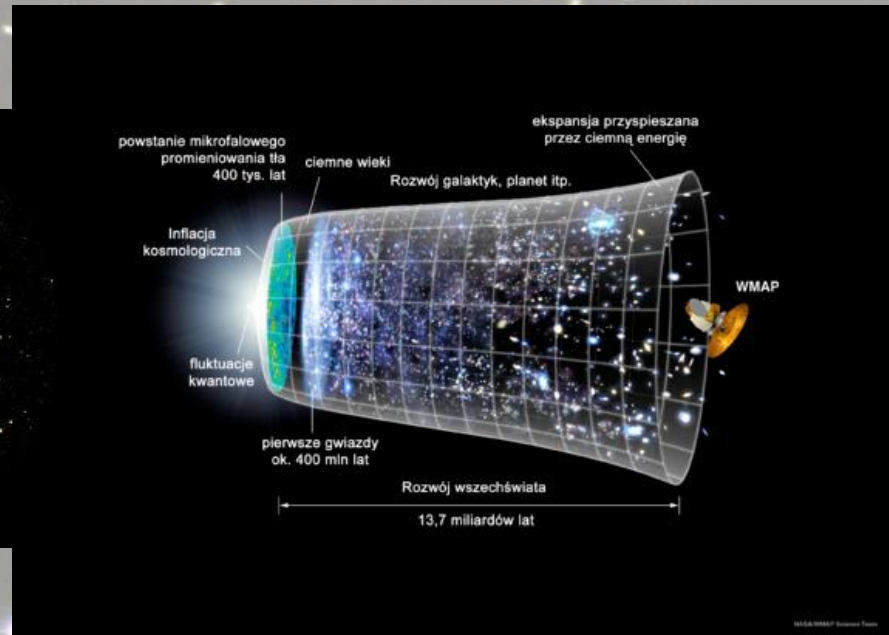
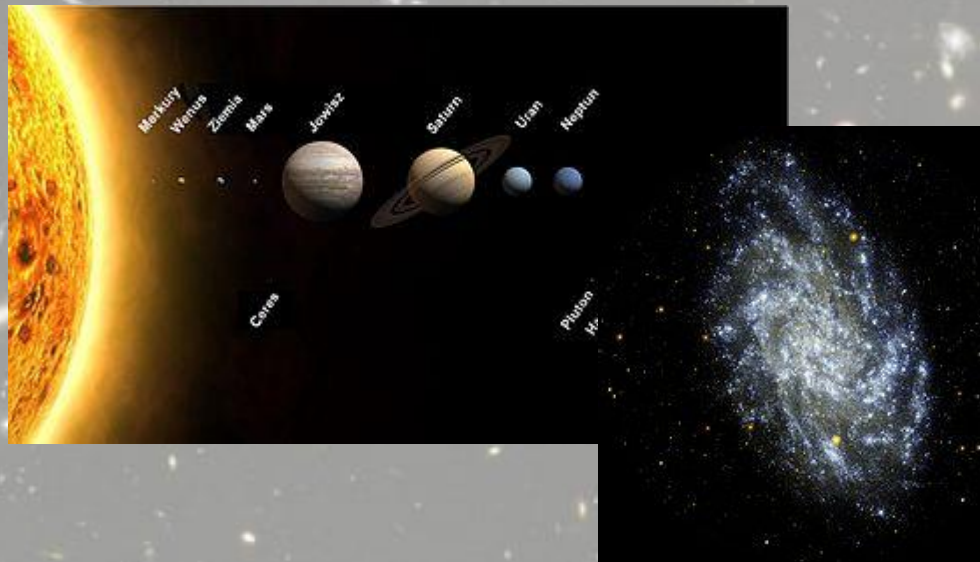


