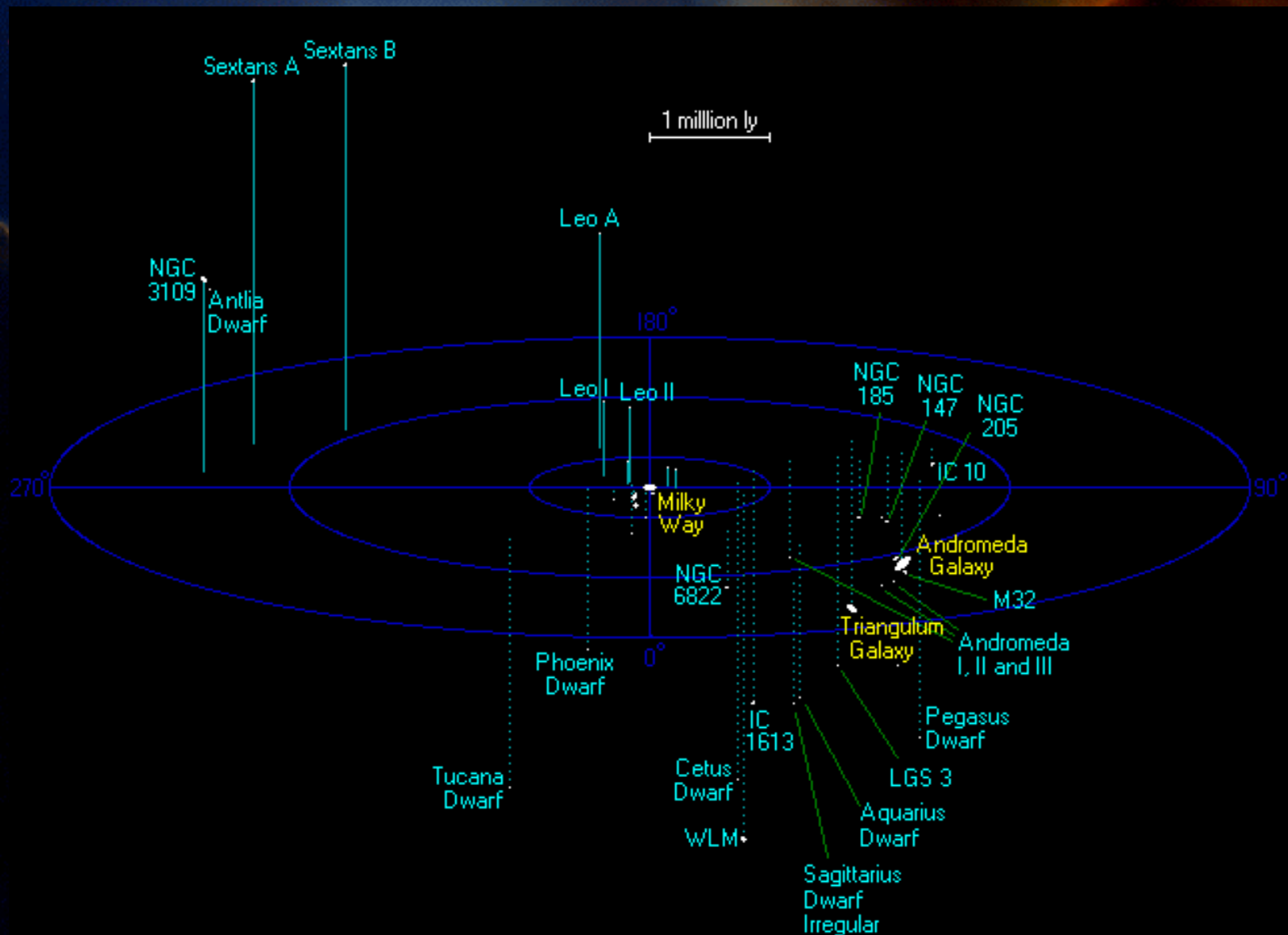
Krzywe rotacji galaktyk spiralnych



Krzywe rotacji a ciemna metria



Lokalna Grupa Galaktyk, D=5 mln l.św.



