

Astrofizyka IV

Wnętrza, ewolucja i pulsacje gwiazd.

Krzysztof Kamiński

Zagadnienia

1. Podstawowe cechy i parametry gwiazd.
2. Równania budowy wewnętrznej gwiazd, skale czasu ewolucji.
3. Równania stanu, gwiazdy politropowe.
4. Produkcja energii w reakcjach termojądrowych.
5. Transport energii we wnętrzu gwiazd.
6. Przebieg ewolucji gwiazd o małych i dużych masach.
7. Białe karły, gwiazdy neutronowe, czarne dziury.
8. Asteroseismologia



Bzyg prążkowany

Poziom złożoności w budowie owadów jest nieporównywalnie większy niż wewnątrz nawet najbardziej egzotycznych gwiazd.

Warto zwrócić uwagę na występującą w przyrodzie prawidłowość, że wysoki poziom złożoności czegokolwiek jest osiągalny jedynie przy „średnich” temperaturach (energiach). Zbyt wysokie lub niskie energie niszczą wszelką złożoność materii.

Układ CGS i SI

Centymetr-Gram-Sekunda

Prędkość: cm/s = 10^{-2} m/s

Przyspieszenie: gal = cm/s² = 10^{-2} m/s²

Siła: dyn = g cm/s² = 10^{-5} N

Energia: erg = g cm²/s² = 10^{-7} J

Moc: erg/s = g cm²/s³ = 10^{-7} W

Ciśnienie: Ba = g/(cm s²) = 10^{-1} Pa

Czym jest gwiazda?

Gwiazda jest to samograwitująca kula gazu (zazwyczaj w postaci plazmy), we wnętrzu której zachodzą lub zachodziły w przeszłości reakcje termojądrowe.

Jakie obiekty nie są gwiazdami?

Bomba termojądrowa

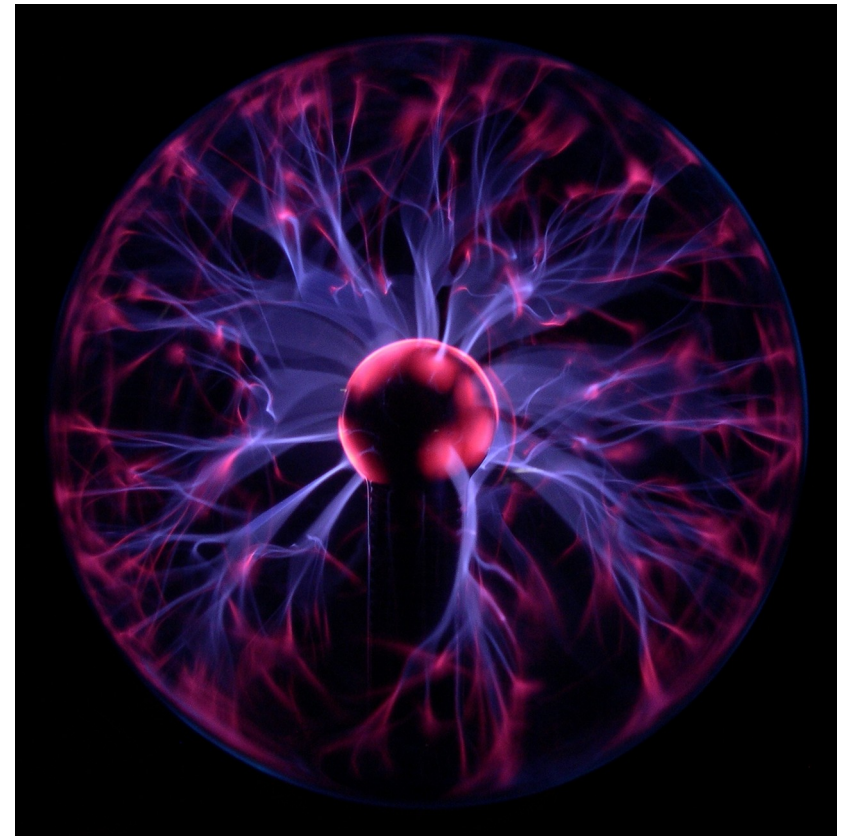
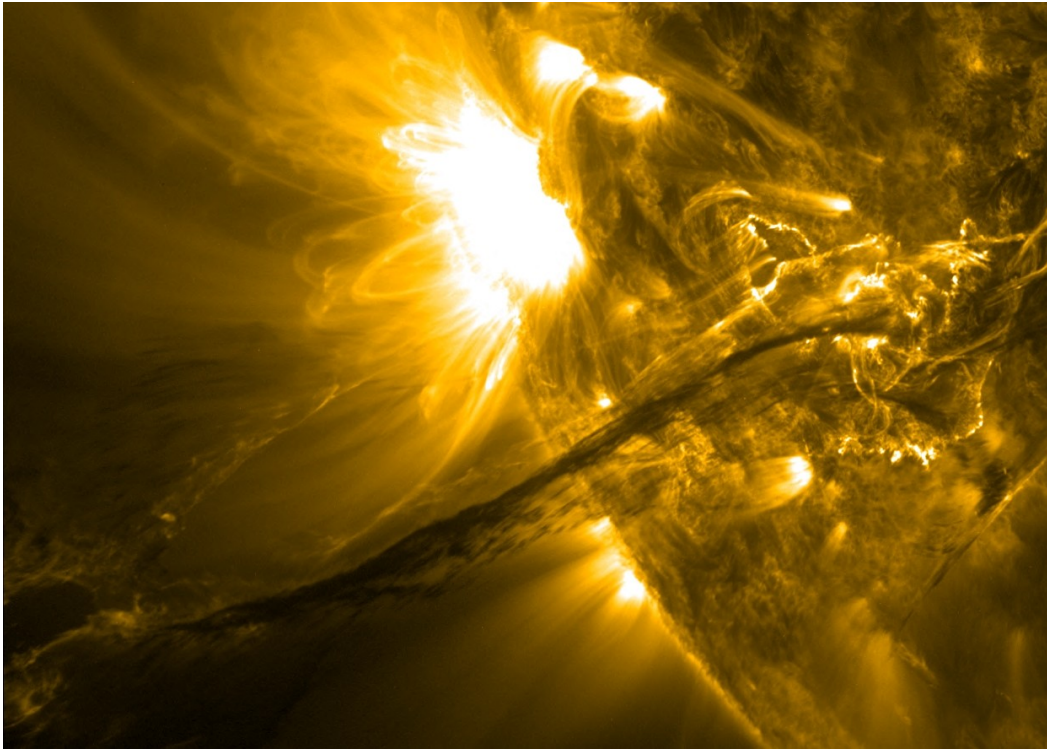
Brązowy karzeł

Protogwiazda



Plazma

Jeden z 4 podstawowych stanów materii. Zawiera znaczący ułamek jonów, przewodzi prąd ale zwykle jest quasi-neutralna elektrycznie, gdyż zawiera tyle samo jonów dodatnich i ujemnych.



Czy plazma to gaz doskonały?

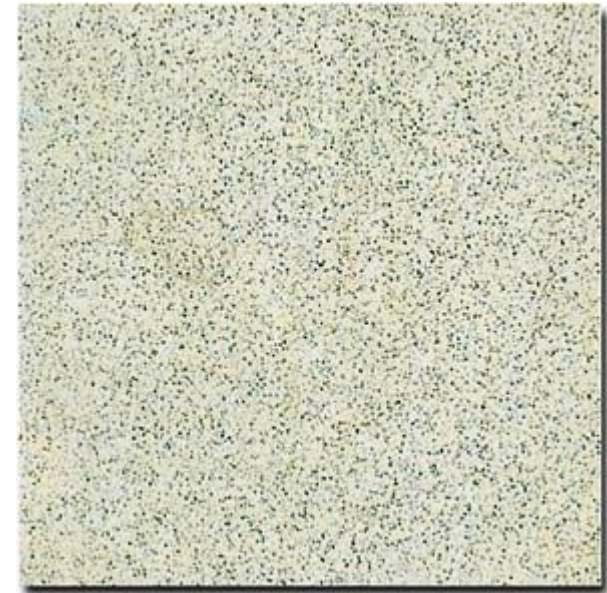
W szerokim zakresie parametrów TAK!

Fundamentalne założenia modeli budowy gwiazd



„Odizolowanie”

Gwiazdy są stosunkowo dobrze odizolowane od innych obiektów we Wszechświecie, więc można je modelować osobno.



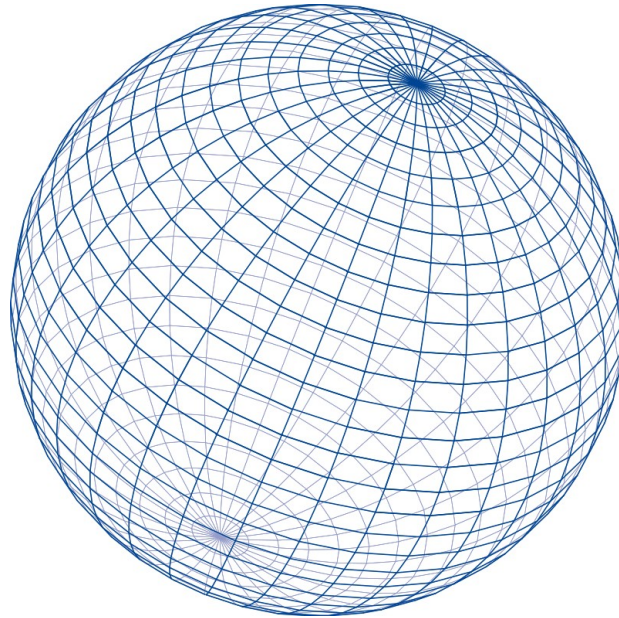
„Jednorodność”

Gwiazdy powstają z materii o jednorodnym składzie chemicznym.

Kiedy założenia te nie są spełnione?

Np. w ciasnych układach podwójnych, czyli układach w których na pewnym etapie ewolucji występuje wzajemna interakcja pomiędzy gwiazdami.

Fundamentalne założenia modeli budowy gwiazd

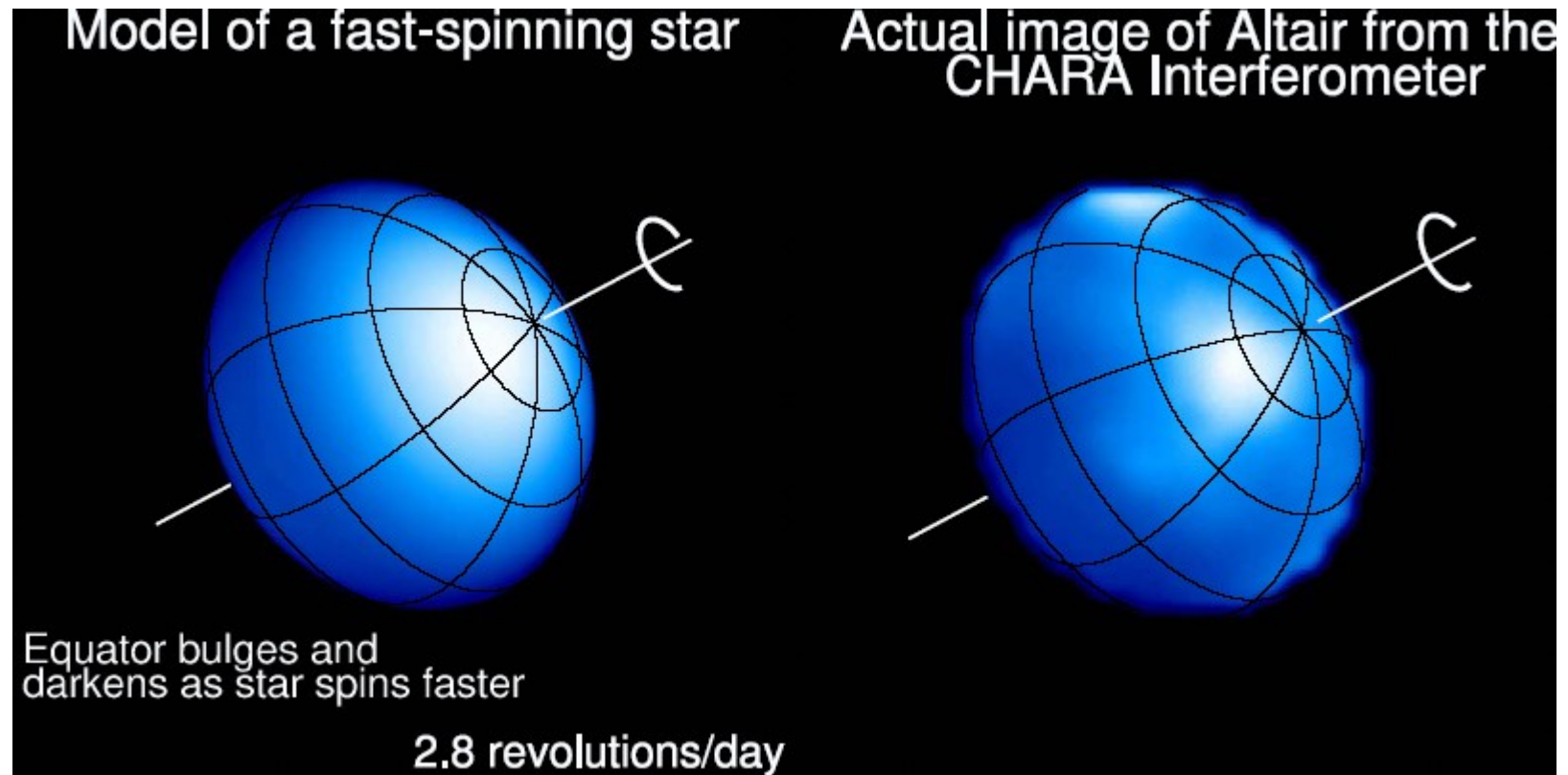


„Symetria sferyczna”

Pozwala stosować wzory jednowymiarowe do opisu trójwymiarowych gwiazd.

Kiedy założenie to nie jest spełnione?

- szybka rotacja
- ciasny układ podwójny
- pulsacje nieradialne
- silne pola magnetyczne
- gwałtowne przemiany
- konwekcja



Model oraz interferometryczny obraz gwiazdy Altair (CHARA array).

Dlaczego bieguny gwiazdy spodziewamy się zobaczyć jaśniejsze niż równik?

Ze względu na zjawisko pojaśnienia/pociemnienia grawitacyjnego.

Pojaśnienie grawitacyjne:

Twierdzenie (Edward Hugo) von Zeipel

$$F = -\frac{L(P)}{4\pi GM_{\star}(P)} g_{\text{eff}}$$

L i M mierzone na powierzchni o stałym ciśnieniu P.

$$F(\theta) \propto g_{\text{eff}} \theta^{\alpha}$$

theta – szerokość astrograficzna

$$T_{\text{eff}}(\theta) \propto g_{\text{eff}} \theta^{\beta}$$

$$T_{\text{eff}}(\theta) \propto g_{\text{eff}}^{1/4}(\theta)$$

α i β to współczynniki pojaśnienia(pociemnienia) grawitacyjnego

Efektywne przyspieszenie grawitacyjne g_{eff} jest mniejsze przy równiku ze względu na rotację, więc F również tam maleje.

Foton

$$\lambda \nu = c \quad \text{lub} \quad \lambda \nu = c/n$$

$$E = h \nu = hc/\lambda$$

$$p = E/c = h/\lambda$$

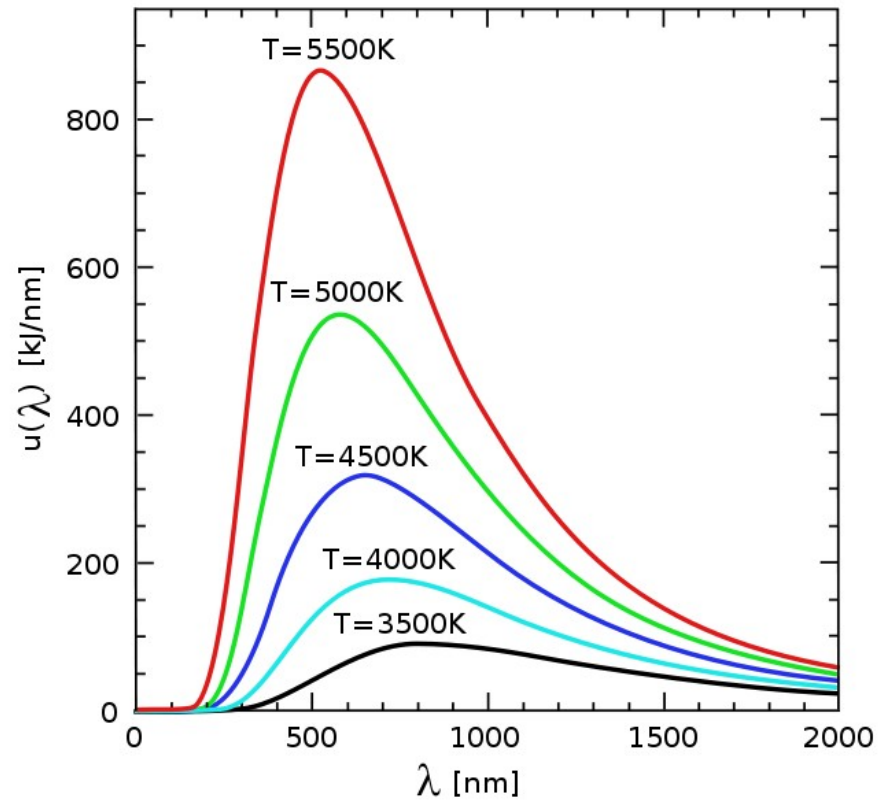
Co wynika z istnienia pędu fotonów?

Ciśnienie promieniowania.