Gdzie odległość mierzy się zerami

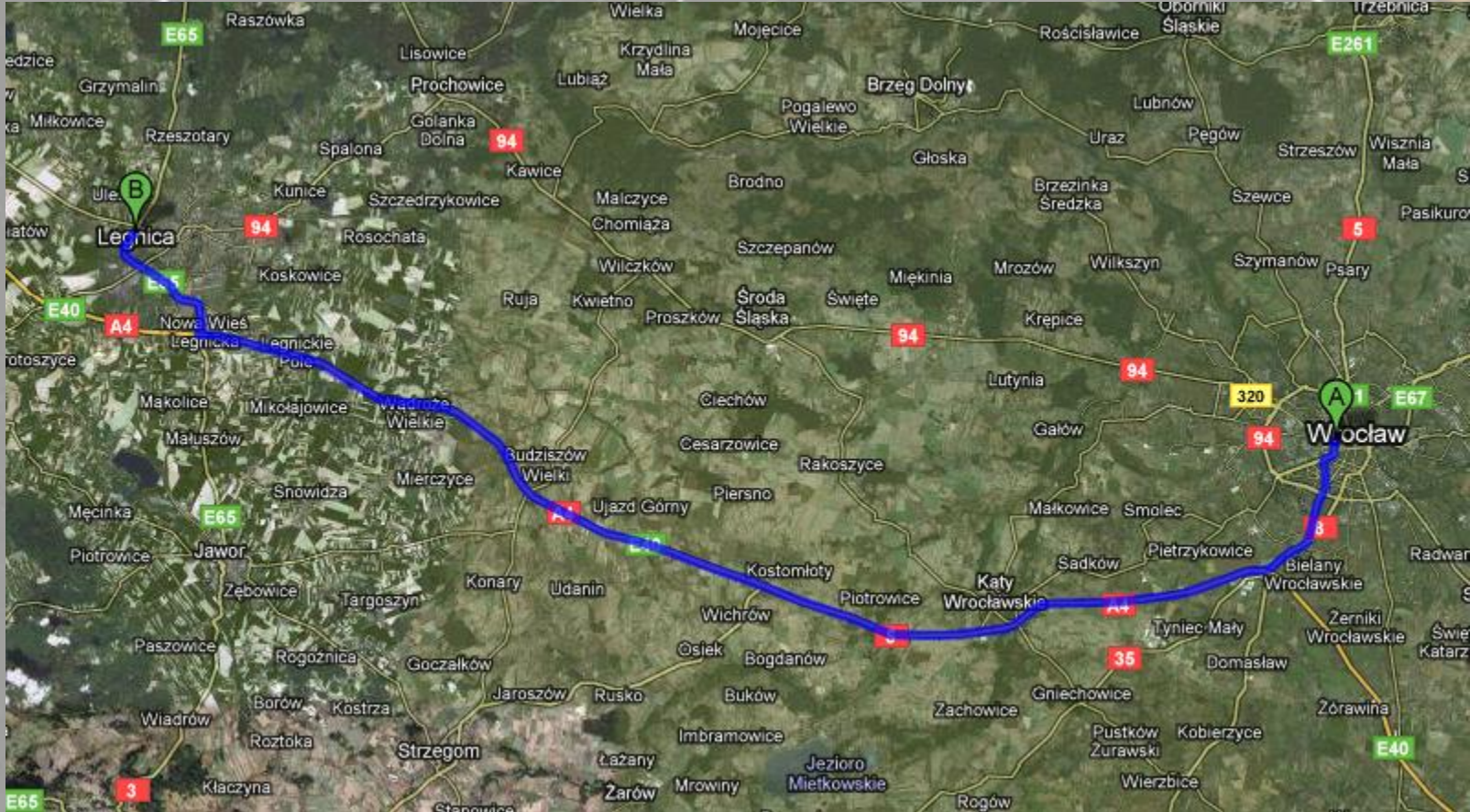
Tomasz Mrozek
Instytut Astronomiczny, UWr
Zakład Fizyki Słońca, CBK PAN

Jednostki odległości w astronomii

jednostka astronomiczna AU, j.a.	średnia odległość Ziemi od Słońca	$1.4959787 \cdot 10^{12}$ m
rok świetlny l.y., r.św.	odległość przebyta przez światło w próżni w ciągu 1 roku	$9.4605 \cdot 10^{15}$ m
parsek pc	odległość, z której 1 j.a. jest widoczna pod kątem 1''	$3.0857 \cdot 10^{16}$ m 3.2616 l.y. 206265 AU