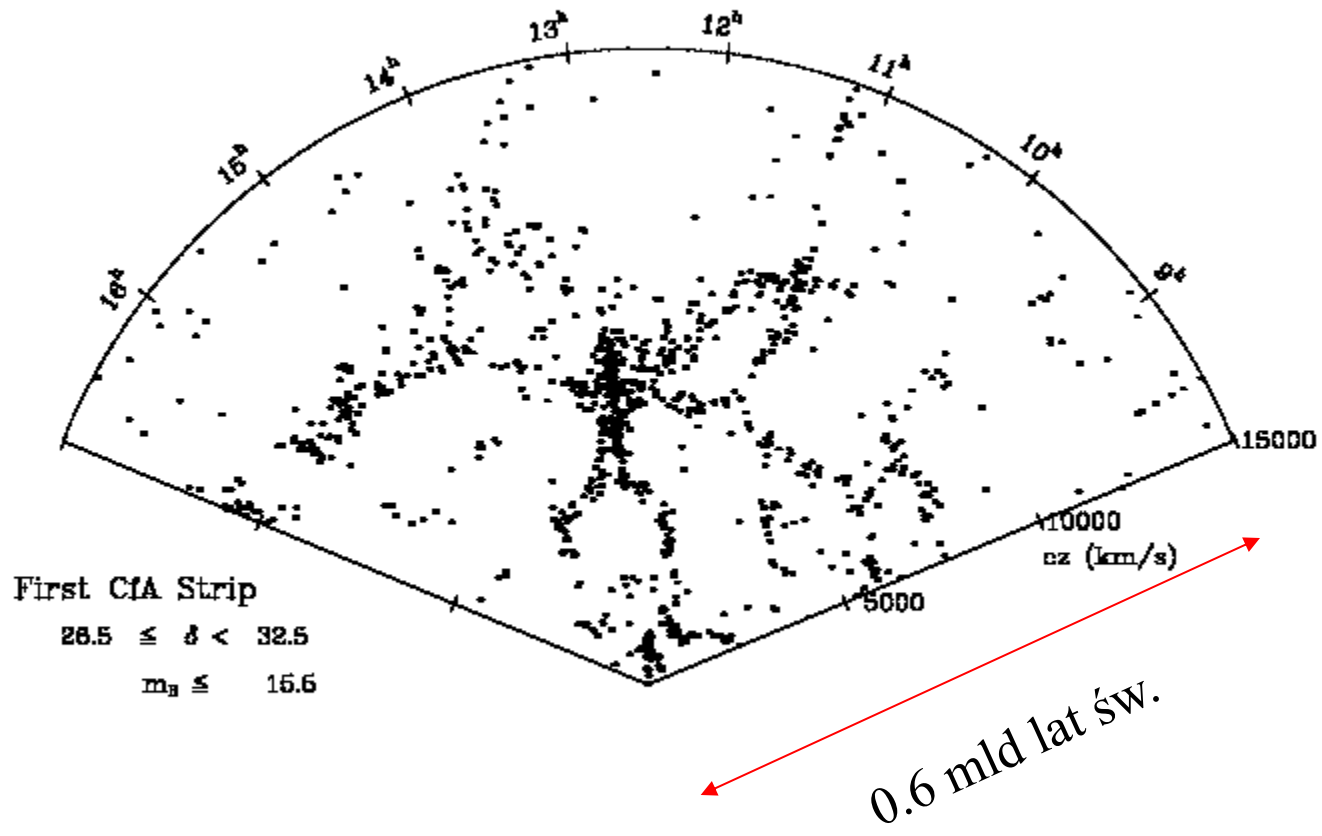
Gromady Galaktyk



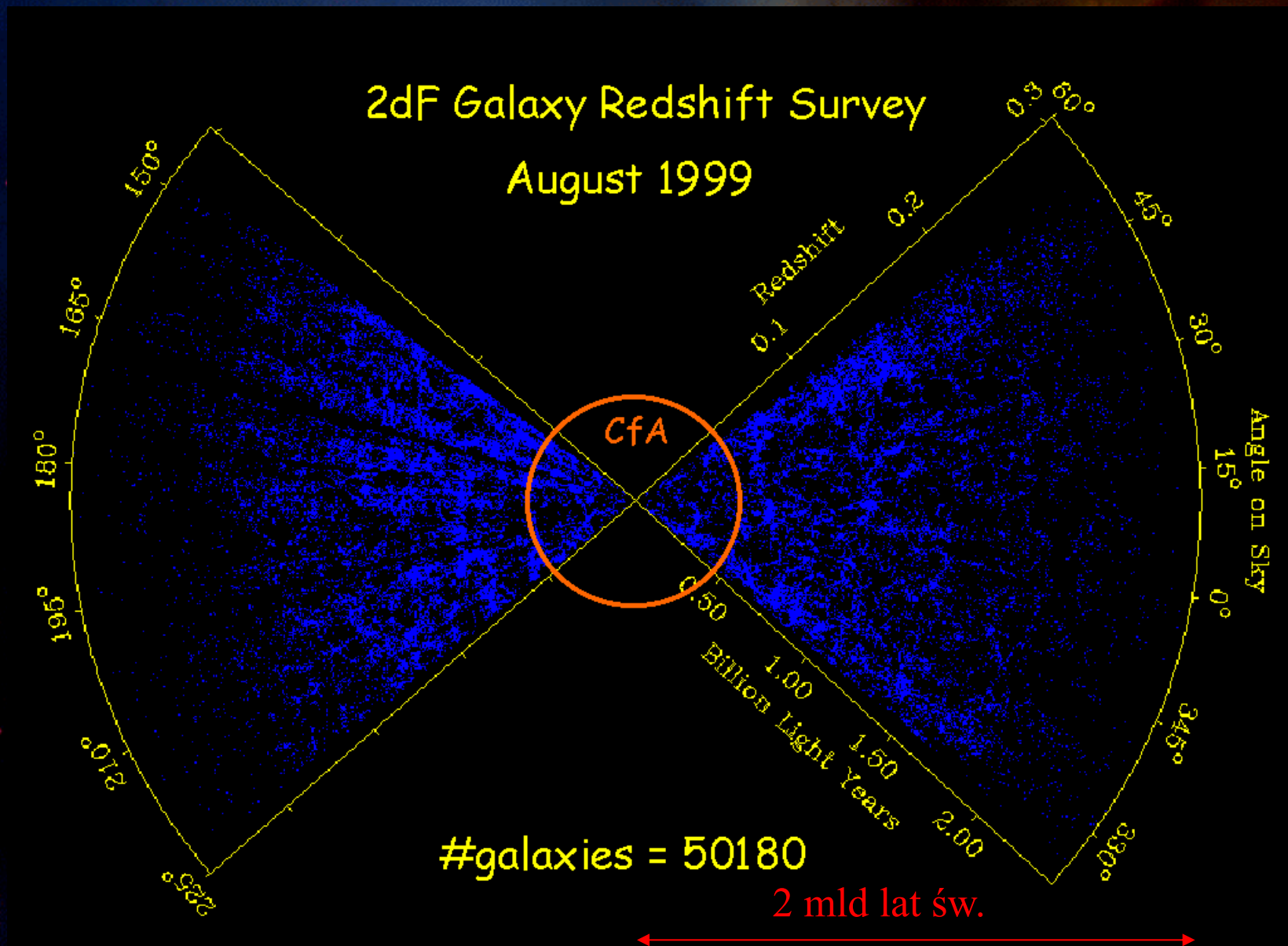
Wszechświat wyspowy

- gwiazdy
- gromady gwiazd
- galaktyki Galaktyka 30kpc
- grupy galaktyk do LMC 50 kpc
 - Lokalna Grupa Galaktyk 2Mpc
- gromady galaktyk
- supergromady galaktyk, pustki
- skala jednorodności ; 500 Mpc