Promieniowanie ciała doskonale czarnego

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad [\text{erg/s/Hz/sr/cm}^2] \quad B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad [\text{erg/s/cm/sr/cm}^2]$$

$$\lambda_{\max} = \frac{0.290 \text{ K cm}}{T}$$



$$\lambda_{\max} = c \nu_{\max} ???$$

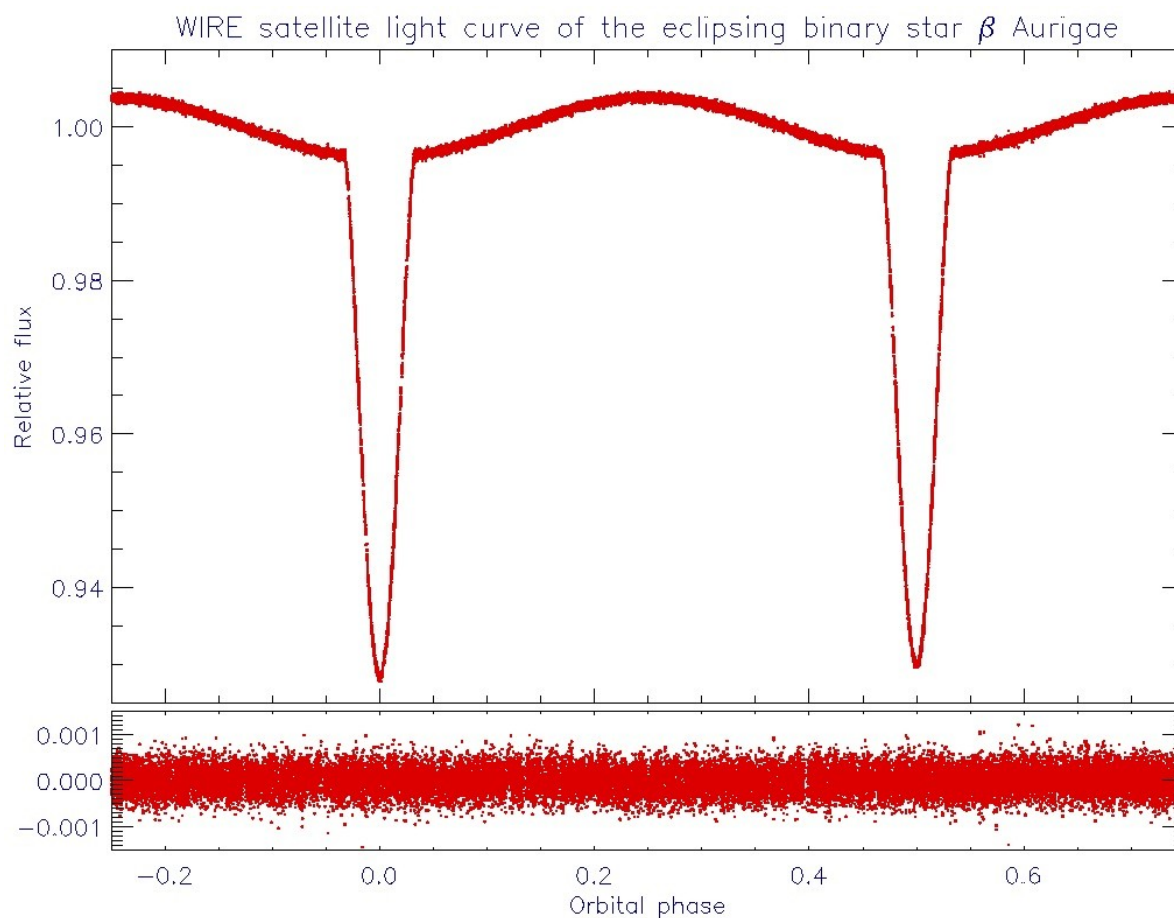
Promieniowanie ciała doskonale czarnego

$$\Phi = \int_0^{\infty} F_{\nu} d\nu = \int_0^{\infty} \pi B_{\nu} d\nu = \sigma T^4$$

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

Podstawowe obserwowane parametry gwiazd

Jasność obserwowana



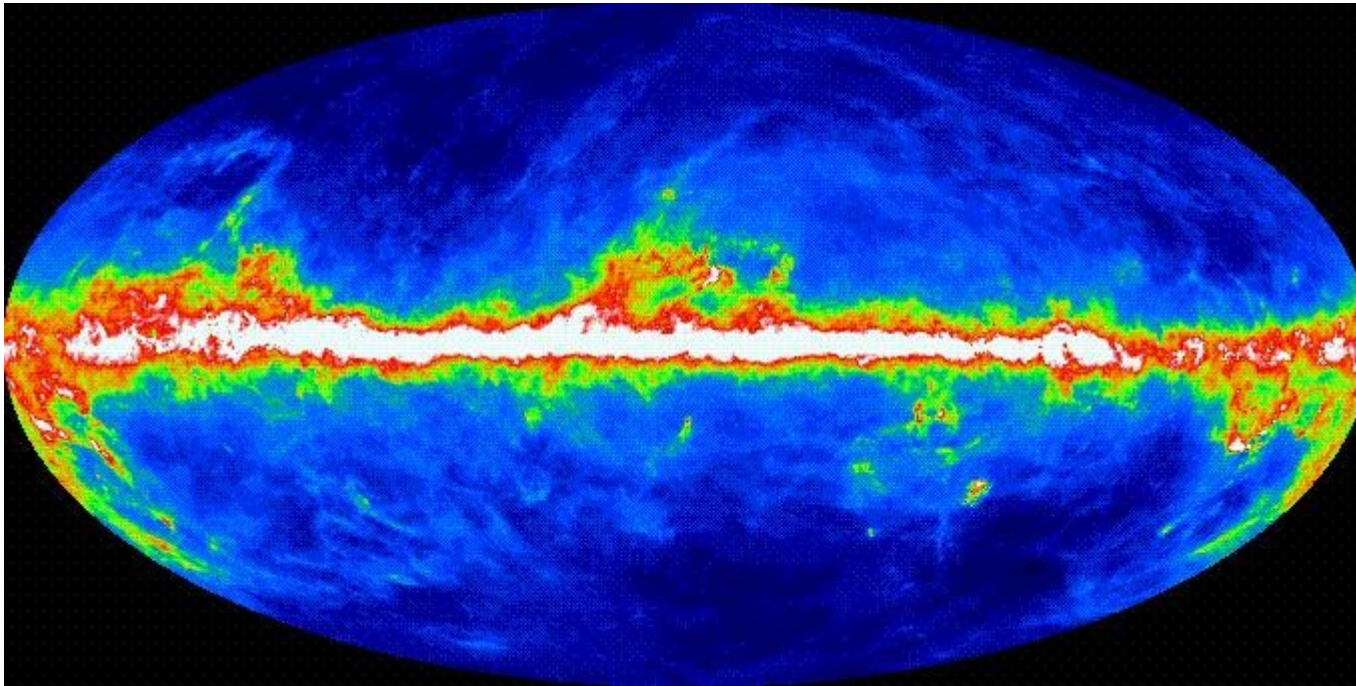
$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10} \left(\frac{I_1}{I_2} \right)$$

$$V = m_V = 0 \quad \text{dla strumienia} \quad I = 3.640 \cdot 10^{-20} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$$

Jasność absolutna

współczynnik ekstynkcji

$$m_V - M_V = 5 \log_{10}(d) - 5 + A_V$$



IRAS 100micron all-sky image

Jasność bolometryczna

$$m_{bolo} = -2.5 \log_{10} \int_0^{\infty} f_{\lambda} d\lambda + C_1$$

Stała ustalająca punkt 0 na skali wielkości gwiazdowych względem strumienia fotonów f .

Poprawka bolometryczna

$$BC_V = m_{bolo} - m_V = -2.5 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{\infty} f_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda) f_{\lambda} d\lambda} \right) + C_2$$

Przepuszczalność wybranego filtra.

Inna stała ustalająca punkt 0 na skali poprawek bolometrycznych. Zwykle ustalana w oparciu o Słońce.

$$BC_{V, Sun} = m_{bolo, Sun} - m_{V, Sun}$$

To równanie ustala punkt 0 skali BC. Niespójności obydwu definicji sięgają w praktyce ~ 0.15 mag.

Poprawki bolometryczne

$$BC_{V, sun} = od - 0.07 do - 0.21 \quad (\text{w zależności od źródła})$$

Class	Main Sequence	Giants	Supergiants
O3	-4.3	-4.2	-4.0
B0	-3.00	-2.9	-2.7
A0	-0.15	-0.24	-0.3
F0	-0.01	0.01	0.14
G0	-0.10	-0.13	-0.1
K0	-0.24	-0.42	-0.38
M0	-1.21	-1.28	-1.3
M8	-4.0		

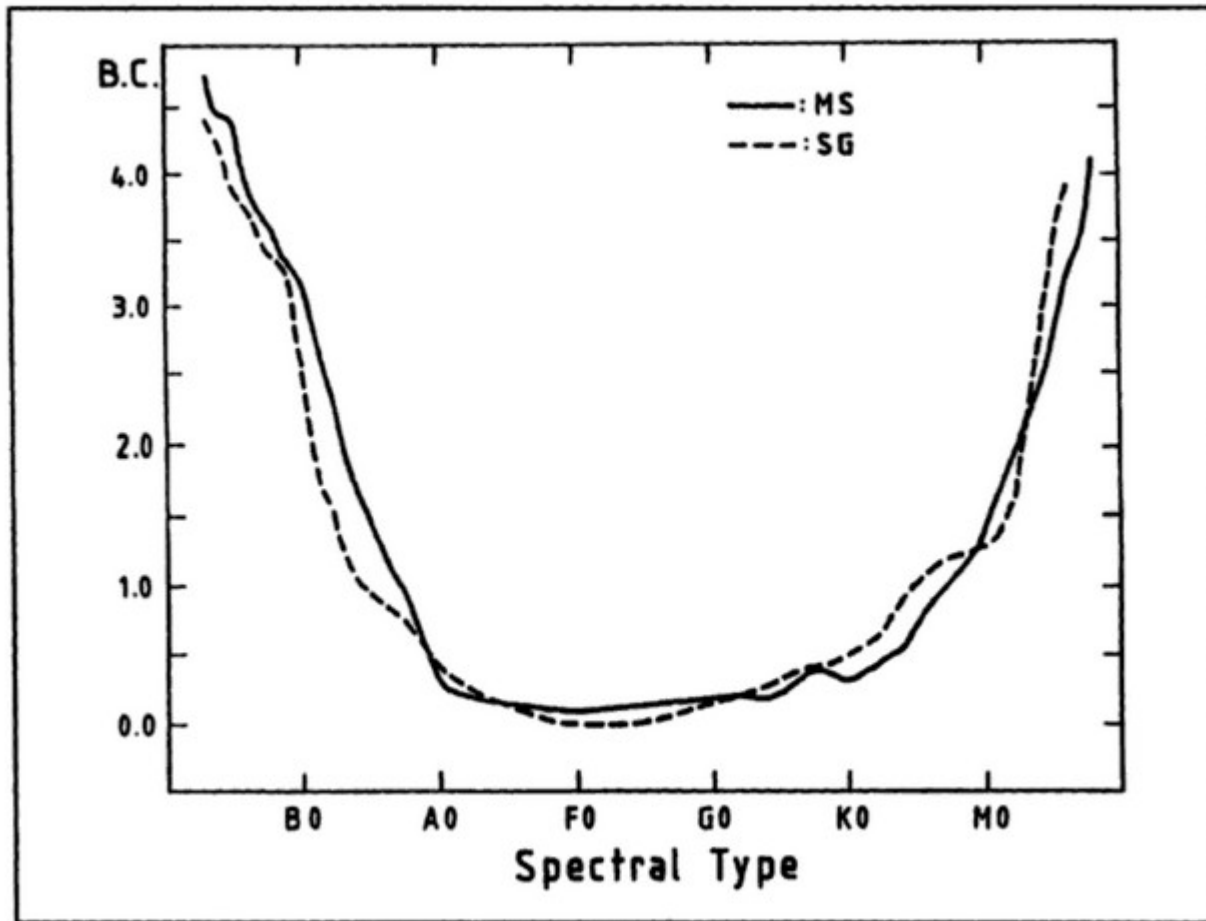
Table 1: Table of bolometric corrections for some stars. After Kaler 1997, p. 263.

$$M_{bolo} = 0 \quad \text{dla} \quad L = 3.055 \cdot 10^{28} \quad W = 3.055 \cdot 10^{35} \text{ erg/s}$$

$$M_{bolo, sun} = 4.75 \quad L_{sun} = 3.842 \cdot 10^{26} \quad W = 3.842 \cdot 10^{33} \text{ erg/s}$$

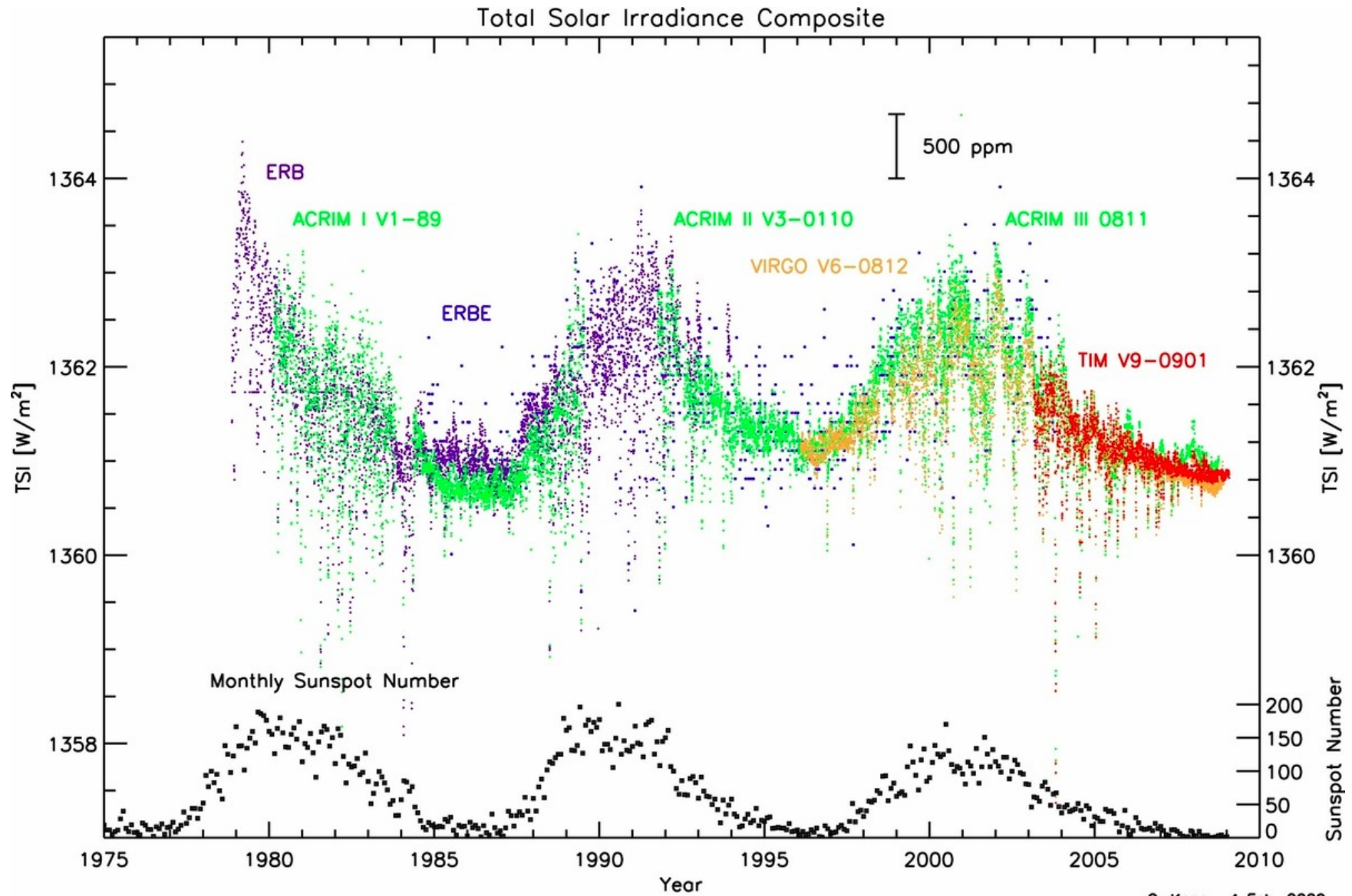
Czy dodatnie poprawki bolometryczne są poprawne?

Tak, wynikają z przyjętej poprawki dla Słońca (-0.07), podczas gdy niektóre inne gwiazdy mają ją jeszcze mniejszą.



Poprawka bolometryczna w zależności od typu widmowego dla gwiazd ciągu głównego oraz nadolbrzymów.