Skala odległości we Wszechświecie



prędkość światła: $299\,792\,458\text{ m/s} \approx 300\,000\text{ km/s}$

Wrocław – Legnica: $77\text{ km} \approx 0.00025667\text{ s św.}$

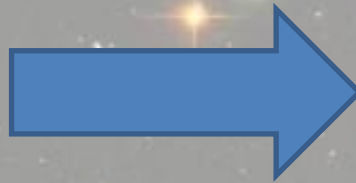
Skala odległości we Wszechświecie



Ziemia



Księżyc

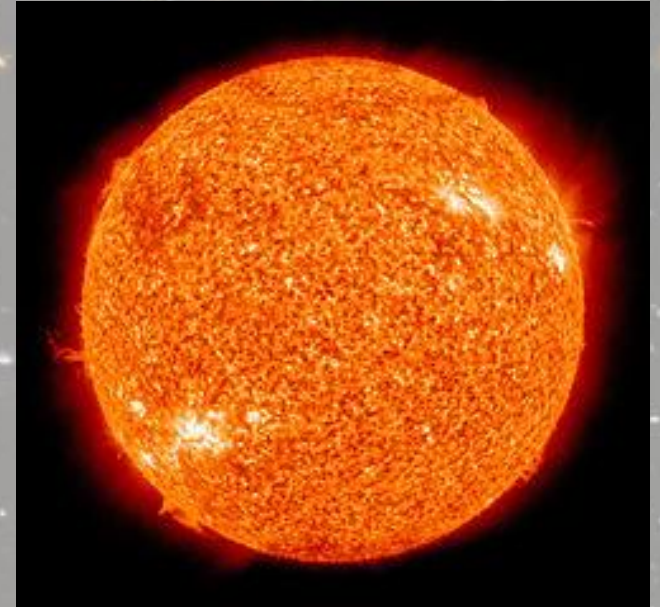


384 400 km
1.28 s św.

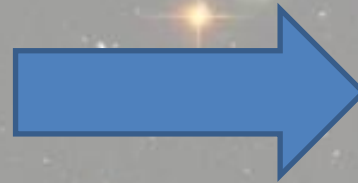
Skala odległości we Wszechświecie



Ziemia

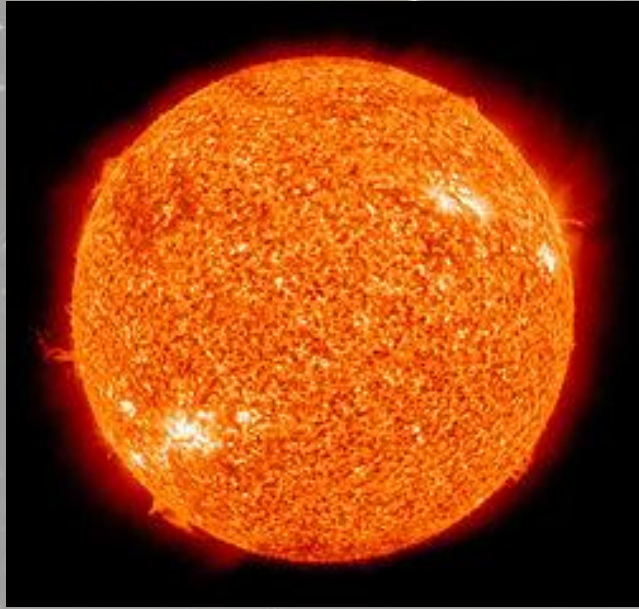


Słońce

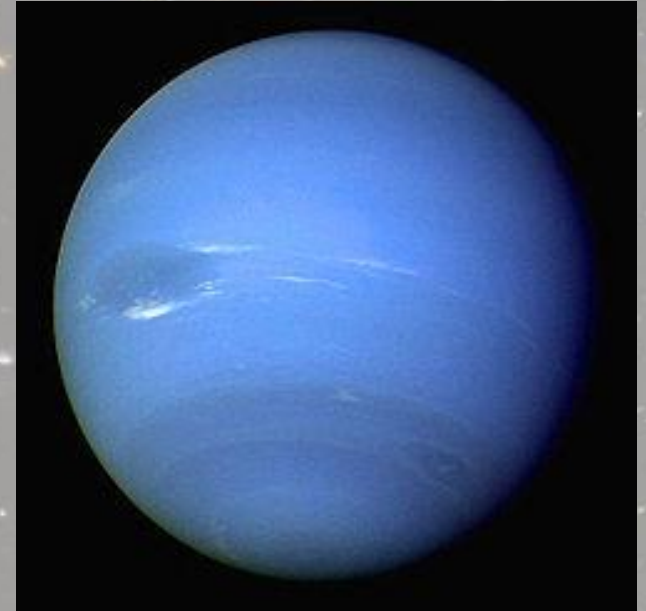


149 600 000 km
498.7 s św. = 8.3 min. św.