Struktura przestrzenna galaktyk - CfA

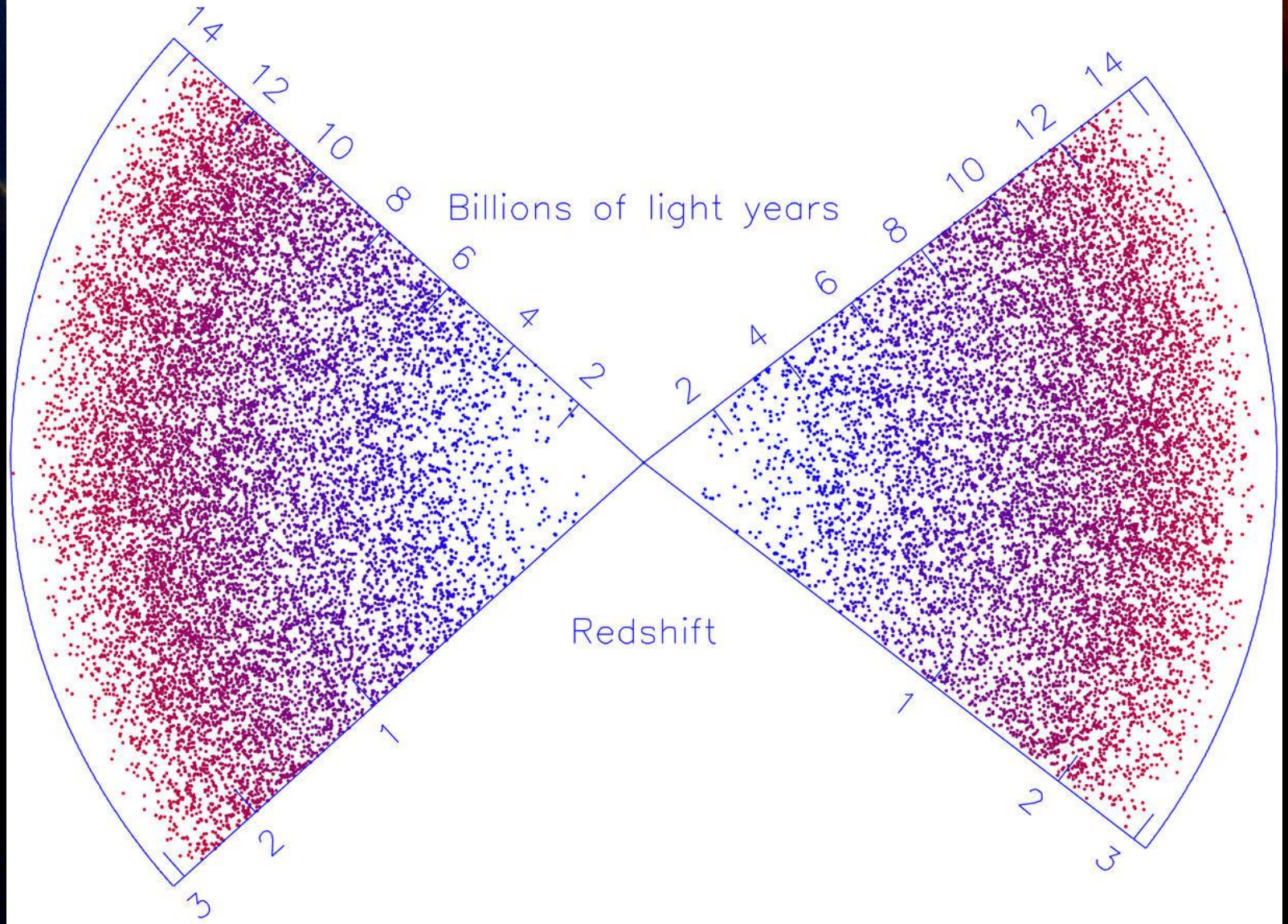


Struktura przestrzenna galaktyk – 2dF



Struktura przestrzenna - kwazary

The 2dF Quasar Redshift Survey



Zasada Kosmologiczna

Wszechświat:

- jednorodny
- izotropowy
- prawa fizyczne uniwersalne

Silna Zasada Kosmologiczna

Wszechświat z każdego miejsca i w dowolnym momencie wygląda jednakowo.

Wszechświat wieczny, niezmienny, stacjonarny i nieskończony - sprzeczne z obserwacjami (np. paradoks Olbersa)

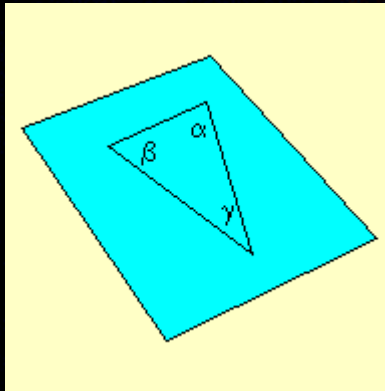
Teoria Stanu Stacjonarnego

Kształt Wszechświata

- krzywizna (geometria lokalna)
 - zerowa; dodatnia; ujemna
- topologia (geometria globalna)
 - atrybuty:
 - skończony/nieskończony
 - płaski (zerowa krzywizna); otwarty (ujemna); zamknięty (dodatnia)
 - spójność (jedno-, wielo- spójny)

Wszechświat płaski

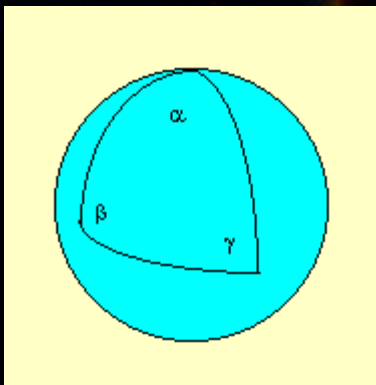
- nieskończona objętość
- geometria euklidesowa
 - suma kątów trójkąta = 180 stopni
 - spełnione twierdzenie Pitagorasa: $z^2=x^2+y^2$