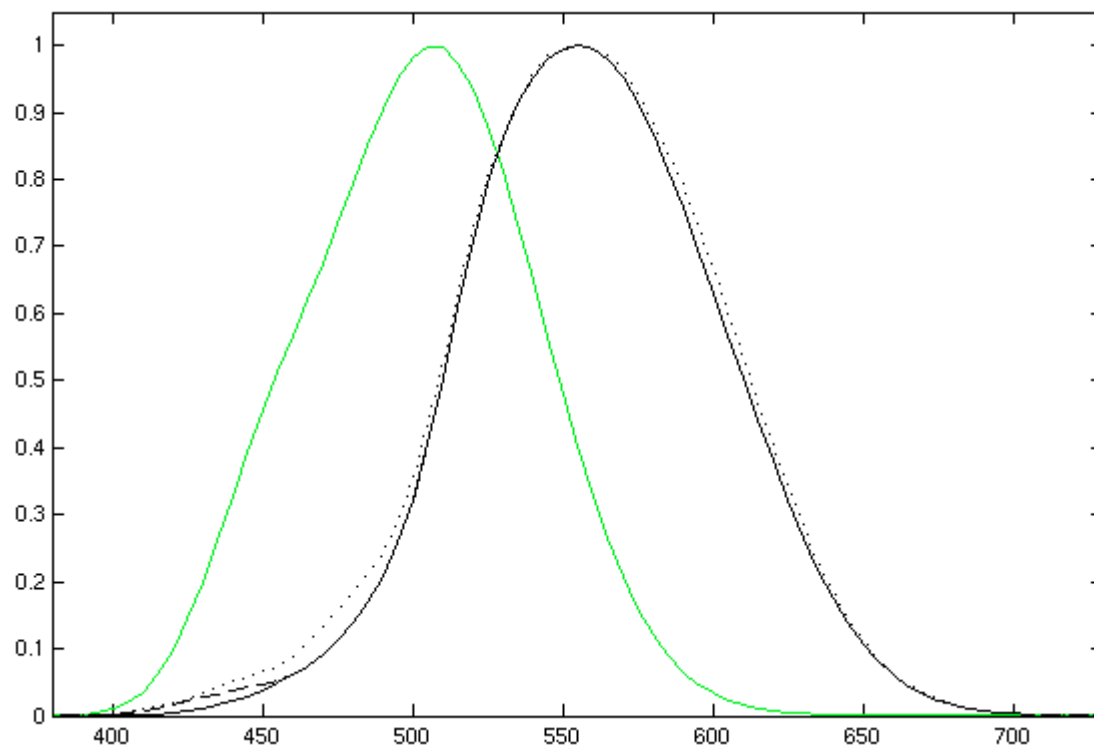
Bolometry słoneczne



Dane z obserwacji pozaatmosferycznych pokazują, że Słońce nie jest najlepszym punktem odniesienia.

Ciekawostka

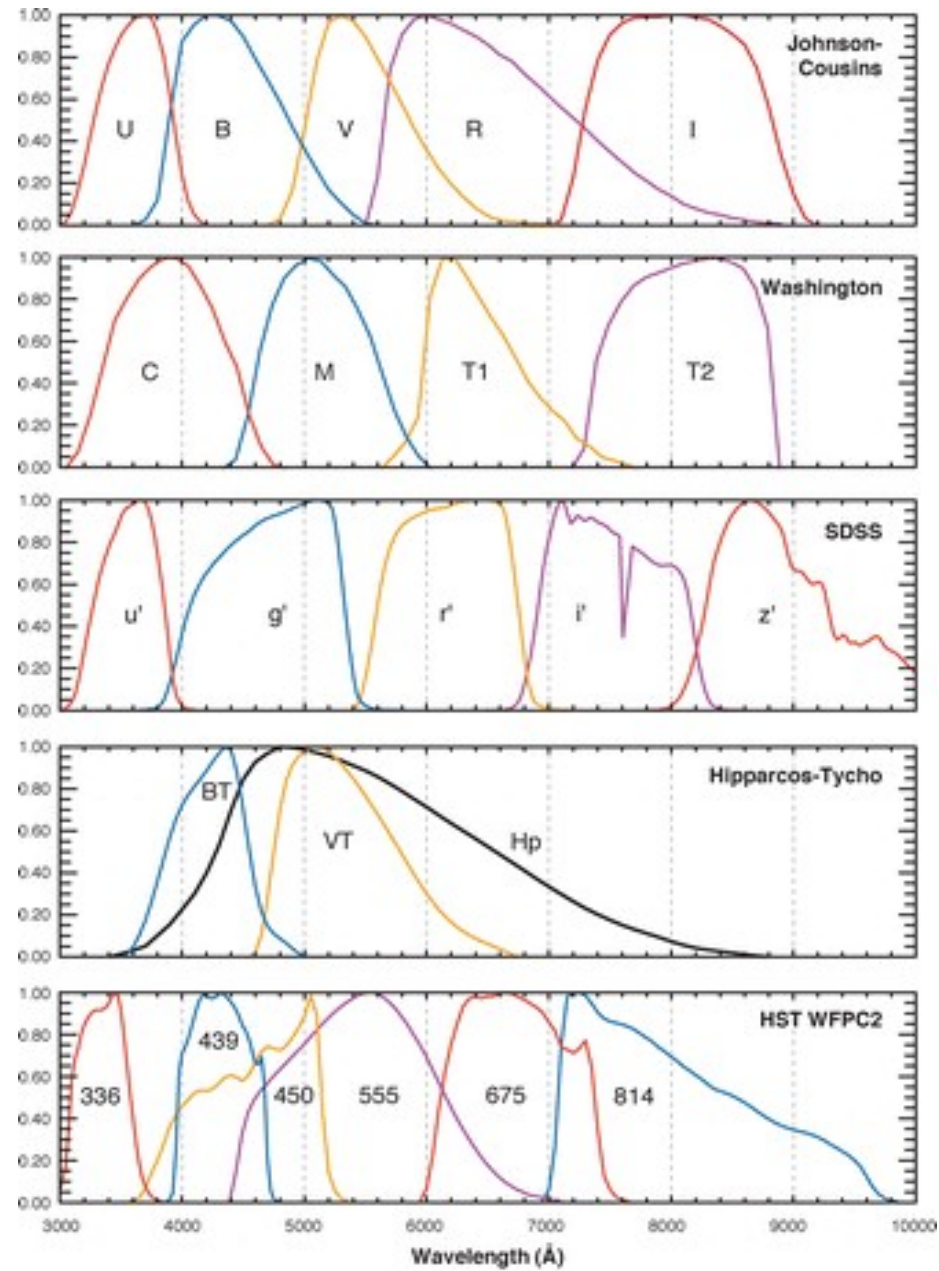
Fotometria w astronomii = fotometria w fizyce ?



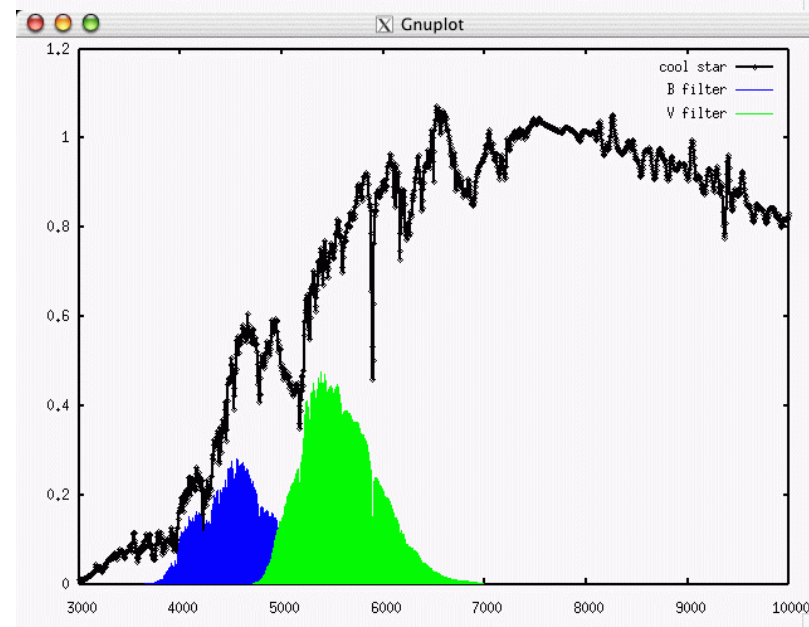
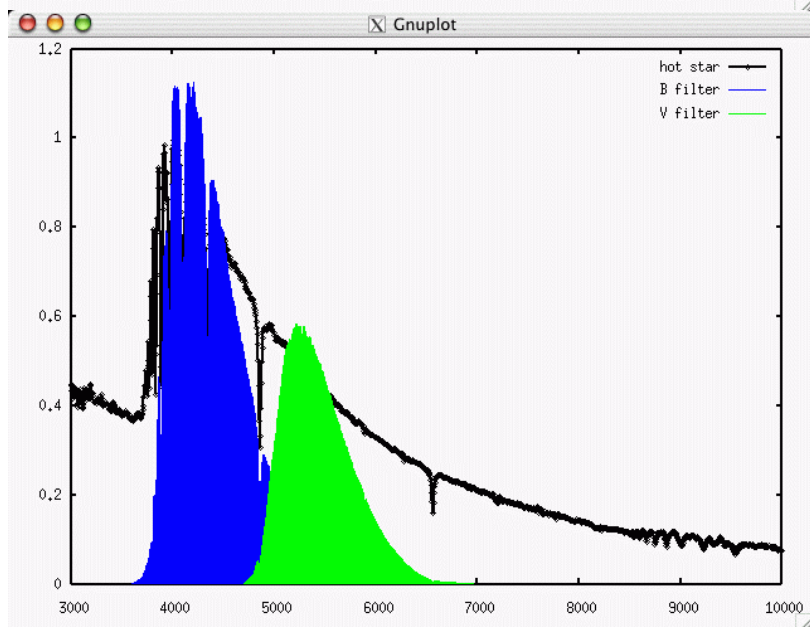
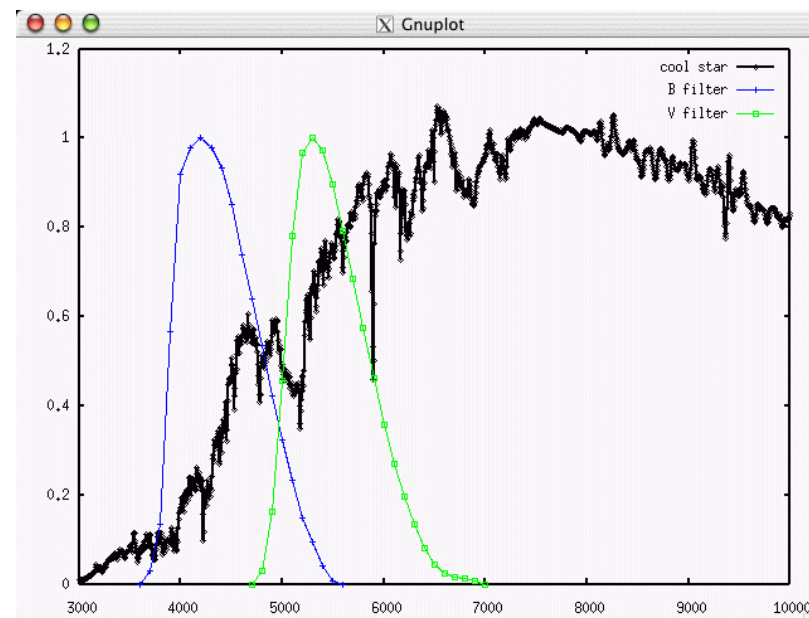
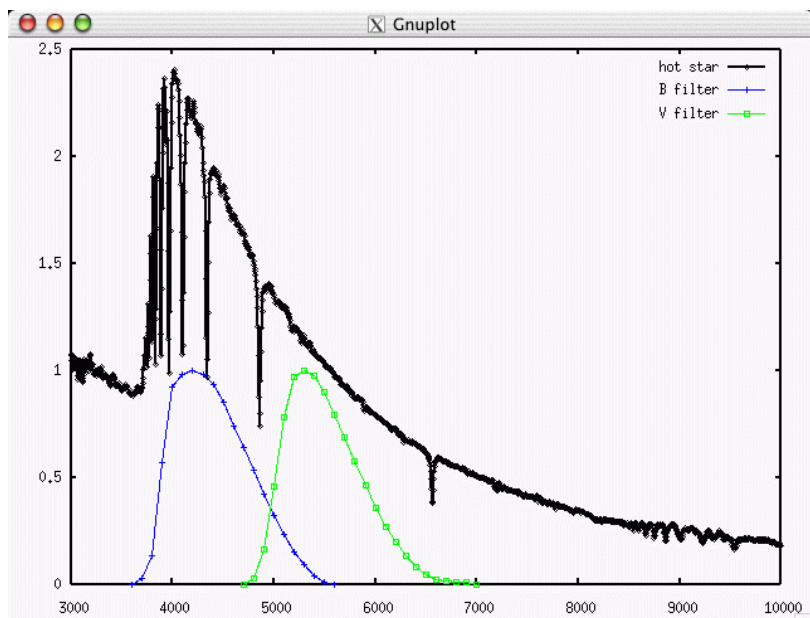
Krzywa czułości ludzkiego oka (zielona – noc).

Fotometria w astronomii = radiometria w fizyce

Wskaźnik barwy B – V

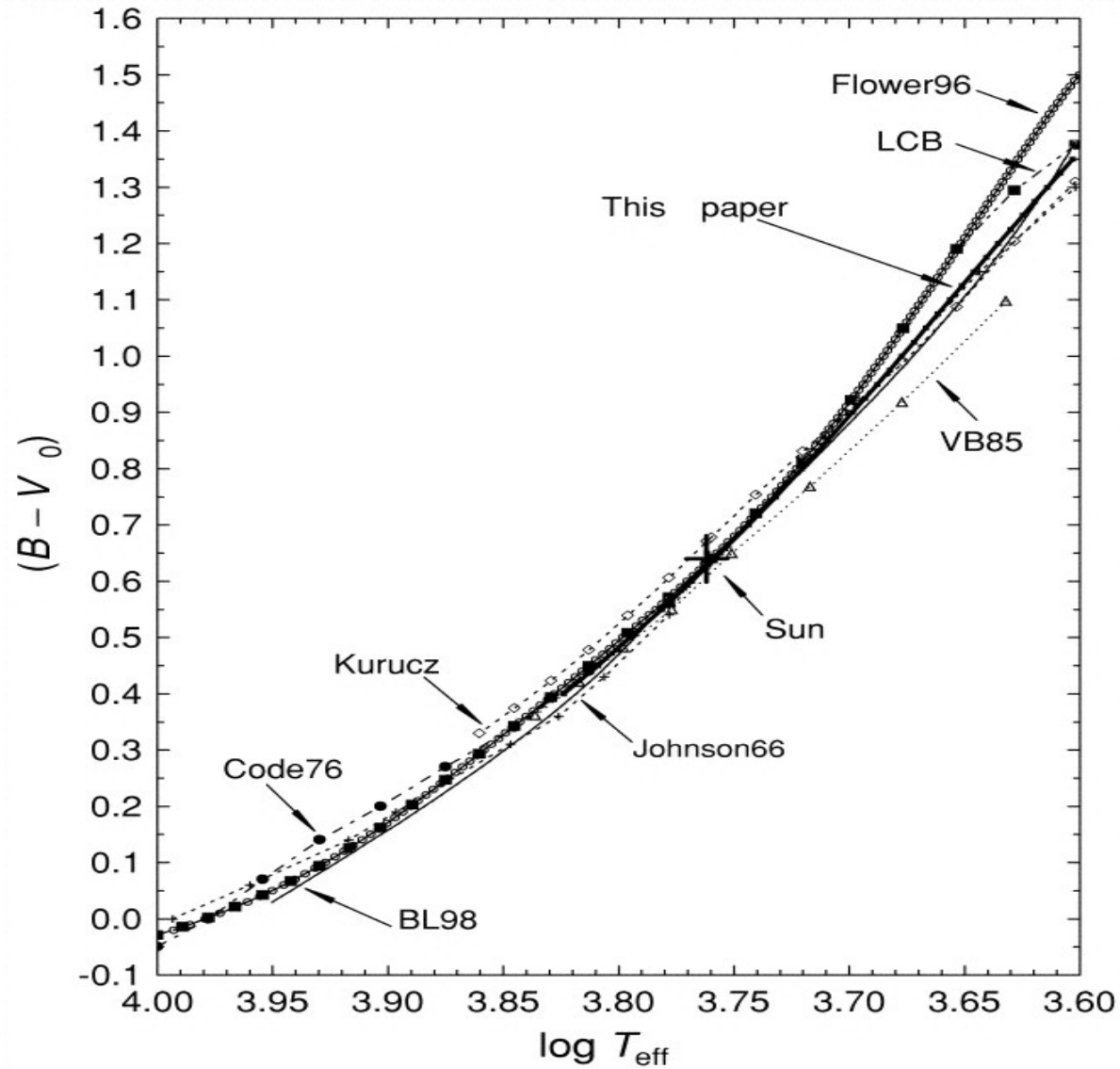


Wskaźnik barwy B – V



Jest to najprostsza forma spektroskopii gwiazdowej.

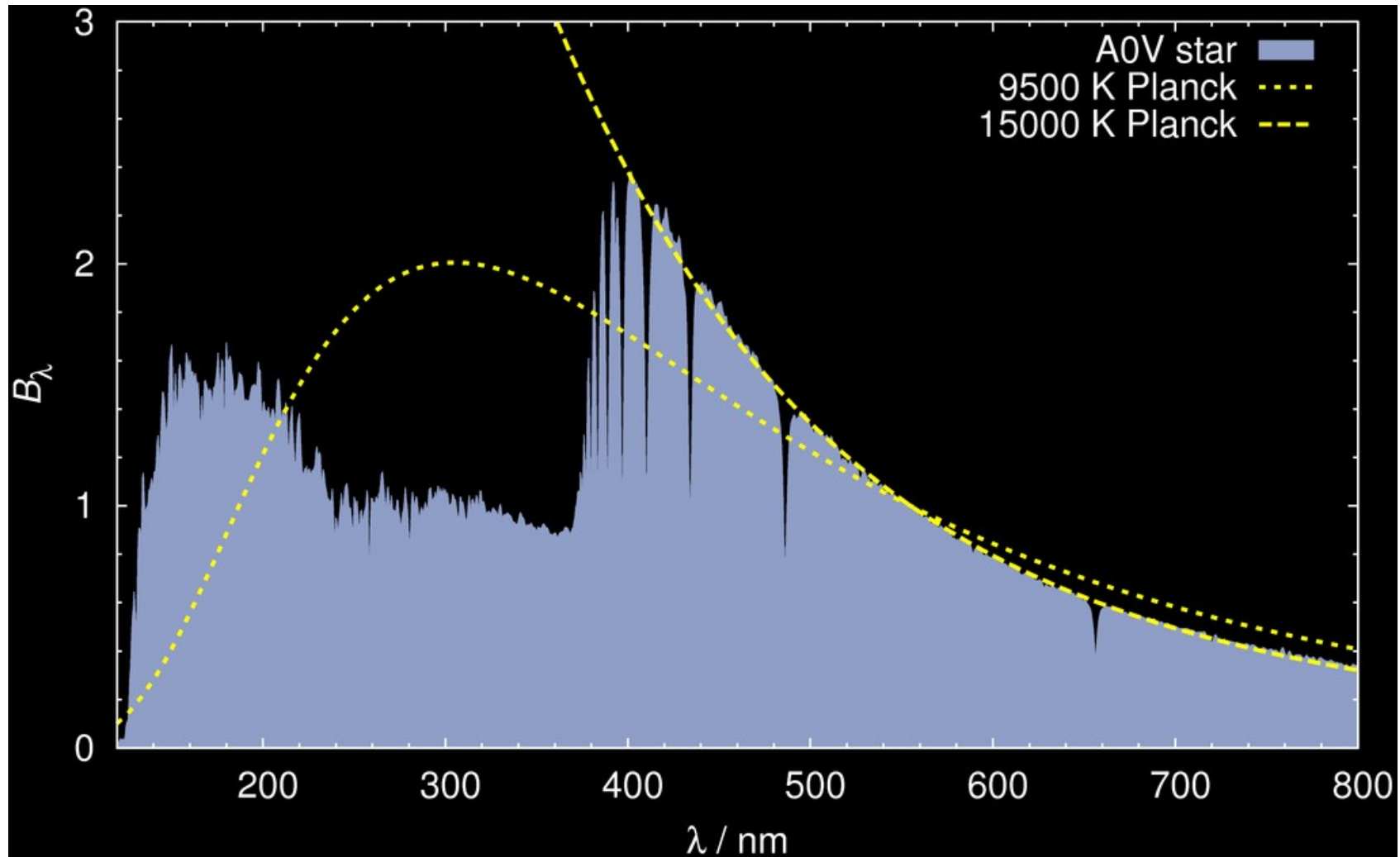
Wskaźnik barwy B – V



Temperatura barwna \neq temperatura efektywna

Od czego jeszcze poza temperaturą zależy wskaźnik barwy?