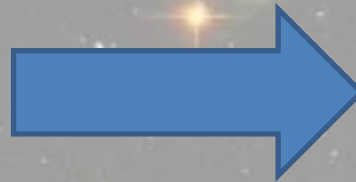
Skala odległości we Wszechświecie



Słońce

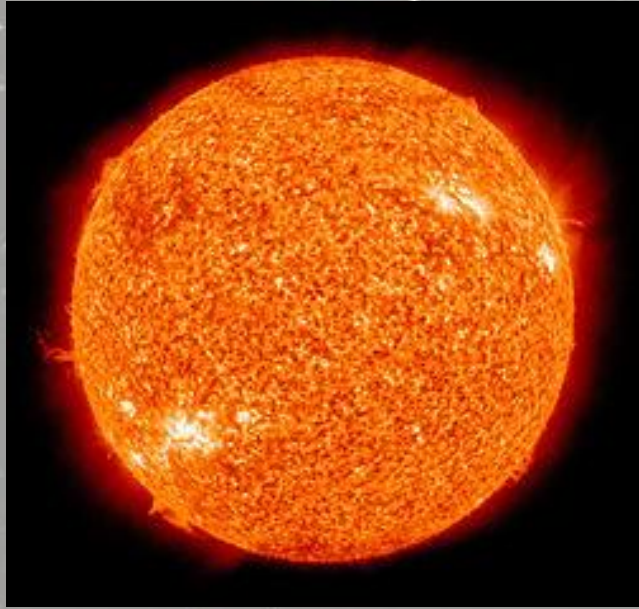


Neptun



4 459 630 000 km
14865.4 s św. = 247.8 min. św. = 4.1 godz. św.

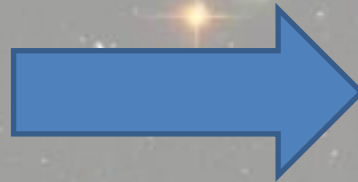
Skala odległości we Wszechświecie



Słońce

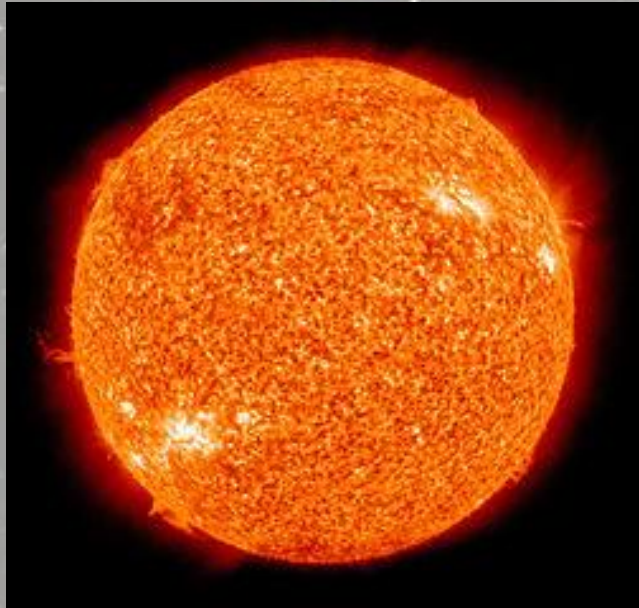


Proxima Centauri



1 664 000 000 000 km
4.22 lat św.

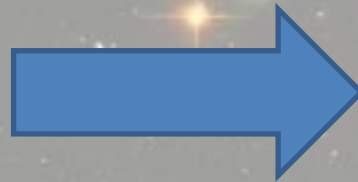
Skala odległości we Wszechświecie



Słońce

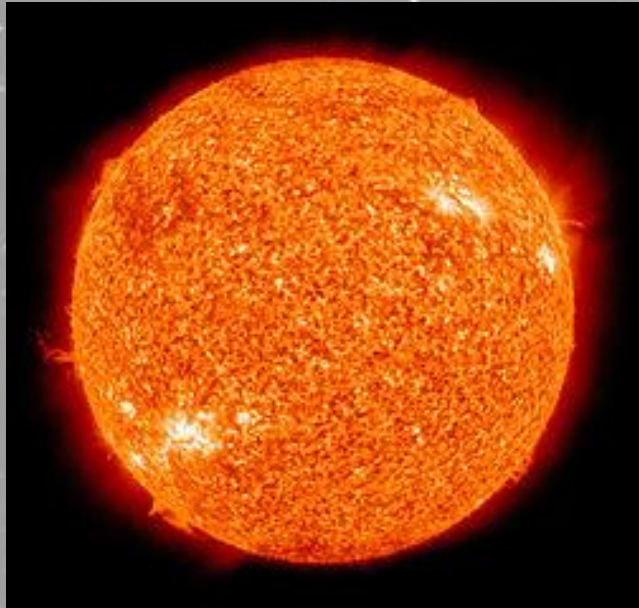


Centrum Drogi Mlecznej



10 650 000 000 000 000 km
27 000 lat św.