Wszechświat z dodatnią krzywizną

- skończona objętość
- geometria nieeuklidesowa
 - suma kątów trójkąta > 180 stopni

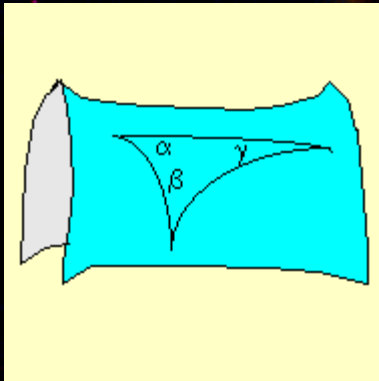
$$z^2 > x^2 + y^2$$



Wszechświat z ujemną krzywizną

- nieskończona objętość
- geometria nieeuklidesowa
 - suma kątów trójkąta może być < 180 stopni

$$z^2 < x^2 + y^2$$



Krzywizna Wszechświata

- gęstość krytyczna:
 - w modelach kosmologicznych:

$$\rho_{\text{crit}} = 3H_0^2/(8\pi G), \quad H_0 = 70 \text{ km/s}$$

$$\rho_{\text{crit}} = 8 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$$

$$\Omega = \rho/\rho_{\text{crit}}$$

Z obserwacji współczesnych:

Wszechświat jest płaski $\Omega = 1$

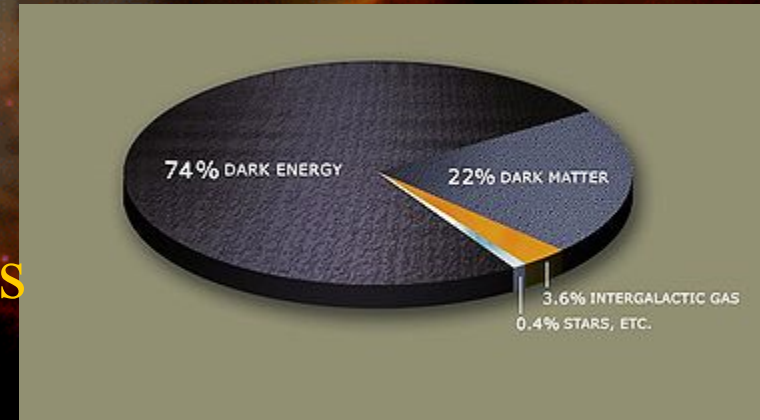
masa w gromadach galaktyk

$$\Omega_m = 0.3$$

materia barionowa (0.04) + ciemna

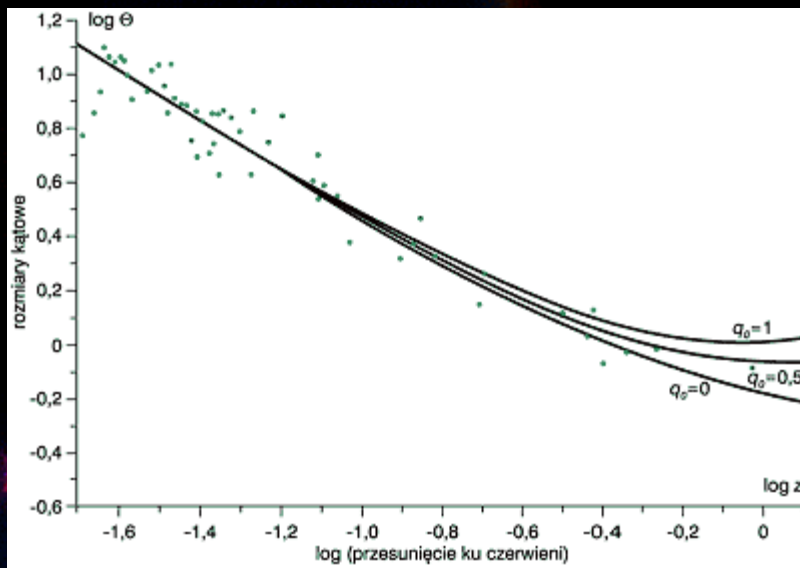
$$\Omega_E = 0.7$$

ciemna energia



Testy kosmologiczne

- zależność Θ - z
 - średnica kątowa *vs.* poczerwienienie
 - $\Theta = 1/r$ Wszechświat płaski
 - np. centralne obszary gromad galaktyk
- zliczenia obiektów