Temperatura barwna a temperatura efektywna



Temperatura barwna może się znacząco różnić od efektywnej, szczególnie jeśli jest skalibrowana w oparciu o rozkład Plancka lub widmo badanego obiektu poza badanym zakresem nie jest znane.

Ekstynkcja międzygwiazdowa

Współczynnik ekstynkcji całkowitej: $A_V [mag]$

Nadwyżka barwy: $E_{B-V} = E(B-V) = (B-V)_{observed} - (B-V)_{intrinsic} = A_B - A_V [mag]$

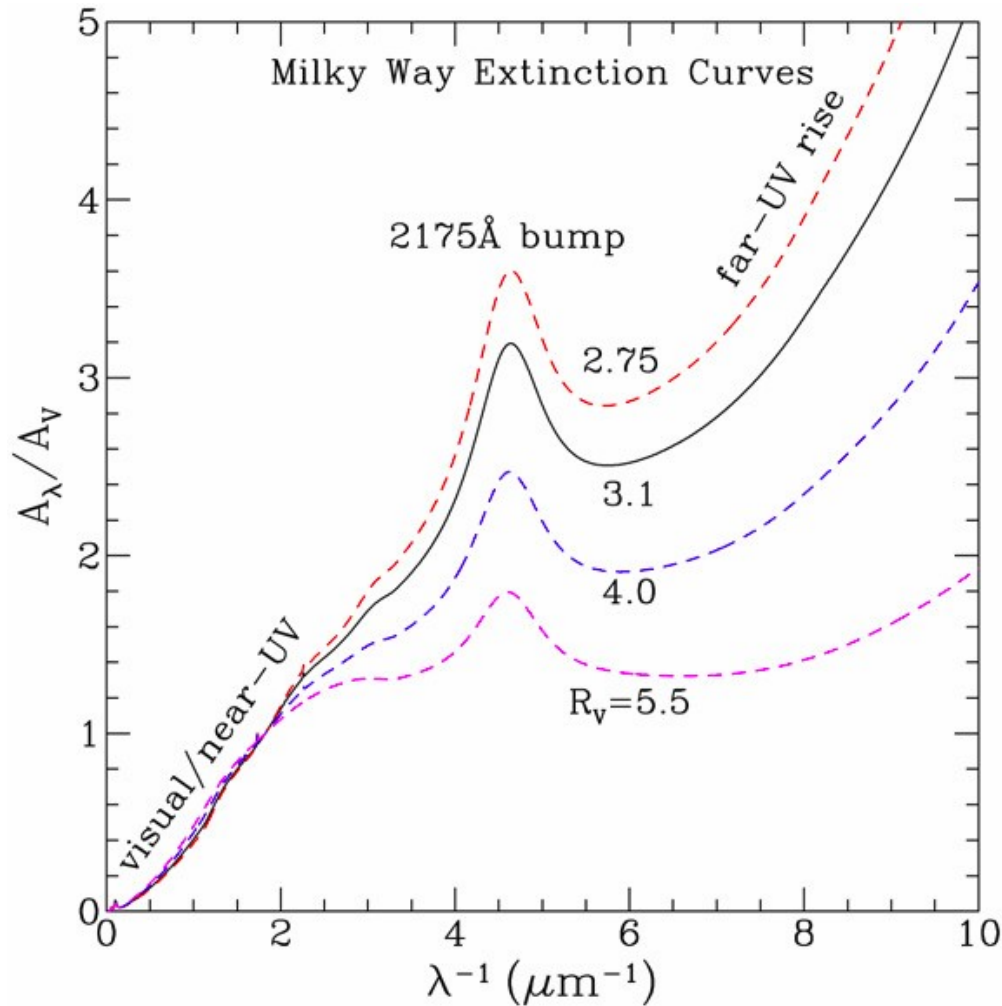
Współczynnik ekstynkcji względnej: $R_V \equiv \frac{A_V}{E_{B-V}} = \frac{A_V}{A_B - A_V}$

Względny współczynnik ekstynkcji całkowitej: A_λ / A_V

W Galaktyce ekstynkcja całkowita w filtrze V wynosi przeciętnie 0.7-1.0 mag/kpc.

Główną przyczyną jest pył międzygwiazdowy, co sprawia, że ekstynkcja zależy silnie od kierunku, ale w każdym kierunku jest podobną funkcją długości fali.

Ekstynkcja międzygwiazdowa



Kształt krzywych sugeruje:

1. Istnienie populacji dużych ziaren odpowiedzialnych za rozpraszanie w zakresie optycznym.
 $a > \lambda / 2\pi \sim 0.1 \mu\text{m}$
2. Istnienie populacji małych ziaren odpowiedzialnych za wzrost krzywej w dalekim UV
 $a < \lambda / 2\pi \sim 0.01 \mu\text{m}$

Średnia R_V dla Galaktyki:

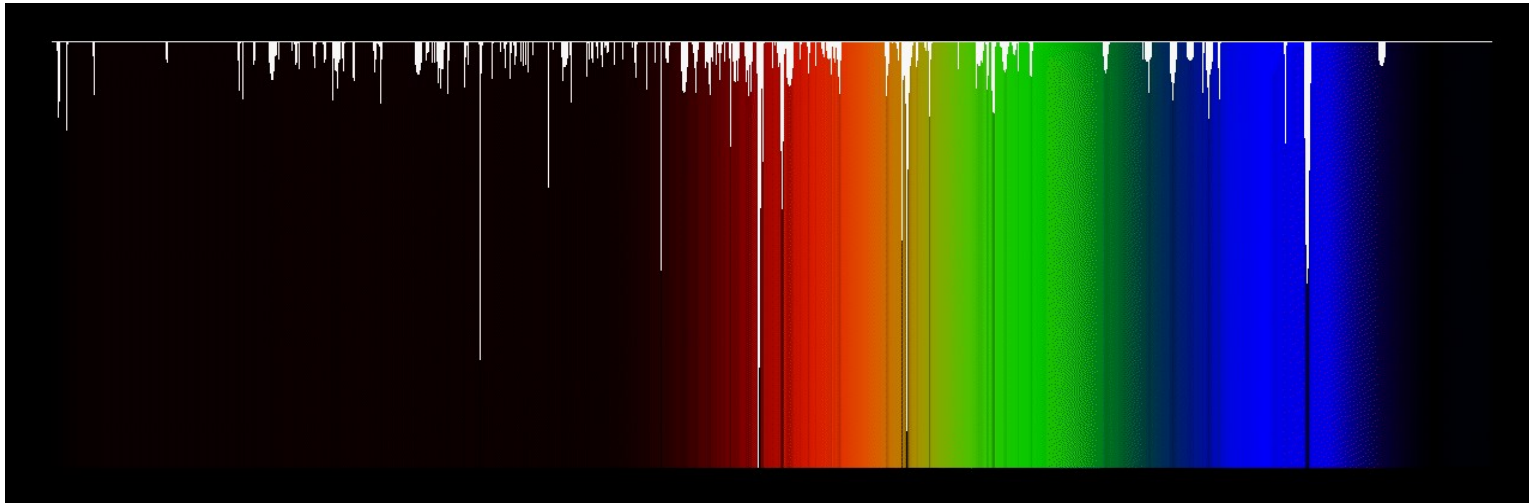
$$R_V \equiv \frac{A_V}{E_{B-V}} \simeq 3$$

Względnie stała dla Galaktyki:

$$\frac{E_{U-B}}{E_{B-V}} \simeq 0.72$$

Rozmyte linie międzygwiazdowe (DIB)

Do ekstynkcji międzygwiazdowej należą też linie widmowe materii międzygwiazdowej.

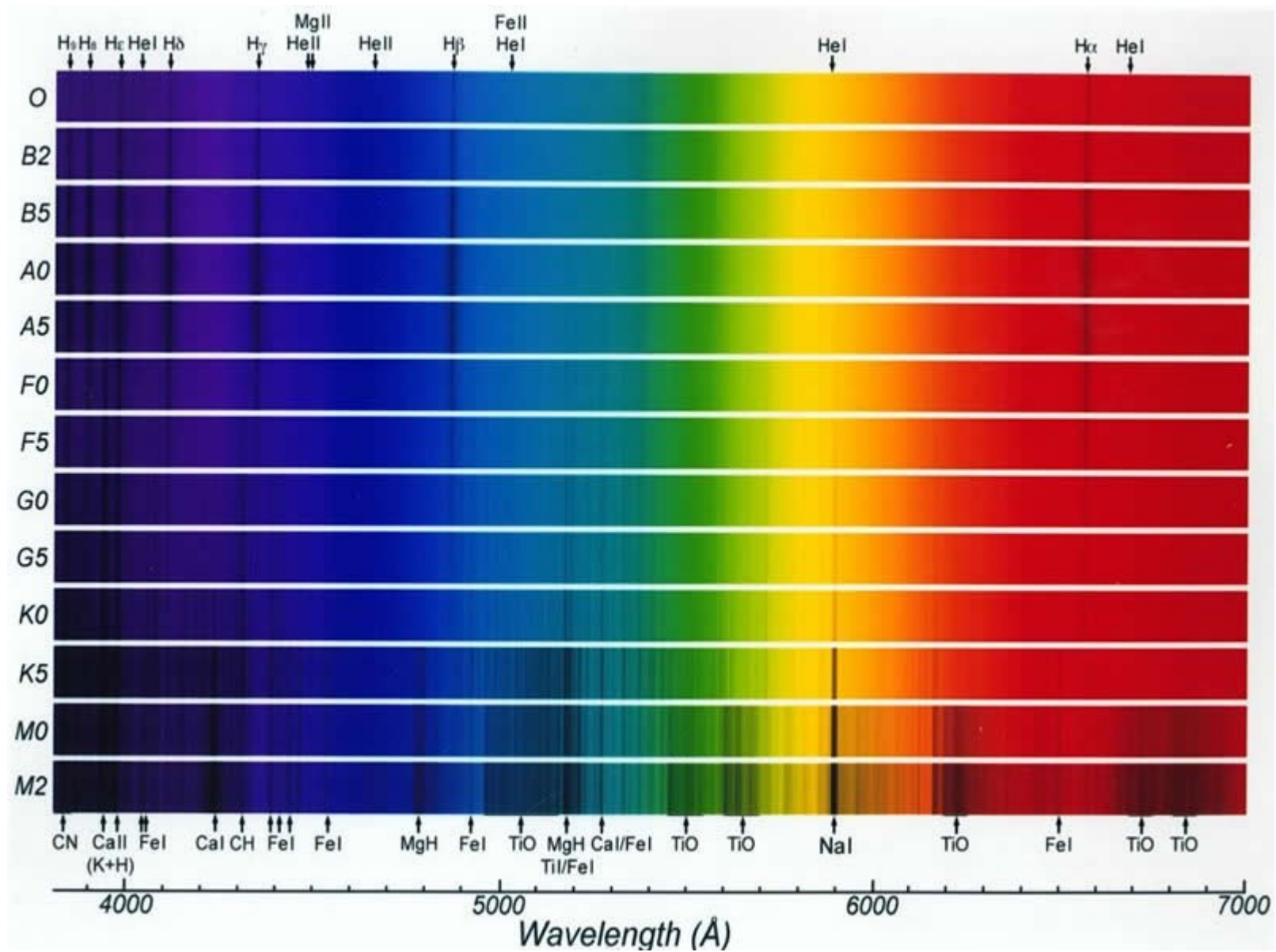


Odkryte w 1919 roku przez Mary Lea Heger,
i przez prawie 100 lat nie zidentyfikowano jednoznacznie ANI JEDNEJ LINII!!!
Prawdopodobnie związane ze złożonymi molekułami węgla.

Jon fulerenu C_{60}^+ został potwierdzony jako źródło dwóch linii DIB
(Campbell i in. 2015) 9577 i 9632 Å. Wygenerowane laboratoryjnie linie
w temperaturze 4.8K mają tę samą długość i szerokość połówkową.



Typ widmowy



Typy wczesne i późne?

Wczesne: O, B, (A), późne: (G), K, M

Typ widmowy

Inne typy widmowe:

WR – gwiazdy Wolfa-Rayeta

L – karły chłodniejsze niż karły typu M

T – brązowe karły o temperaturach powierzchniowych 700-1300K,
silne linie metanu

Y – brązowy podkarzeł, o masie poniżej $13 M_{\text{Jowisza}}$

D – biały karzeł (DA, DB, DO, DQ, DZ, DC, DX)

C – gwiazda węglowa (zwykle czerwony olbrzym)

R,N,S – gwiazdy AGB, które przypominają typy K i M ale wzbogacone
o produkty późnych etapów ewolucji (metale)

Typ widmowy

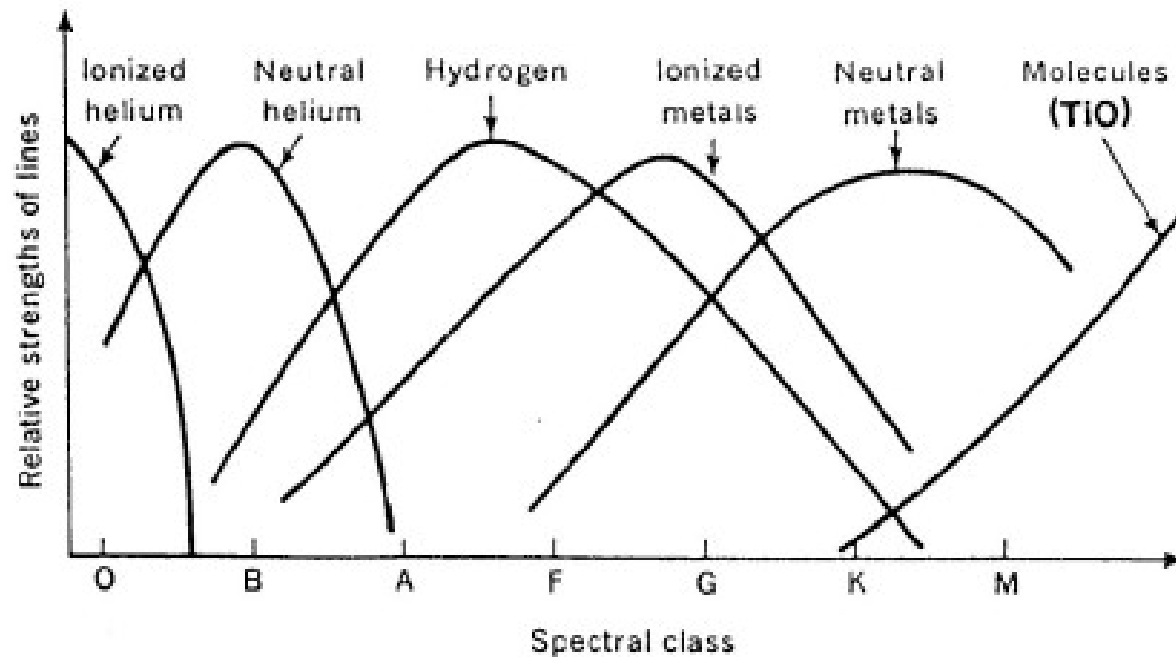
Peculiarity Code	Description
comp	composite spectrum
e	emission lines present
f	NIII and HeII emission (O stars)
m	enhanced metal features
n	broad absorption features
nn	very broad absorption features
neb	nebular features present
p	other peculiarity
s	very narrow absorption lines
sh	shell star (gam Cas variable)
var	variable spectral features
wl	weak features
:	uncertainty

Linie widmowe

Natężenie linii

Zależy od ilości atomów na odpowiednim poziomie jonizacji (populacja stanu) oraz prawdopodobieństwa absorpcji fotonu (reguły wyboru).

Procent i poziom zjonizowania atomów zależy głównie od temperatury.