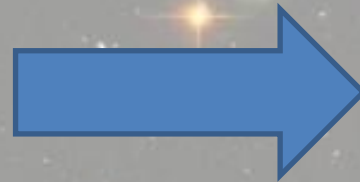
Skala odległości we Wszechświecie



Słońce

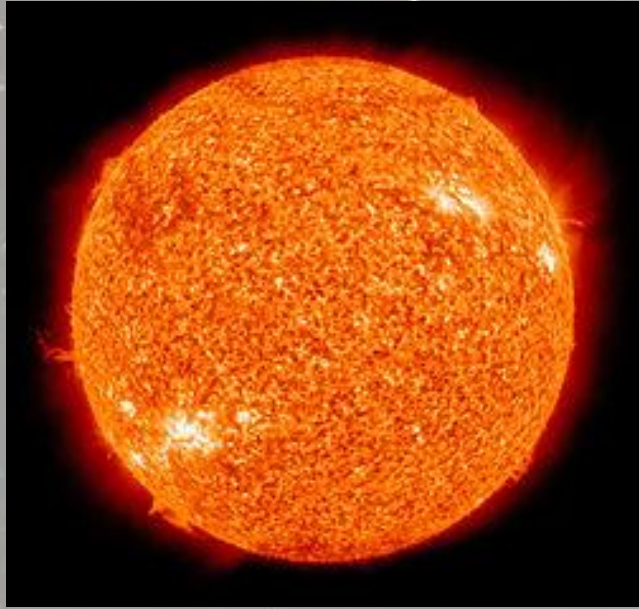


Galaktyka Andromedy

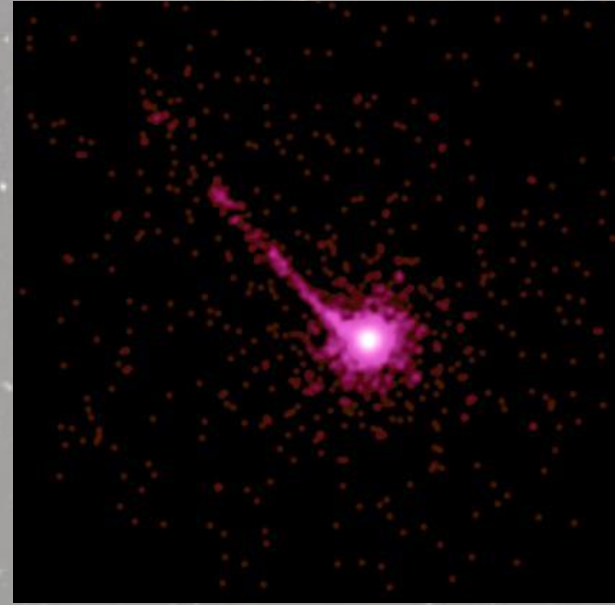


1 000 000 000 000 000 000 km
2 540 000 lat św.