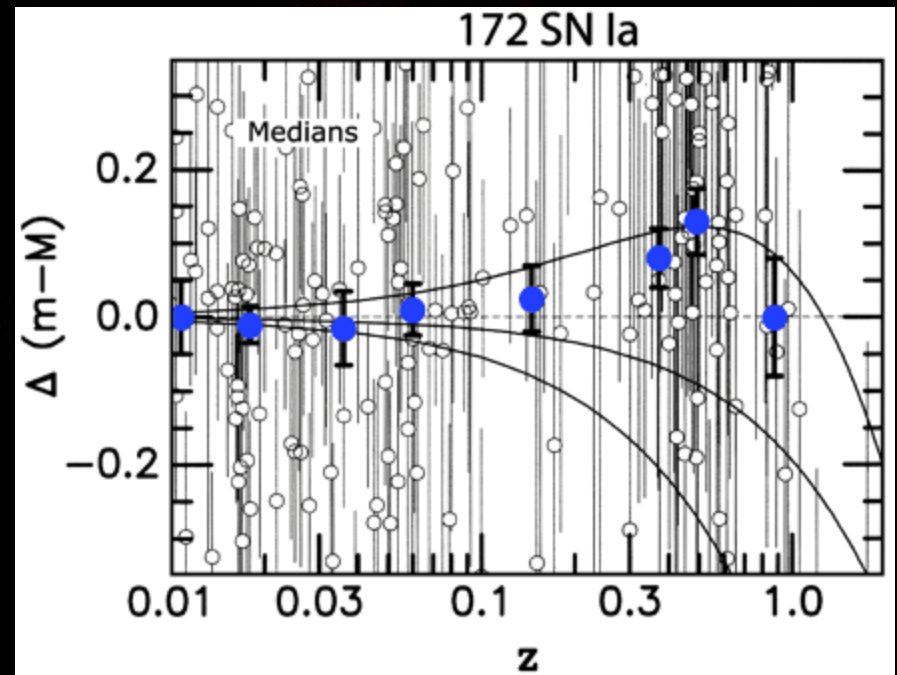
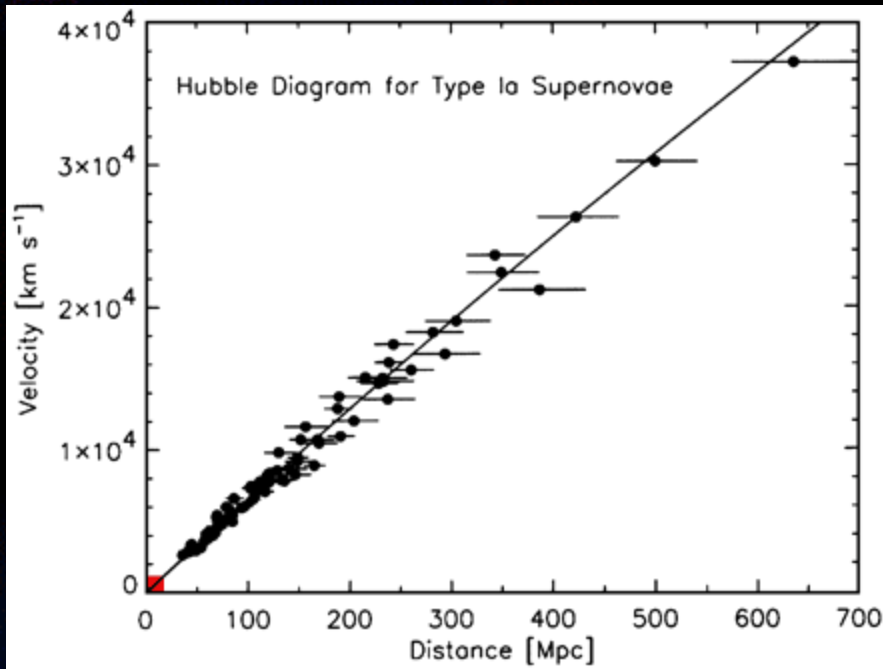


Testy kosmologiczne

- Wiek Wszechświata
 - $t \sim 1/H_0$, nie może być krótszy od wieku najstarszych obiektów – gromad kulistych i białych karłów $H_0 < 80-100 \text{ km/s/Mpc}$

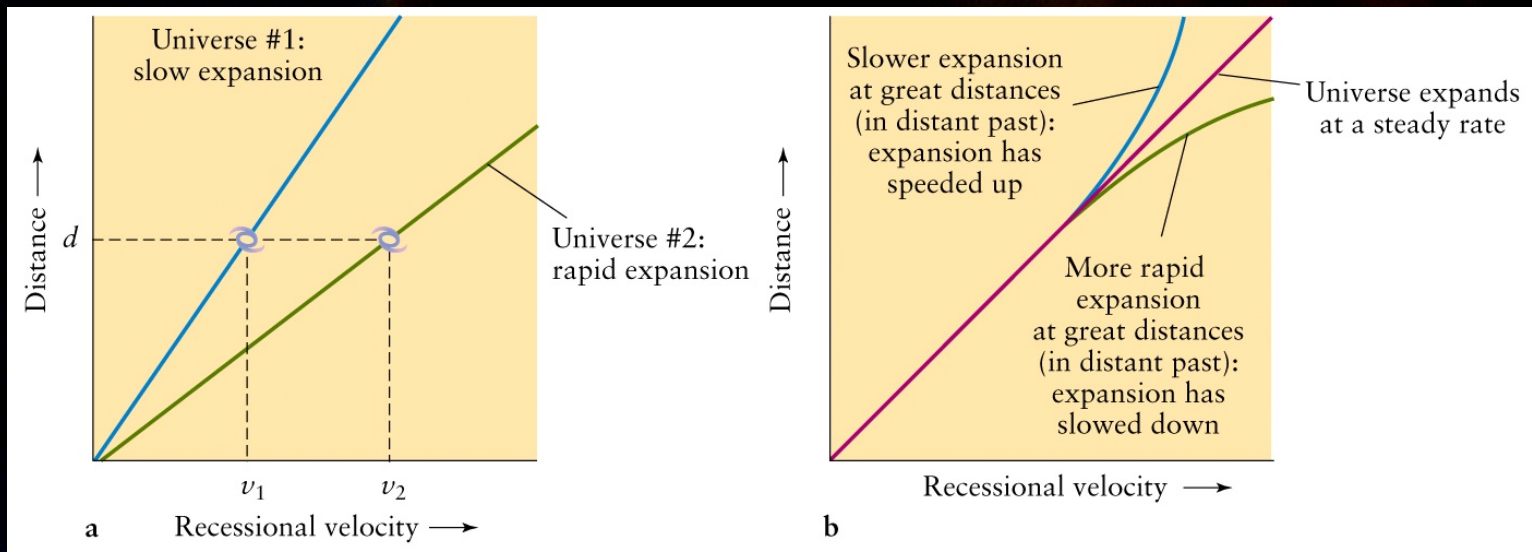
Testy kosmologiczne

- Diagram Hubble'a
- $m = M + 5 \log z + 5 \log R_H + C$; $R_H = c/H$
– dla supernowych typu Ia