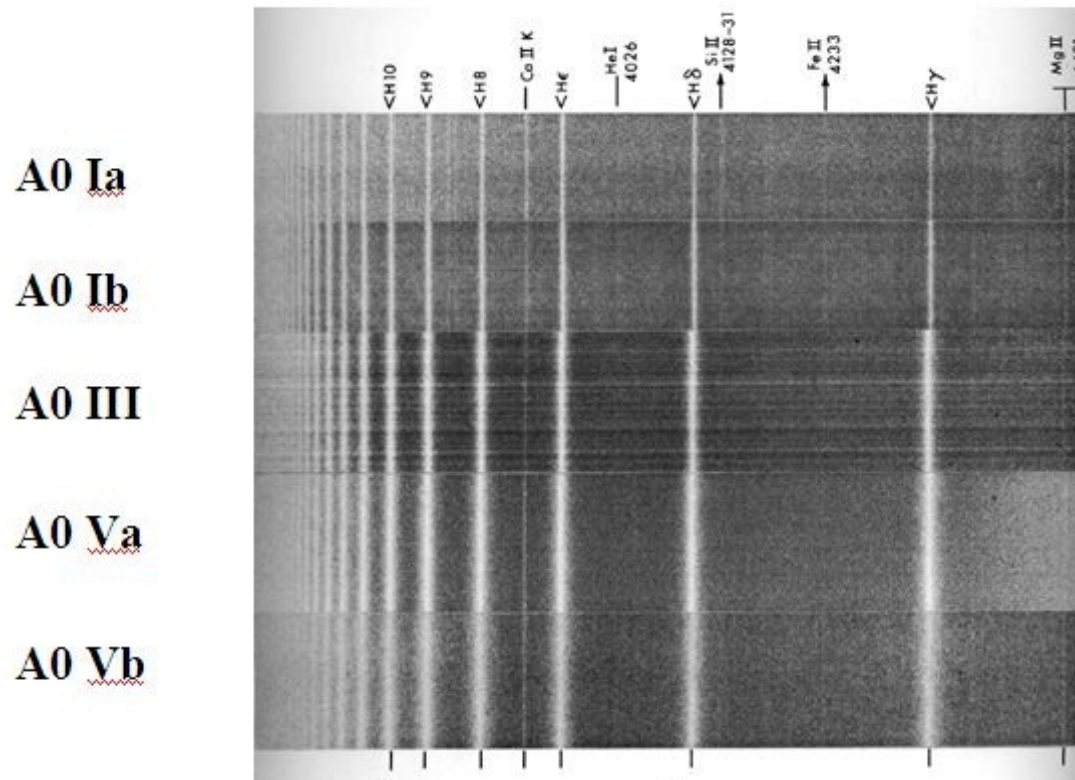
Klasa jasności

Szerokość linii

Zależy od szerokości naturalnej + poszerzenia.

Poszerzenie linii następuje głównie ze względu na ruchy dopplerowskie oraz oddziaływanie z sąsiednimi atomami.

Oddziaływania z sąsiednimi atomami zależą od gęstości, która rośnie wraz z $\log(g)$ i ciśnieniem.



Gdzie
jest
wyższe
ciśnienie
i $\log(g)$?

Przesunięcie linii widmowych

Efekt Dopplera:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c}$$

Poczerwienienie grawitacyjne:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{GM}{Rc^2}$$

Efekt Zeemana:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{e}{4\pi c^2 m_e} g_{12} \lambda B$$

Metaliczność Z

A. Ułamek masy całej gwiazdy

$$X \equiv \frac{m_H}{M}$$

$$Y \equiv \frac{m_{He}}{M}$$

$$Z \equiv \sum_{i>He} \frac{m_i}{M} = 1 - X - Y$$

$$X_{Sun} = 0.73$$

$$Y_{Sun} = 0.25$$

$$Z_{Sun} = 0.02$$

B. Zawartość M(etali) w stosunku do H w porównaniu do Słońca

$$[M/H] = \log_{10} \left(\frac{N_{Met}}{N_H} \right) - \log_{10} \left(\frac{N_{Met, Sun}}{N_{H, Sun}} \right) = \log_{10} \left(\frac{N_{Met} / N_H}{N_{Met, Sun} / N_{H, Sun}} \right)$$

$$[M/H] = \log_{10} \left(\frac{Z/X}{Z_{Sun}/X_{Sun}} \right)$$

ilość na jedn. obj.!!!

Metaliczność Z

C. Zawartość Fe w stosunku do H w porównaniu do Słońca

$$[Fe/H] = \log_{10} \left(\frac{N_{Fe}}{N_H} \right) - \log_{10} \left(\frac{N_{Fe, Sun}}{N_{H, Sun}} \right) = \log_{10} \left(\frac{N_{Fe}/N_H}{N_{Fe, Sun}/N_{H, Sun}} \right)$$

$$\log_{10} (N_{Fe, Sun}/N_{H, Sun}) = -4.3$$

$$-4.5 < [Fe/H] < 1$$

Powiązanie [Fe/H] i [M/H]:

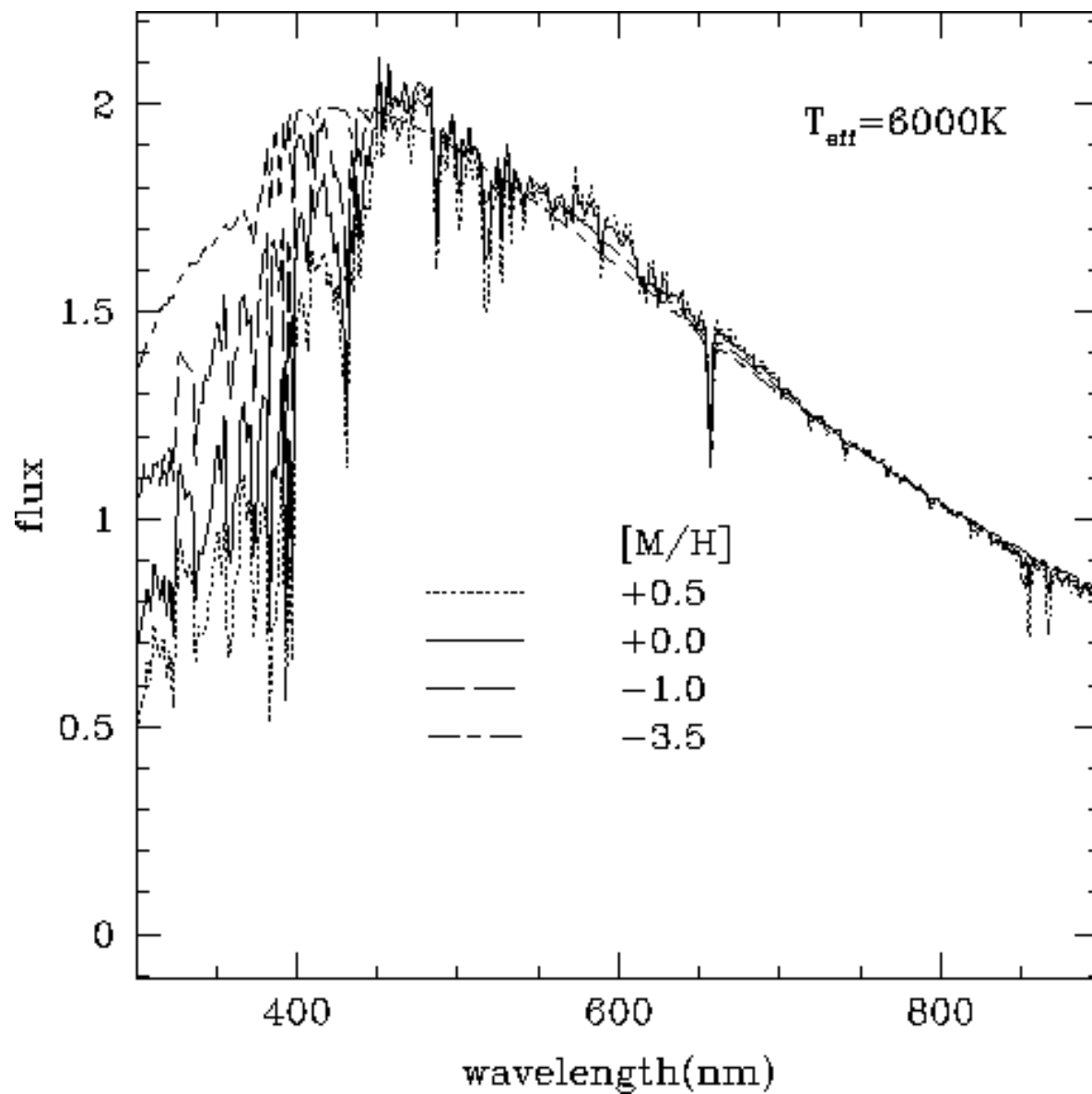
$$[M/H] = (0.9 - 1.0) \cdot [Fe/H]$$

$$(0.9 - 1.0) \cdot [Fe/H] = \log_{10} \left(\frac{Z/X}{Z_{Sun}/X_{Sun}} \right)$$

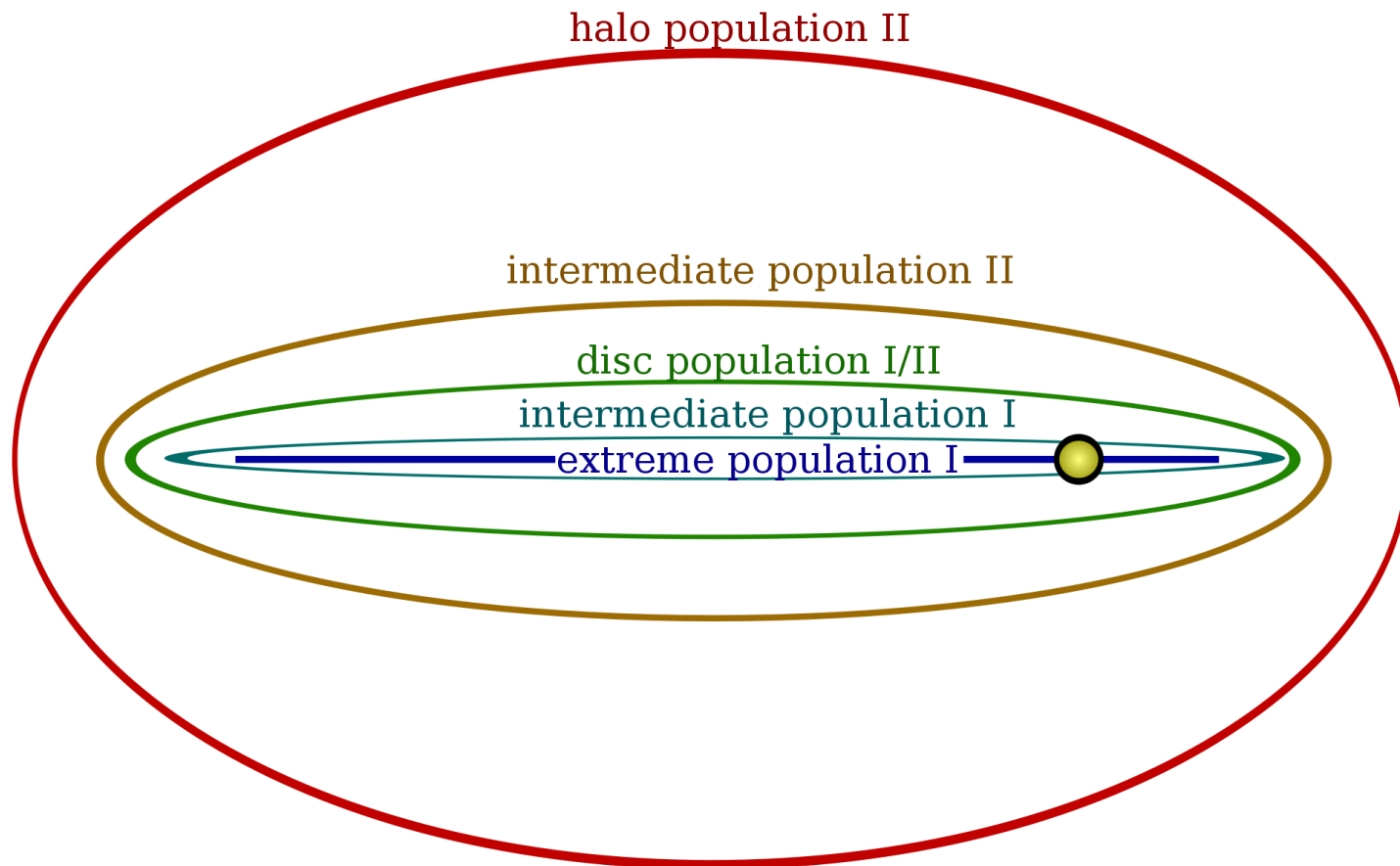
Ile wynosi [Fe/H] dla Z=0?

Rekordowo uboga w metal gwiazda ma: $X_{Fe} = 4 \cdot 10^{-6} X_{Fe, Sun}$

Metaliczność



Populacje gwiazdowe



Rozkład populacji gwiazdowych w Galaktyce.

Populacja I: $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$

Populacja II: $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$

Populacja III: $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -6$

Podstawowe fizyczne parametry gwiazd

Masa

Metaliczność

Prędkość rotacji

Promień

Temperatura efektywna

Dzielność promieniowania L

Wiek

Które dwa parametry są najważniejsze dla budowy i ewolucji gwiazd?

Początkowa masa oraz początkowy skład chemiczny.

Jak możemy je zmierzyć?

Atmosfera gwiazdowa zwykle zawiera początkowy skład chemiczny.

Masę możemy wyznaczyć z układów podwójnych lub pulsacji gwiazd.

Podstawowe parametry Słońca

Jak oszacować masę Słońca?

$$F = ma = m \frac{v^2}{r}$$

$$F = G \frac{M m}{r^2}$$

Pomijając ruch Słońca wokół wspólnego środka masy otrzymujemy:

$$v^2 r = G M$$

$$r = 1 \text{ AU} = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$$

$$v = \frac{2 \pi r}{P} = \frac{9.4 \cdot 10^{11}}{3.1 \cdot 10^7} = 3.0 \cdot 10^4 \text{ m/s}$$

$$M = 2.0 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

Podstawowe parametry Słońca

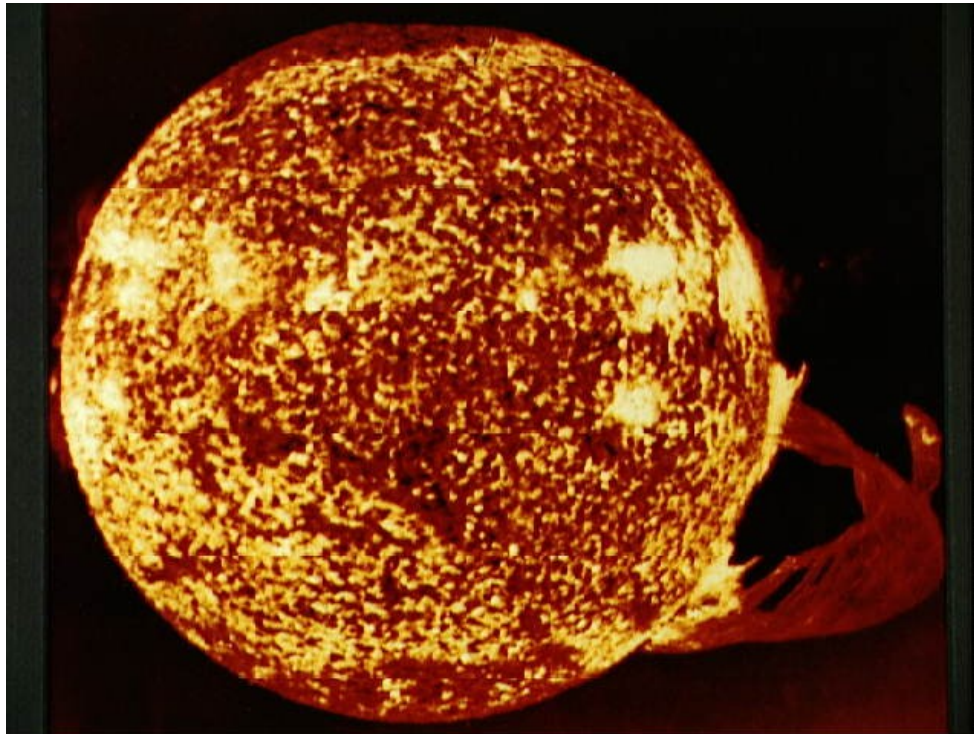
$$T_{eff} = 5780 \text{ K}$$

$$T_{centr} = 1.4 \cdot 10^7 \text{ K}$$

$$M = 2.0 \cdot 10^{33} \text{ g}$$

$$R = 7.0 \cdot 10^{10} \text{ cm}$$

$$\text{Stała słoneczna} = 1.366 \cdot 10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



Historyczne pomiary odległości



Christiaan Huygens (1626-1695)



Isaac Newton (1642-1727)