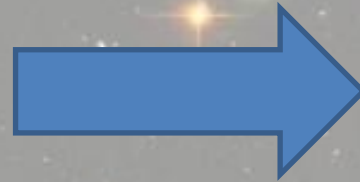
Skala odległości we Wszechświecie



Słońce

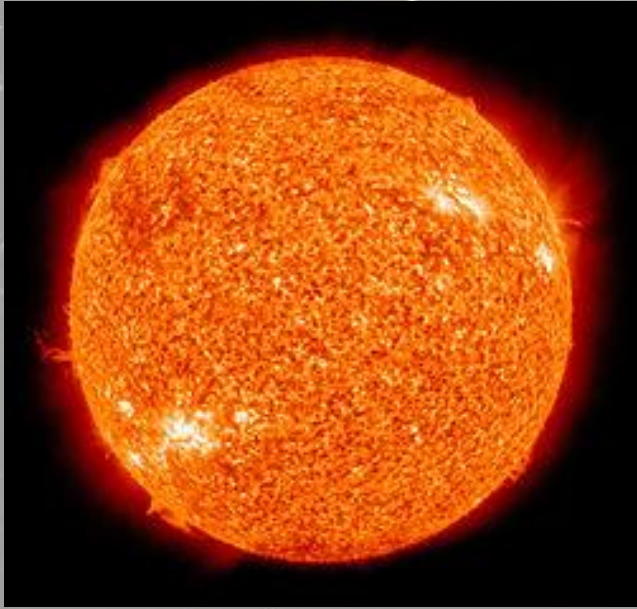


Kwazar PKS 1127-145

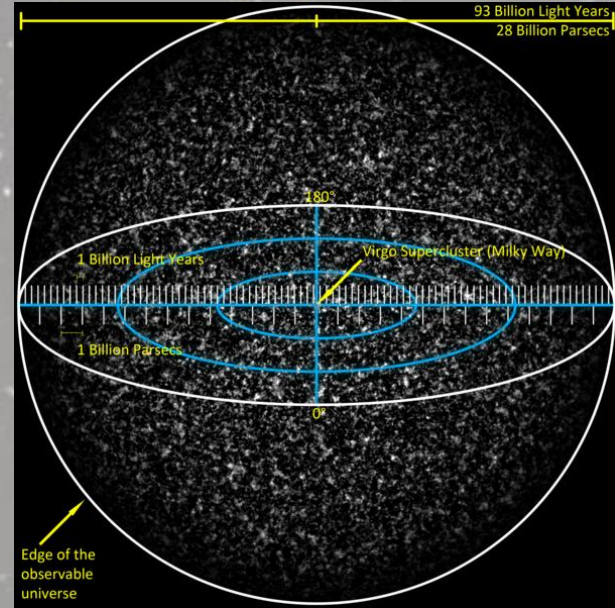


4 000 000 000 000 000 000 000 km
10 000 000 000 lat św.

Skala odległości we Wszechświecie



Słońce



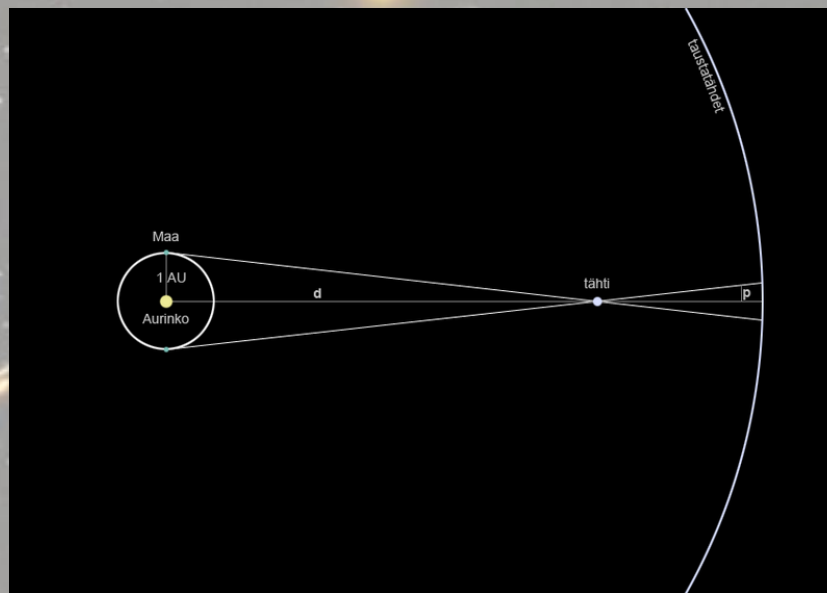
Granica Wszechświata

20 000 000 000 000 000 000 000 km
46 000 000 000 lat św.