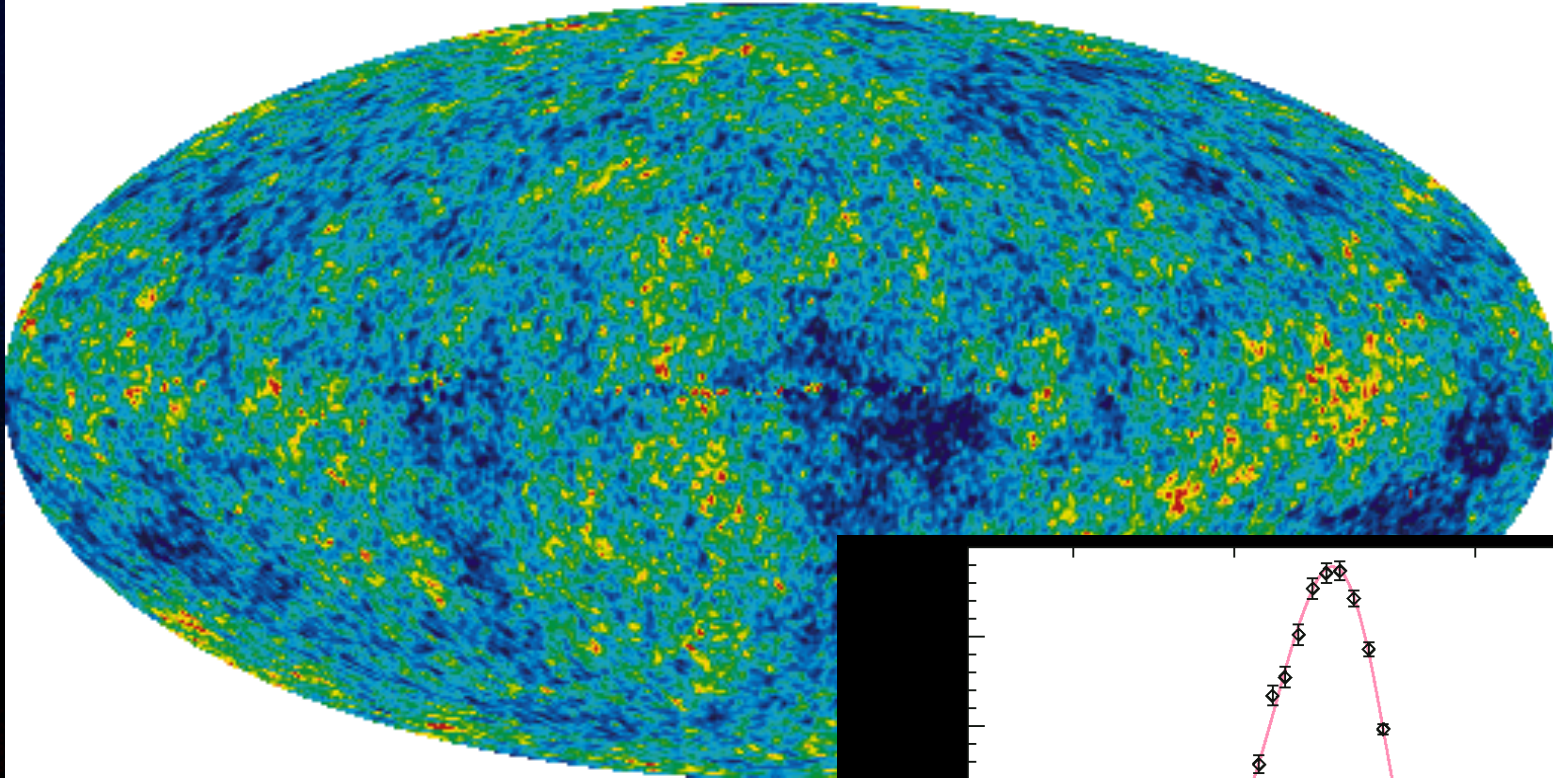


Poszukiwanie ciemnej energii

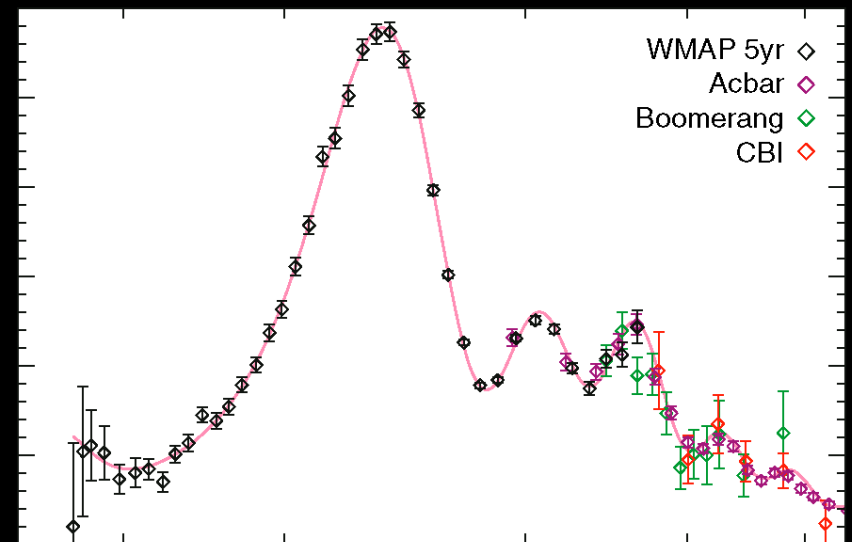
- Promieniowanie tła ?
 - nie: $\Omega \sim 0.01$
- Prędkość ekspansji – stała Hubble'a H_0
 - obecnie 70 km/s
 - pomiar H_0 dawniej - dla dużych redshiftów



Wyniki WMAP



- determined the age of the universe
- epochs of the key transitions
- geometry of the universe



s we

Poszukiwanie ciemnej energii

- Stała kosmologiczna Λ w równaniach ogólnej teorii względności Einsteina
 - dostarcza energii (zapewniając płaskość Wszechświata)
 - dostarcza ciśnienia (zapewniając akcelerację)
 - w mechanice kwantowej równoważna z energią i ciśnieniem próżni (w której tworzą się i anihilują wirtualne pary cząstka-antycząstka)