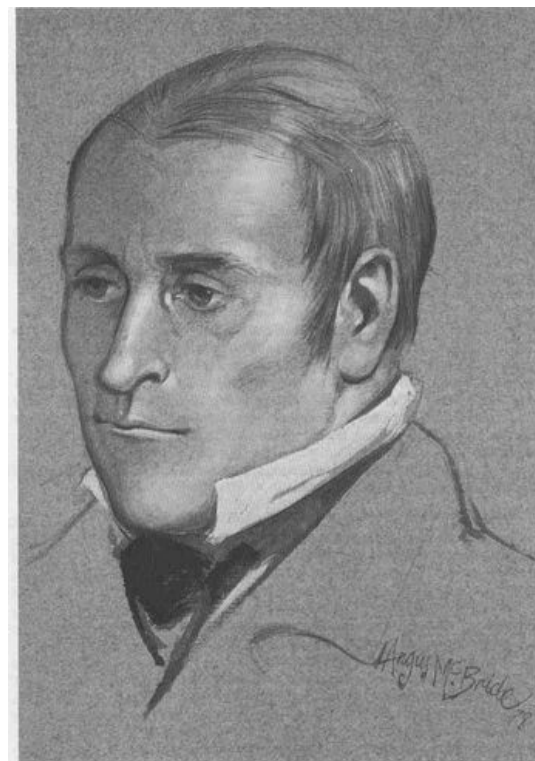
Historyczne pomiary odległości



Friedrich Georg Wilhelm von Struve
(1793 – 1864)
Vega

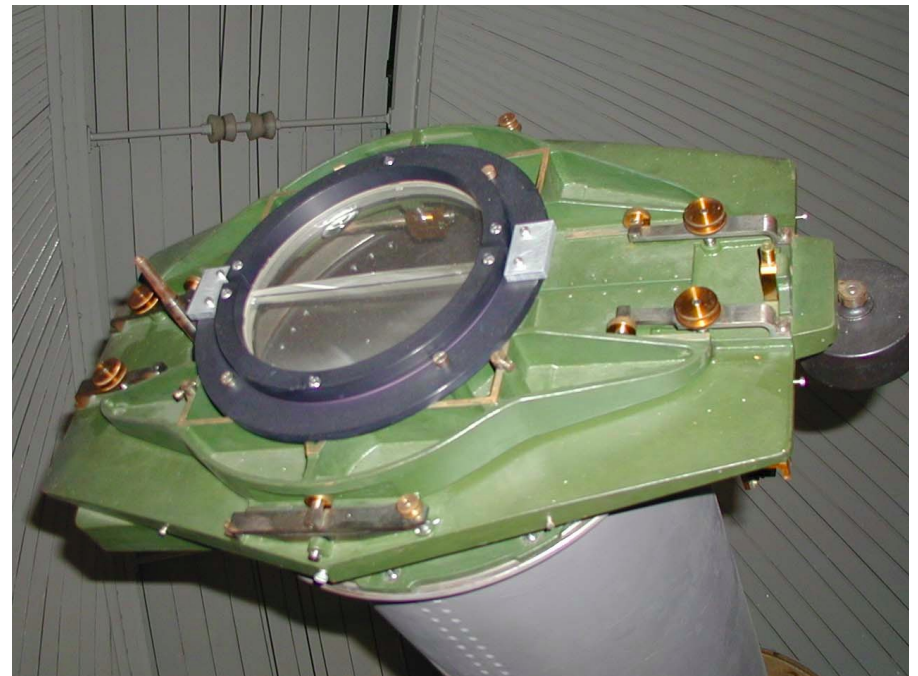
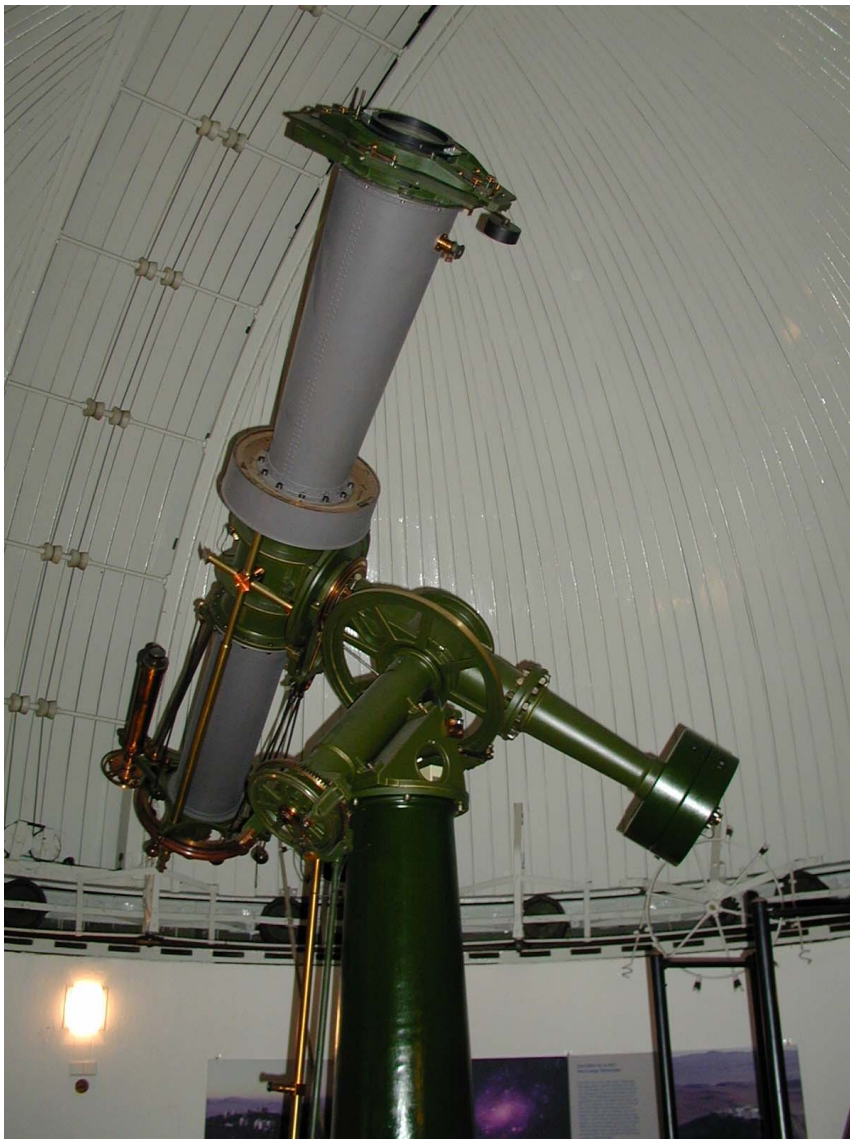


Friedrich Wilhelm Bessel
(1784 – 1846)
61 Cyg



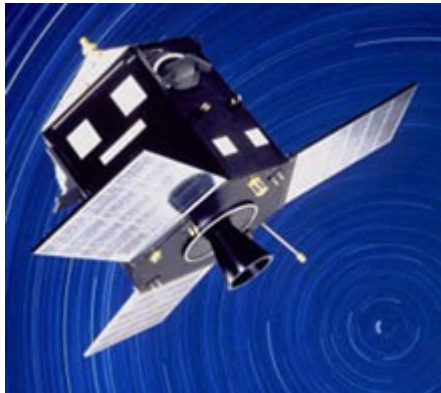
Thomas James Alan Henderson
(1798 – 1844)
 α Cen

Historyczne pomiary odległości

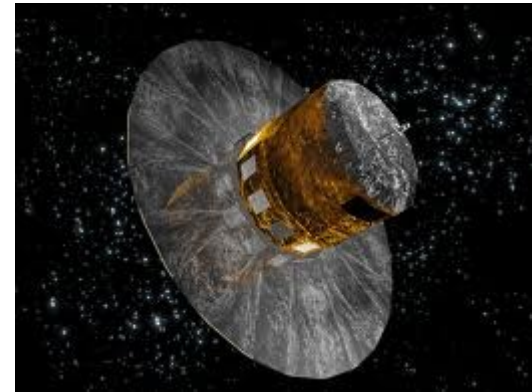


Heliometr w Obserwatorium Wiedeńskim

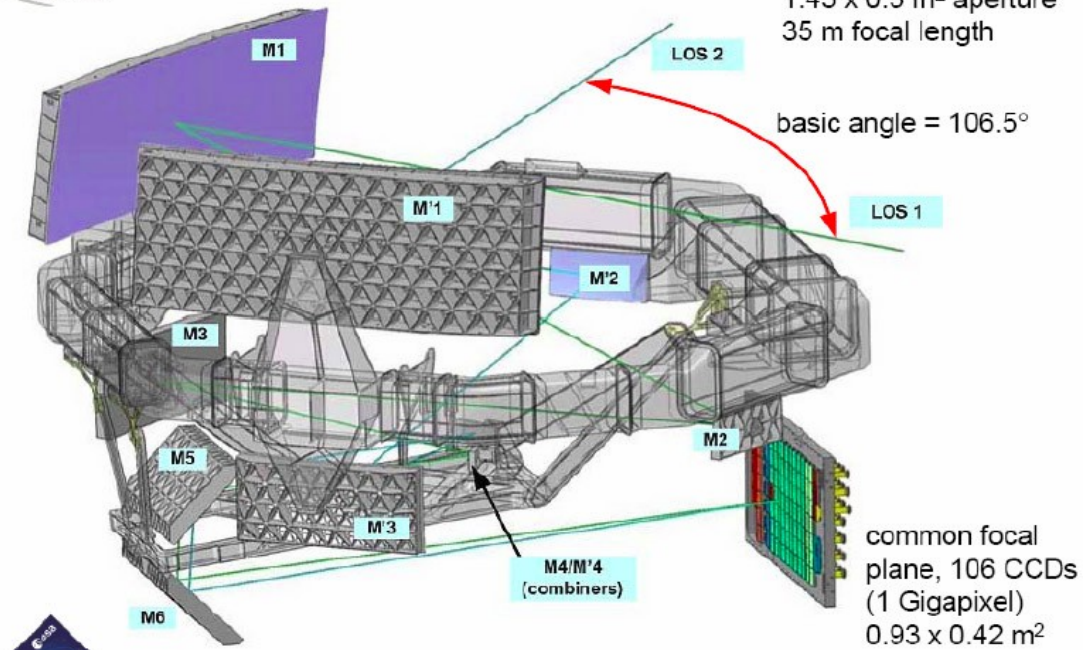
Współczesne pomiary odległości



Hipparcos (1989-93)



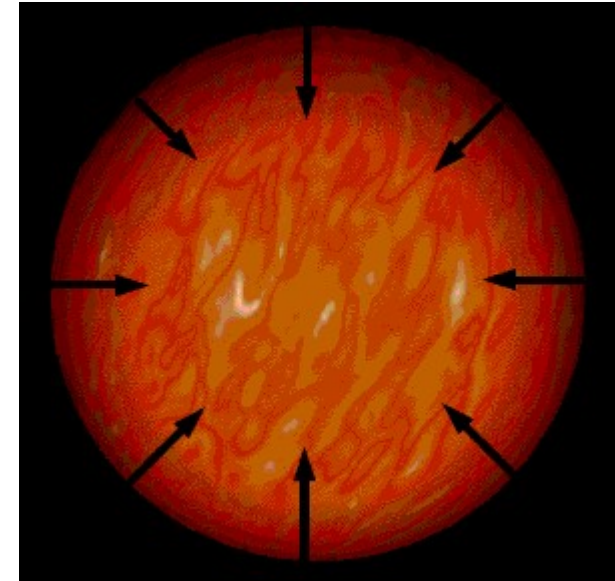
GAIA (2013-??)



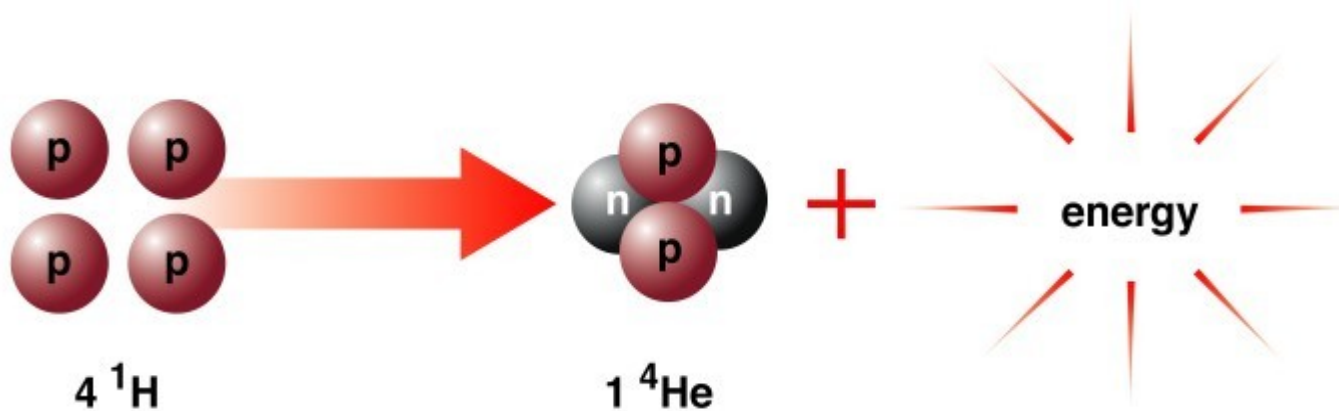
Źródło energii gwiazd



Wiek skały szacowany na 3.9 mld lat.
AMNH NJ, USA



Teoria Kelvina-Helmholtza.



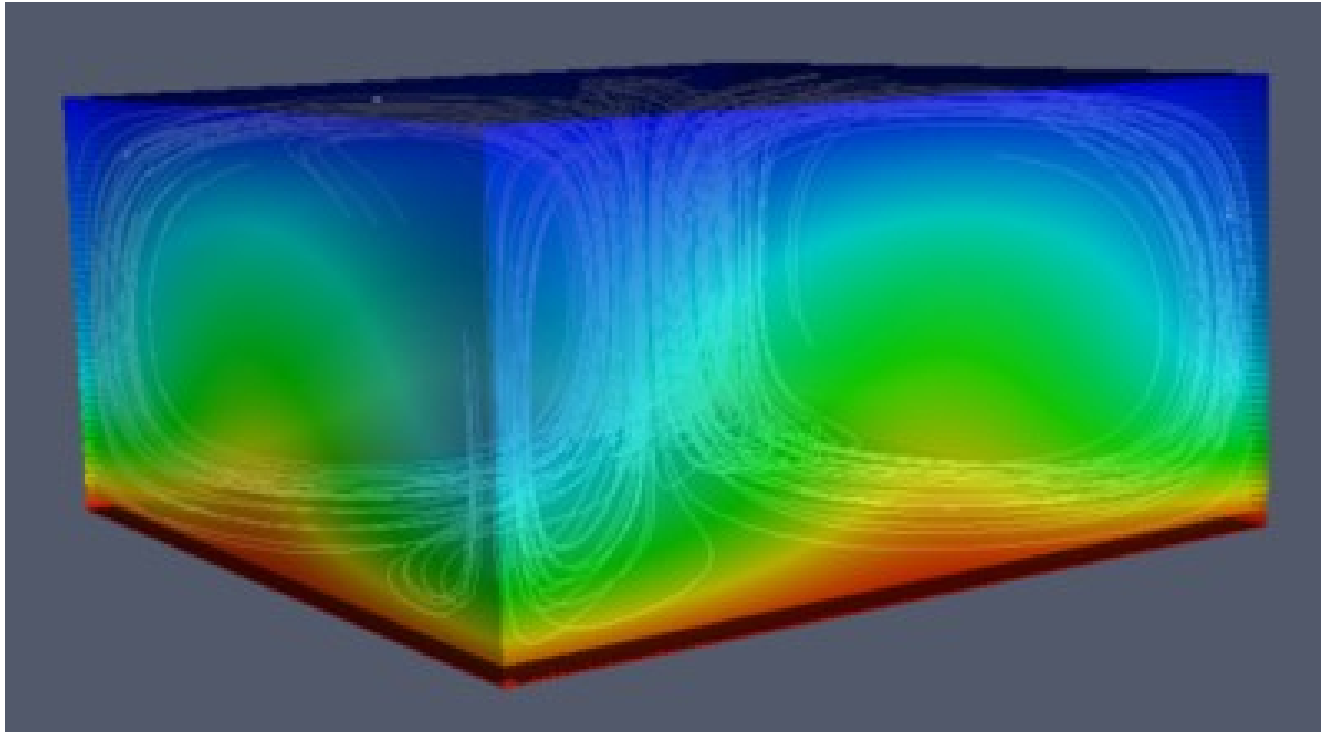
Fuzja termojądrowa.