Poszukiwanie ciemnej energii

- Stała kosmologiczna Λ w równaniach ogólnej teorii względności Einsteina
 - dostarcza energii (zapewniając płaskość Wszechświata)
 - dostarcza ciśnienia (zapewniając akcelerację)
 - w mechanice kwantowej równoważna z energią i ciśnieniem próżni (w której tworzą się i anihilują wirtualne pary cząstka-antycząstka)
- Kwintesencja – nieznanne pole kwantowe
(piąty żywioł Arystotelesa)

Historia Wszechświata

- Era Plancka

- 0 do 10^{-43} s

- gęstość 10^{93} g/cm³

- temperatura 10^{32} K

- teoria grawitacji Einsteina nie obowiązuje

- nie umiemy opisać zachodzących zjawisk

10^{-43} seconds

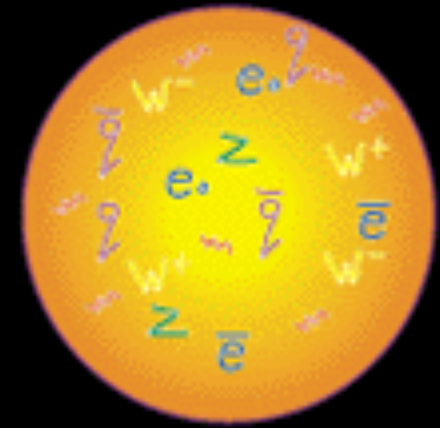


10^{32} degrees

Historia Wszechświata

- Era hadronowa (plazmy kwarkowo-gluonowej)
 - do 10^{-4} s
 - wielka unifikacja
 - do 10^{-35} s symetria oddziaływań (elektromagnetyczne, słabe, silne), zakończona gdy $T < 10^{28}$ K
 - inflacja
 - 10^{-35} s 10^{-33} s - od tej pory oddziaływania silne dominują
 - gwałtowne przyspieszenie ekspansji (na skutek wydzielenia energii)
 - wygładzenie pierwotnych niejednorodności
 - po 10^{-33} s
 - wolniejsza ekspansja
 - istniały wszystkie typy kwarków i antykwarków
 - przy obniżaniu temperatury cięższe się rozpadały,
 - mniejsze łączyły w hadrony (protony, neutrony, hiperony, piony, kaony,...)
 - anihilacja par cząstka-antycząstka pozostały tylko protony i neutrony

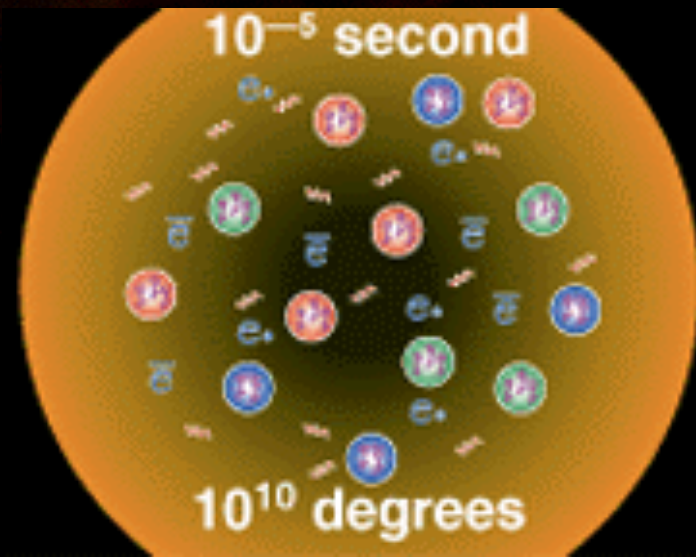
10^{-34} seconds



10^{27} degrees

Historia Wszechświata

- 10^{-5} s
- Kwarki łącz się w protony i neutrony.
- Antymateria zaczyna zanikać - promieniowanie ma zbyt małą energię, aby ją wytwarzać.
- **Temperatura 10^{10} K**



Historia Wszechświata

- Era leptonowa

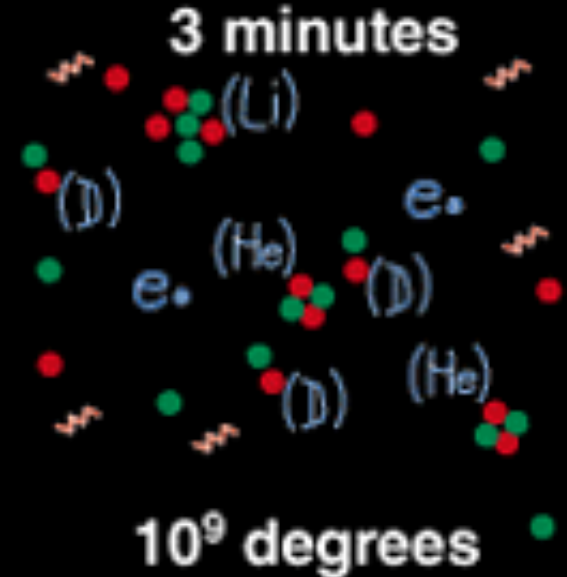
- 10 s

- powstają liczne pary elektron-pozyton, taon-antytaon, mion-antymion i odpowiednie neutrino.
 - potem anihilacja par
 - przede wszystkim cięższych (miony i taony)
 - neutrino przestały oddziaływać z pozostałymi cząstkami
 - „neutrinowe promieniowanie tła”?