Transport energii w gwiazdach

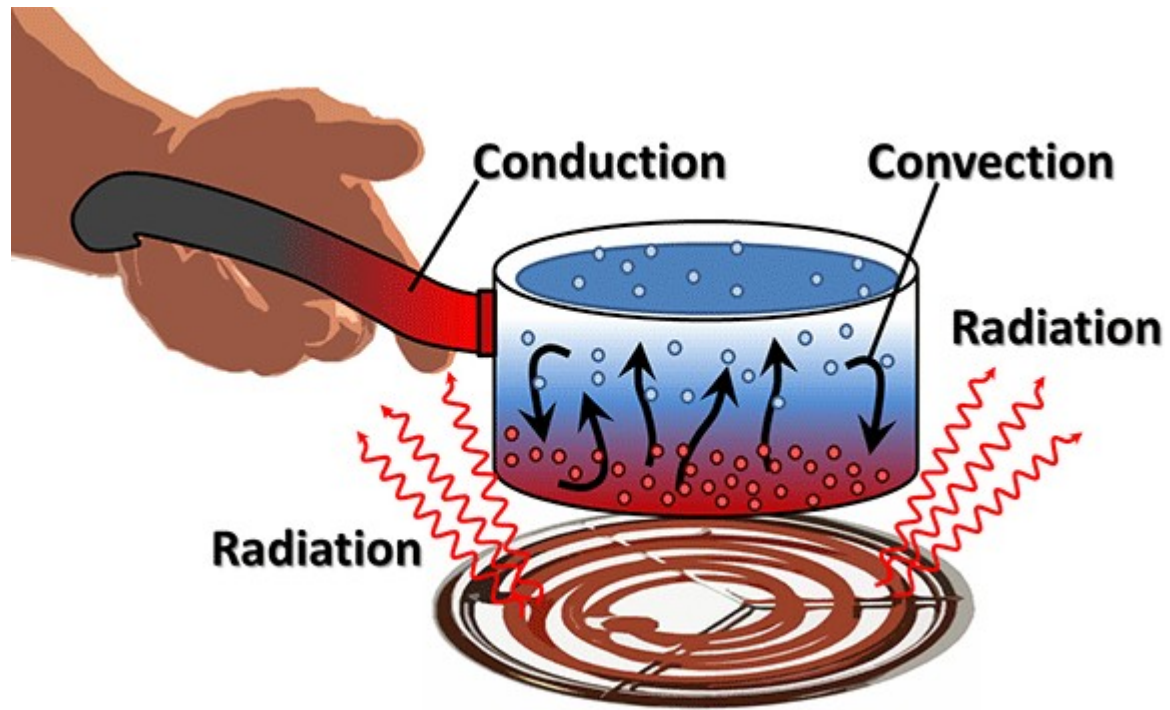
Promieniowanie

Konwekcja

Przewodnictwo cieplne



Transport energii



Konwekcja

Animacje

Trzy główne obszary we wnętrzu Słońca

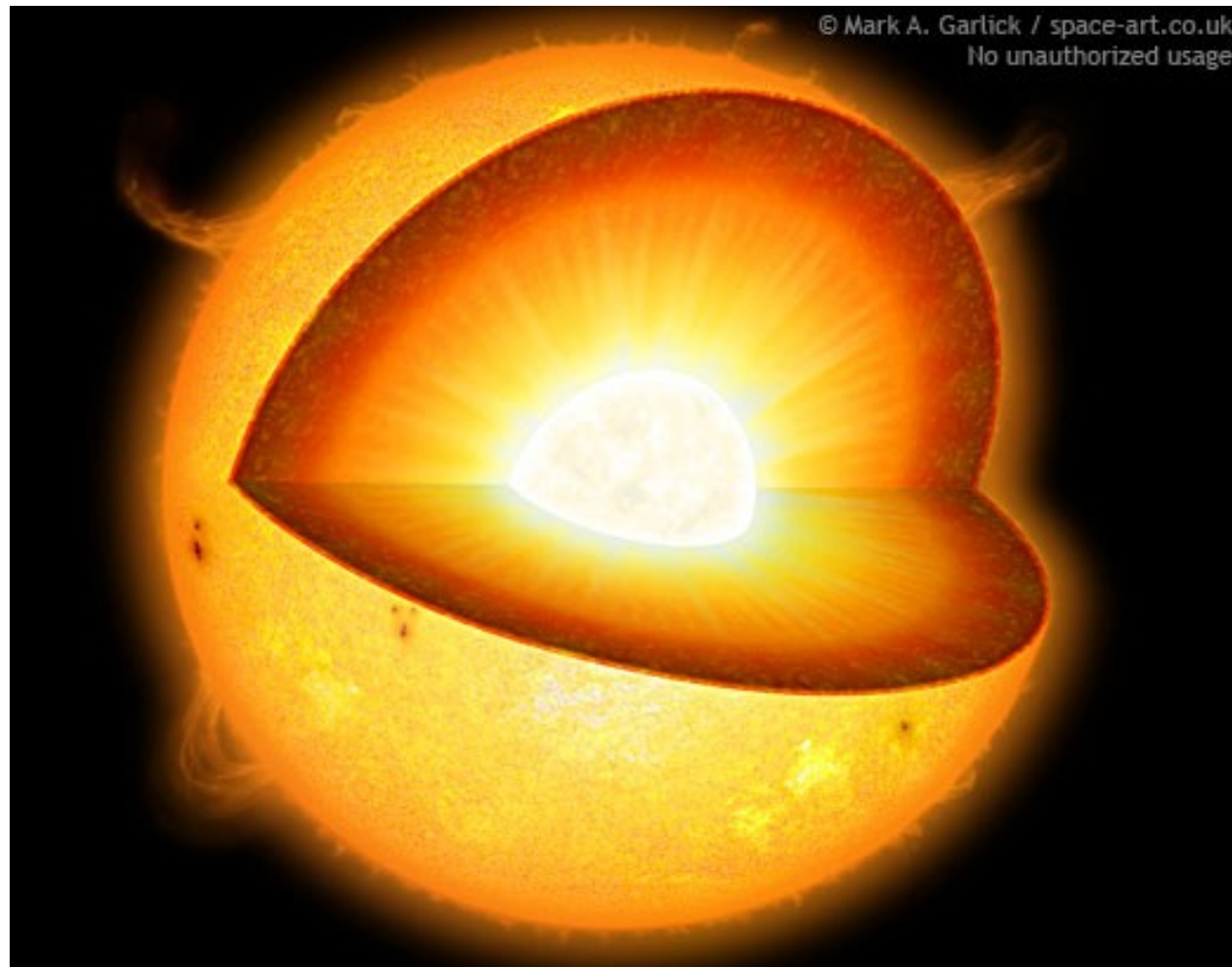


Diagram Hertzsprung-Russella (1910)



Ejnar Hertzsprung (1873-1967)



Henry Norris Russell (1877-1957)

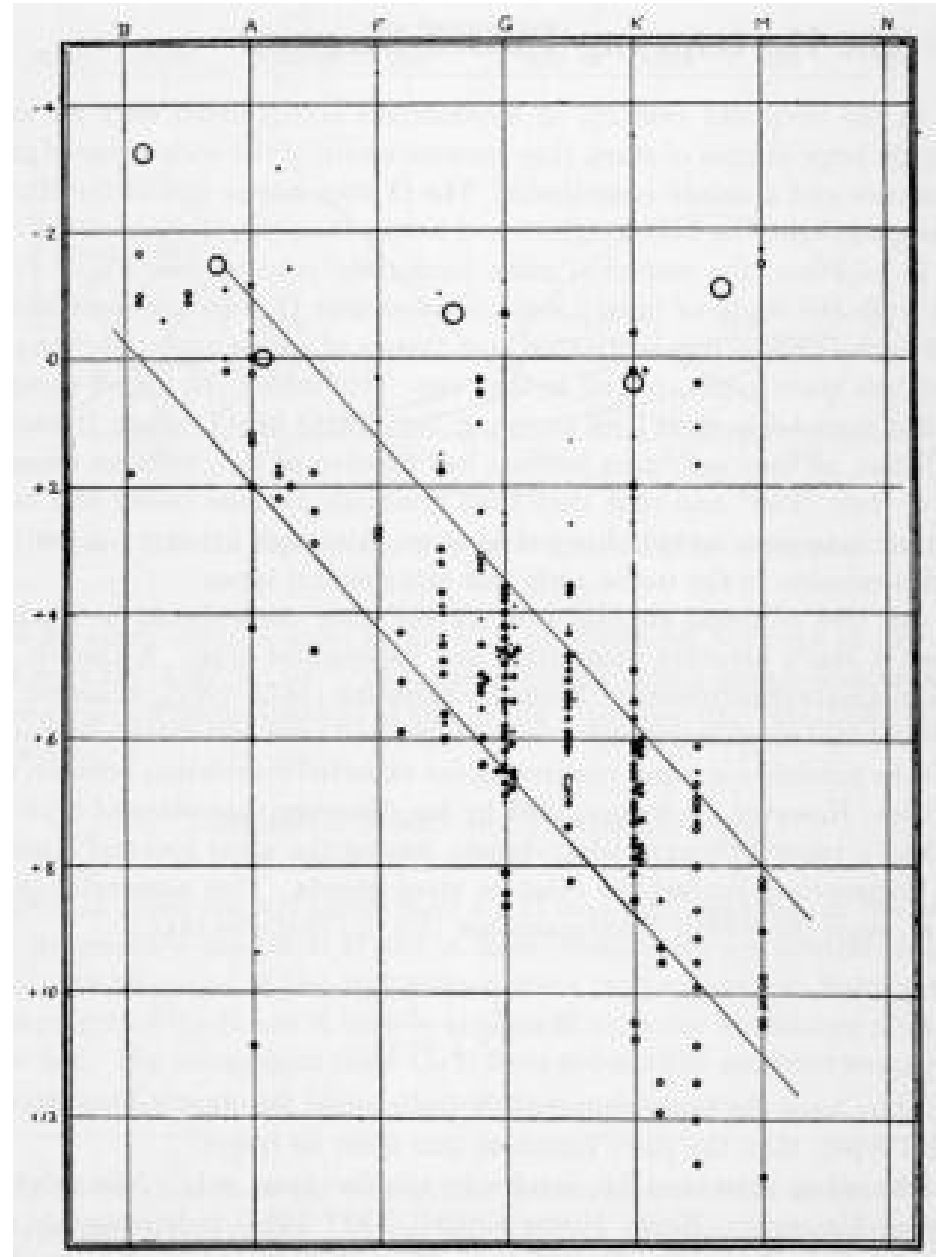


Diagram Hertzsprung-Russella (Hipparcos)

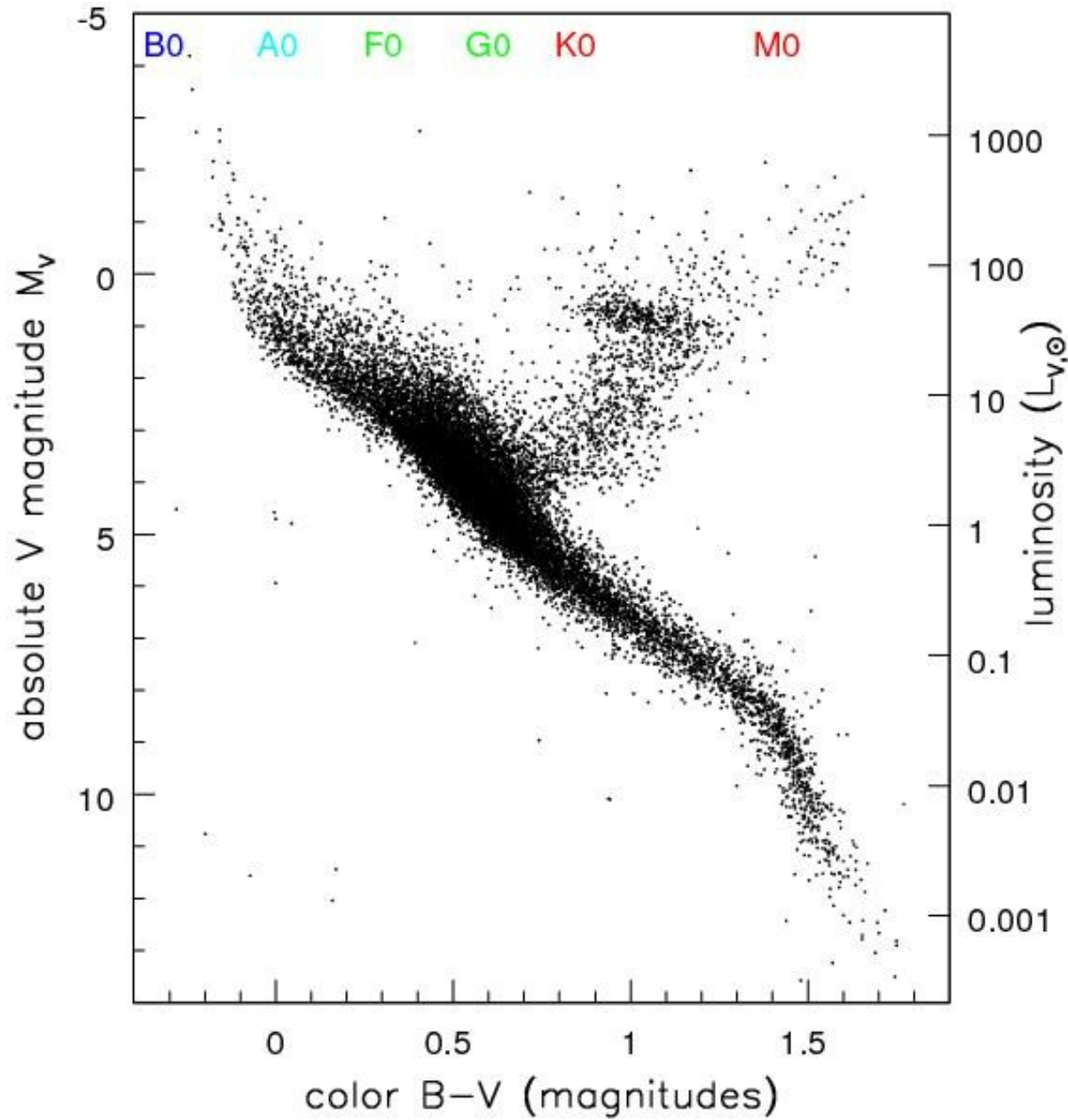


Diagram Hertzsprung-Russella

Cartoon of a Hertzsprung–Russell Diagram with Luminosity Classes
(not accurate)

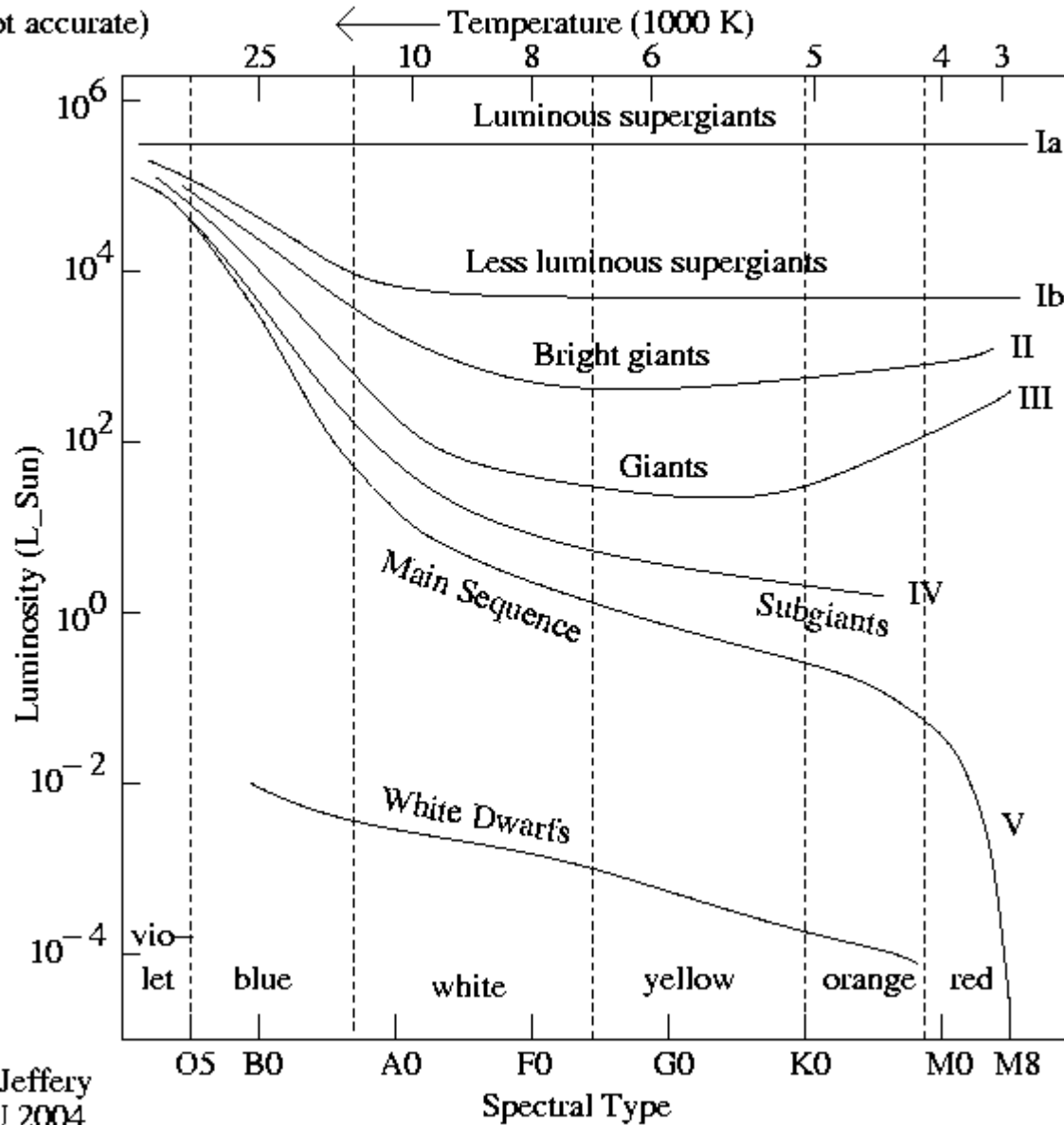
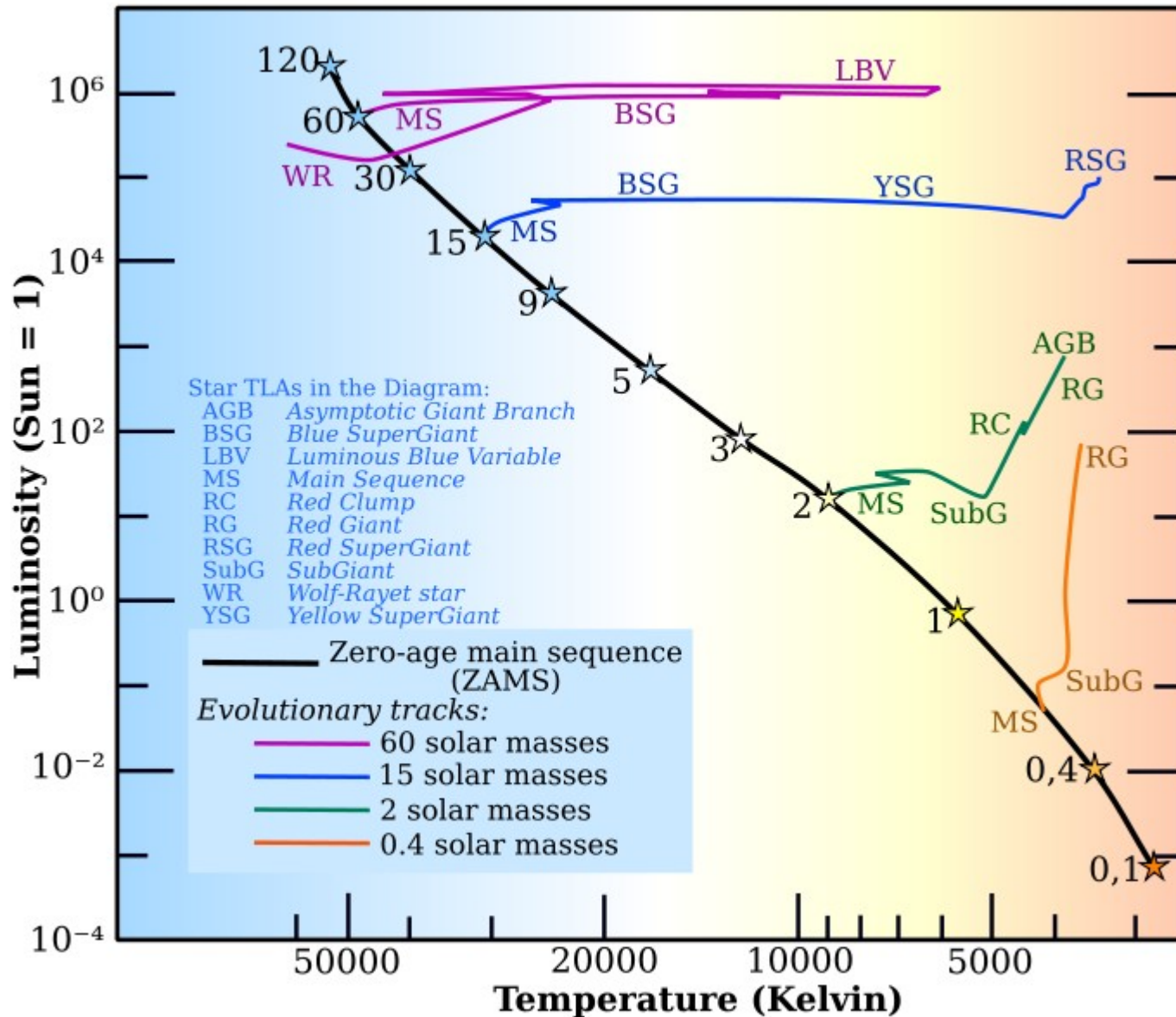