- Era nukleosyntezy

- 10 minut

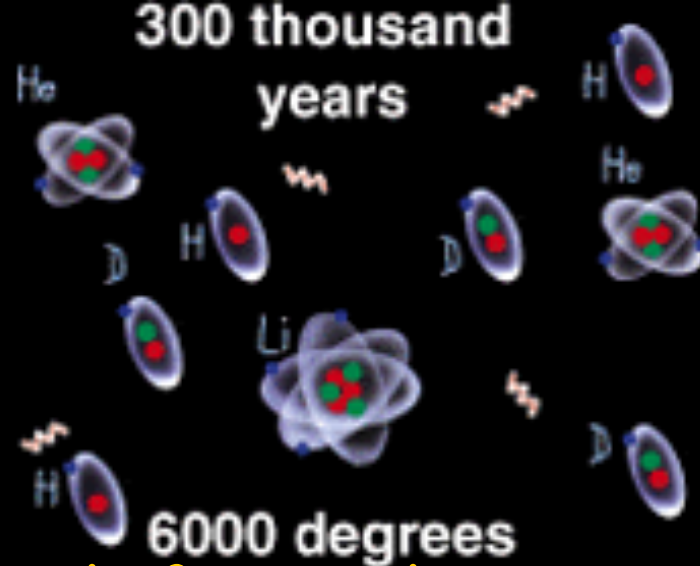
- rozpad neutronów
 - ocalały tylko te, które połączyły się z protonami w jądra
 - jako pierwsze jądra deuteru, potem helu-3, helu-4, litu
 - pierwotny skład materii: 70% H, 29 % He, Li



Historia Wszechświata

- Era promieniowania

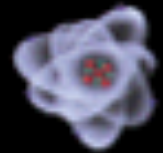
- Wszechświat wypełniony głównie fotonami (w równowadze z niewielką domieszką protonów, neutronów, He, Li)
- 10,000 lat energia promieniowania $<$ energii materii
- 300,000 lat temperatura $\sim 3,000$ K
 - średnia energia fotonów $<$ energii jonizacji wodoru
 - epoka rekombinacji – protony przyłączyły elektrony
 - uwolnienie promieniowania
 - mikrofalowe promieniowanie tła, reliktowe



Historia Wszechświata

- Era gwiazdowa (galaktyczna)
 - 100 mln lat - epoka ciemności
 - dominacja grawitacji
 - pierwsze gwiazdy
 - bardzo masywne
 - wybuchy supernowych
 - wzbogacanie w pierwiastki ciężkie
 - 1 mld lat
 - powstawanie galaktyk i/lub gromad galaktyk
 - gwiazdy mniej masywne (większa zawartość metali)
 - układy planetarne
 - do dzisiaj!

1 thousand
million years



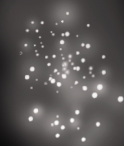
18 degrees

Historia Wszechświata

- 13 700 000 lat
- Chwila obecna
- Temperatura 2,7 K

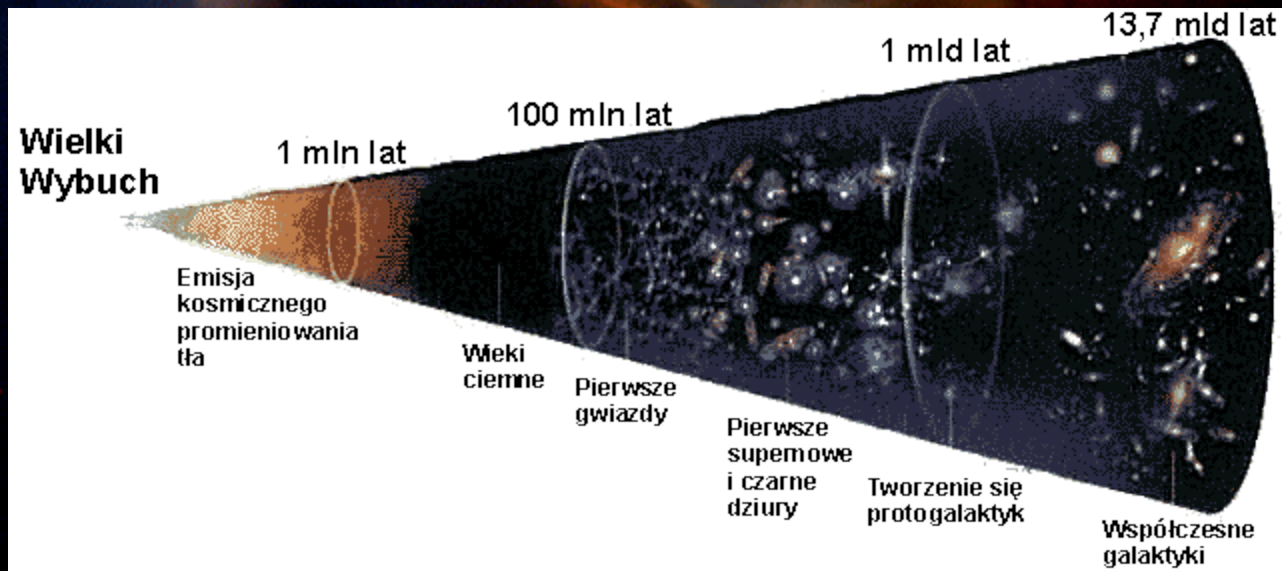
15 thousand 
million years

now



3 degrees

Historia Wszechświata



Historia Wszechświata

- 10^{-43} s
temperatura 10^{32} K, Wszechświat mniejszy od atomu, cztery oddziaływania zunifikowane
- 10^{-36} s
gravitacja oddziela się od innych sił, Wszechświat wielkości pomarańczy jest gorącą zupą kwarkowo-elektronową
- 10^{-6} s
kwarki łączą się w protony, protony i elektrony tworzą neutrony. Materia i antymateria anihiluje, Pozostaje niewielka pozostałość zwykłej materii.
- 1 s
tworzą się pierwsze jądra atomowe
- 1 mln lat
Wszechświat staje się przezroczysty. Promieniowanie zostaje uwolnione
- 1 mld lat
zaczynają się formować galaktyki

Nukleosynteza

- Pierwotna
 - wodór, deuter, hel-3, hel-4, lit, śladowo- beryl, bor
 - pierwotny skład materii: 70% H, 29 % He, Li
- Synteza gwiazdowa
 - cykle proton-proton, CNO, 3alfa
 - Węgiel, azot, tlen, neon, magnez,..., żelazo (^{56}Fe)
- Synteza w supernowych
 - szybki wychwyt neutronów (r-proces)
 - ^{56}Fe - ^{64}Fe – ^{64}Co – ^{64}Ni - ^{64}Cu - ^{64}Zn