Diagram Hertzsprung-Russella



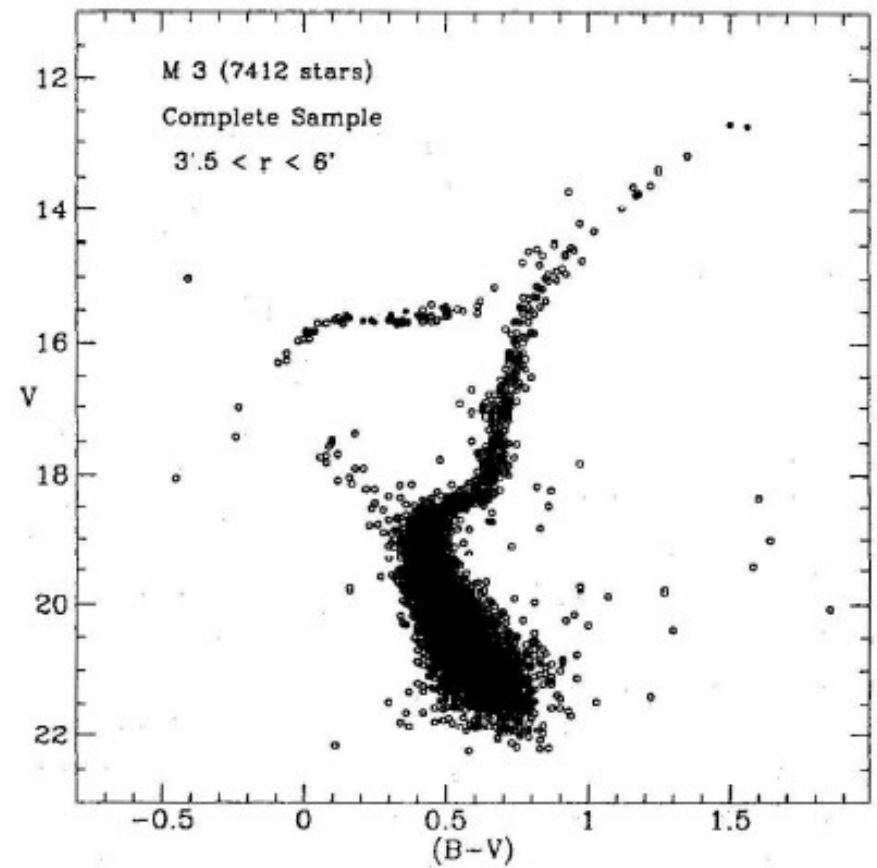
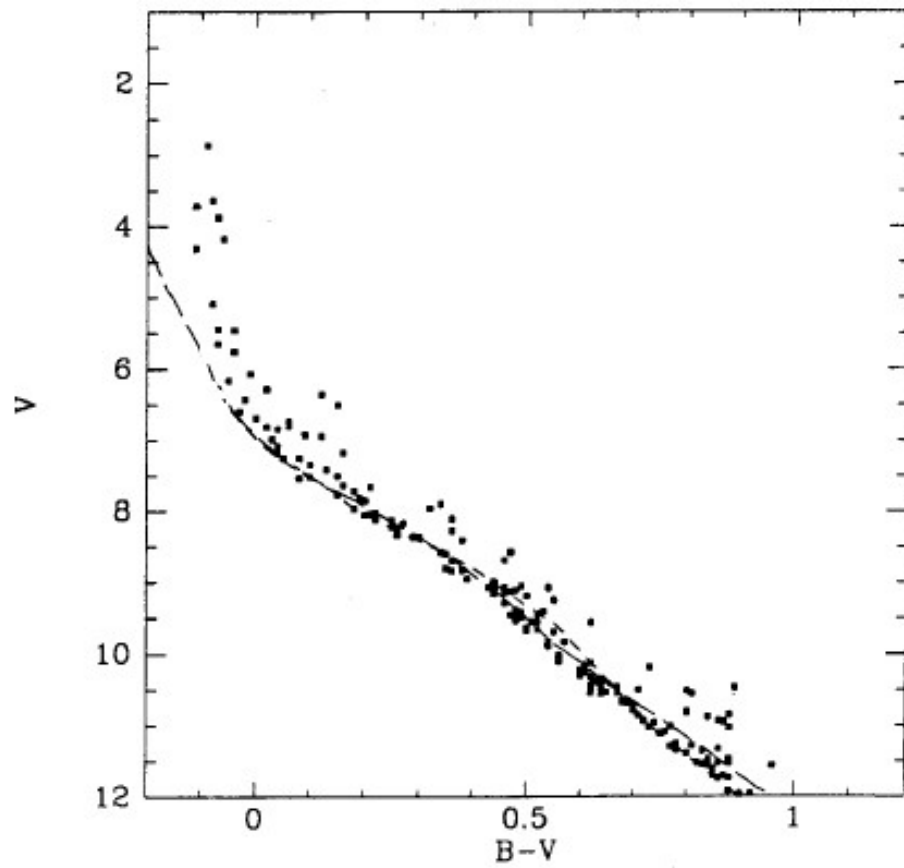


Diagram kolor-jasność dla Plejad i gromady kulistej M3.

Błękitni maruderzy

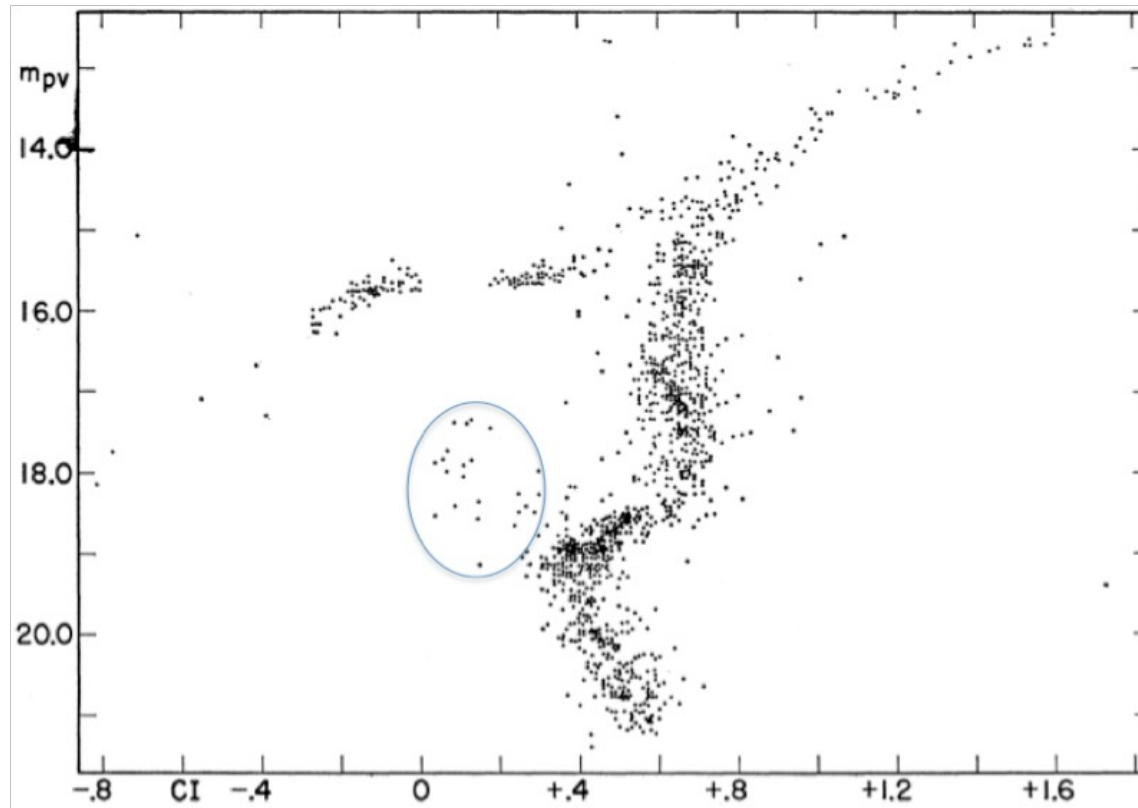
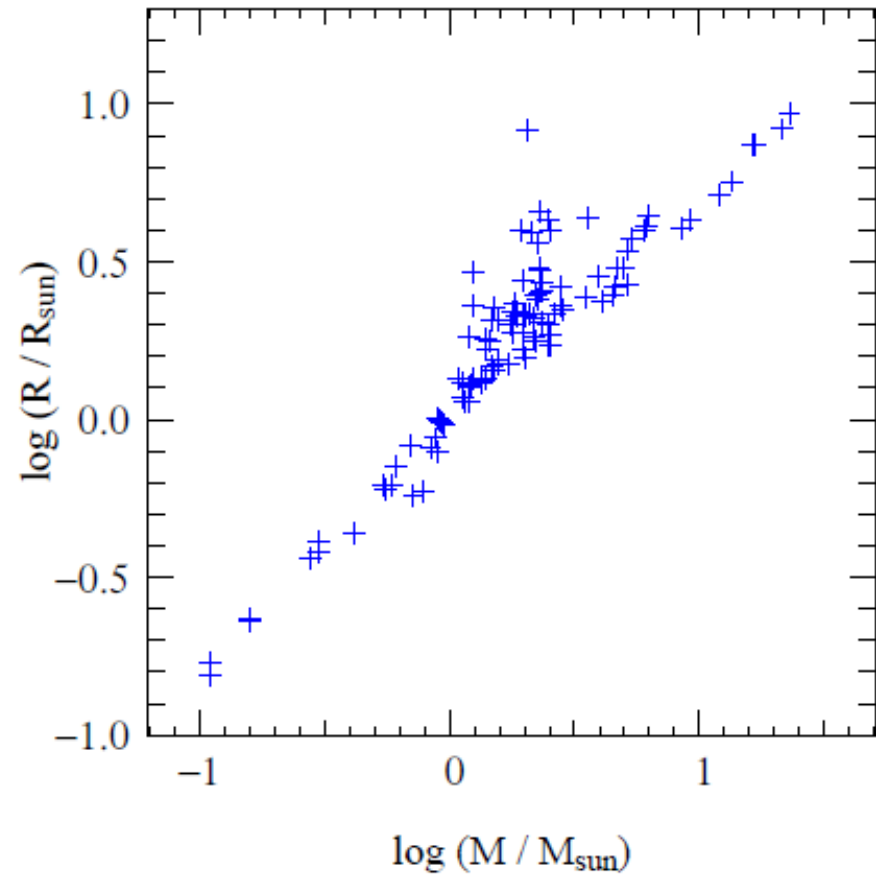
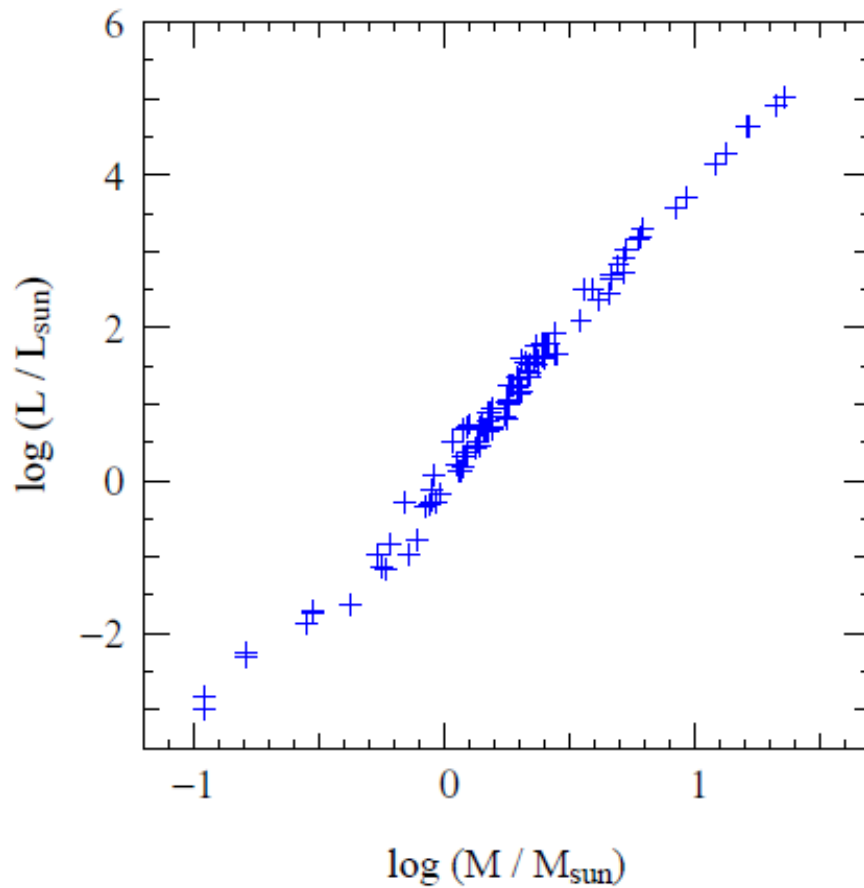


Diagram kolor-jasność dla gromady kulistej M3 (Sandage 1953).
Gwiazdy w kółku musiały w trakcie swojego życia otrzymać dodatkową masę w wyniku zderzenia lub transferu materii od swojego sąsiada.

Korelacje innych parametrów gwiazd



Wykresy dla precyzyjnie zmierzonych układów podwójnych zaćmieniowych, dwuliniowych.

$$L \propto M^{3.8}$$

$$R \propto M^{0.7}$$

Podręcznik

Onno R. Pols

Radboud University Nijmegen

„Stellar structure and evolution”

http://www.astro.ru.nl/~onnop/education/stev_utrecht_notes/

Korelacje innych parametrów gwiazd

Ewolucja gwiazd?

Ewolucja gwiazd – przemiany pokoleniowe: kolejne populacje gwiazd

Życie gwiazd – przemiany w ciągu jednego pokolenia: indywidualnie

Ponieważ życie gwiazd przebiega w skalach czasowych porównywalnych do skali przemian ewolucyjnych organizmów żywych na Ziemi, przyjęło się w nomenklaturze astronomicznej słowo „ewolucja”.

Racjonalizm w fizyce – pojęcie energii

1. Jaka jest definicja pojęcia energia w fizyce?

Zdolność do wykonania pracy / spowodowanie ruchu / podgrzanie ciała.
The capacity to do work / cause movement / heat a body.

2. Jaka jest zatem definicja pojęcia zdolności w fizyce?

?

3. A jaka jest definicja pracy w fizyce?

Praca jest to zmiana energii – ma tą samą co energia jednostkę.
Praca jest również przesunięciem pod wpływem siły.

Energia jest to więc zdolność do zmiany energii (?)
lub zdolność do przesunięcia pod wpływem siły.

Racjonalizm w fizyce – pojęcie energii

4. Czy istnieją przyrządy do pomiaru energii?

W każdym domu są przyrządy do pomiaru energii elektrycznej, ale one energii nie mierzą, tylko mierzą natężenie/napięcie prądu i przeliczają je na energię za pomocą prostego wzoru $P = UI$.

5. Energia a równania ruchu w mechanice klasycznej.

Energia jest użytecznym pojęciem przy modelowaniu ruchu ciał i założeniu zachowania energii całkowitej.

Zakładamy, że na początku układ ciał miał inny rozkład energii na poszczególne ciała i na poszczególne rodzaje energii niż na końcu zadanego okresu czasu.

Ostatecznie jednak wszystkie wzory sprowadzają się do określenia nowej pozycji na podstawie starej pozycji, a energię można z nich (na końcu obliczeń) całkowicie usunąć.

Racjonalizm w fizyce – pojęcie energii

6. Czy energia to matematyczny aksjomat?

W matematyce istnieją pojęcia, których się nie definiuje – aksjomaty. Energia wydaje się takim samym pojęciem w fizyce. Różnica polega na tym, że matematyka jest konceptem czysto intelektualnym, a fizyka odnosi się do mierzalnej rzeczywistości.

7. Czy energia występuje w przyrodzie?

Wg. mnie nie ma dowodu na to, że w przyrodzie istnieje coś co byłoby zgodne z fizyczną „definicją” energii. Energia jest parametrem przypisywanym ciałom fizycznym przez ludzi, w taki sposób by móc za jego pomocą opisywać ruchy tych ciał, ale sama w sobie w przyrodzie nie występuje. Energia jest koncepcją, ideą. Niezwykle jest to jak coś istniejącego jedynie w naszej świadomości może tak doskonale opisywać rzeczywistość.