Metody wyznaczania odległości we Wszechświecie

Bezpośrednie:

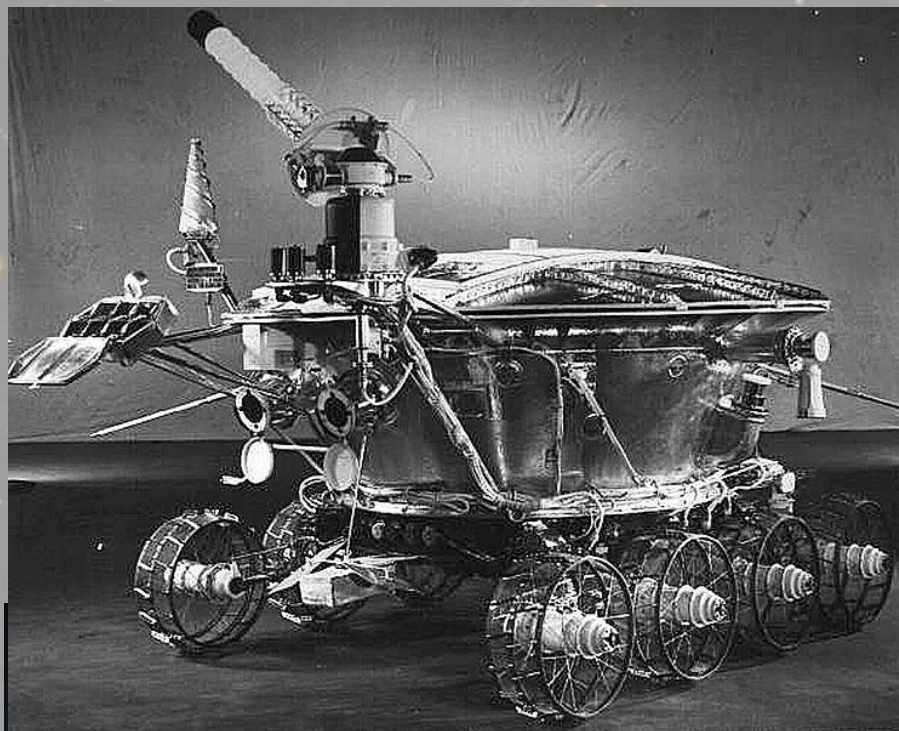
- metoda paralaksy,
- pomiary laserowe
- pomiary radarowe



Pośrednie:

- świece standardowe,
- pręty miernicze,
- prawo Hubble'a
- i 30 innych...

Pomiary laserowe

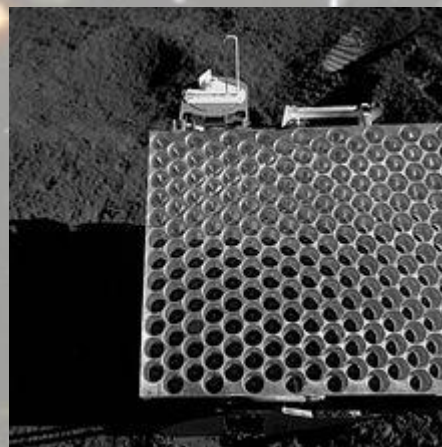
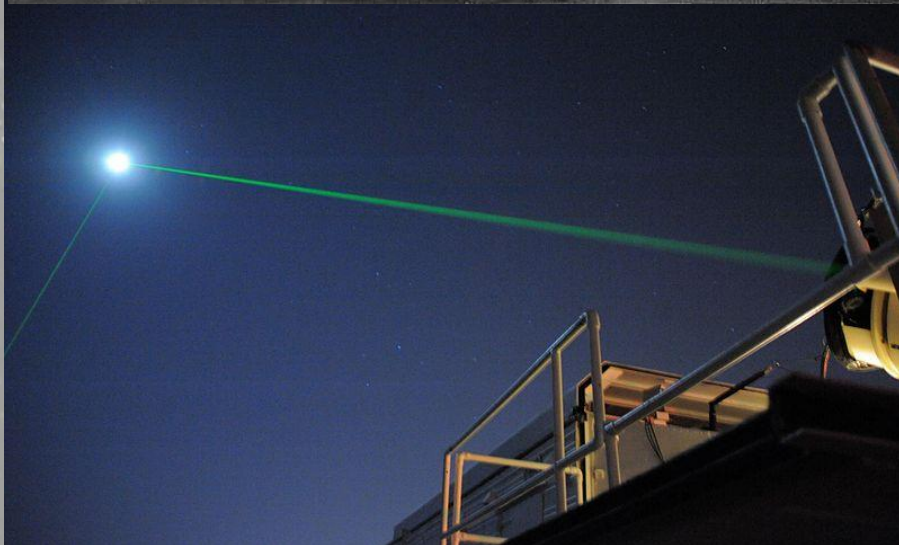


Szereg luster zostawionych na powierzchni Księżyca (Apollo 11, 14 i 15, Łunochod 1 i 2)

Średnica wiązki na Księżycu: 6.5 km

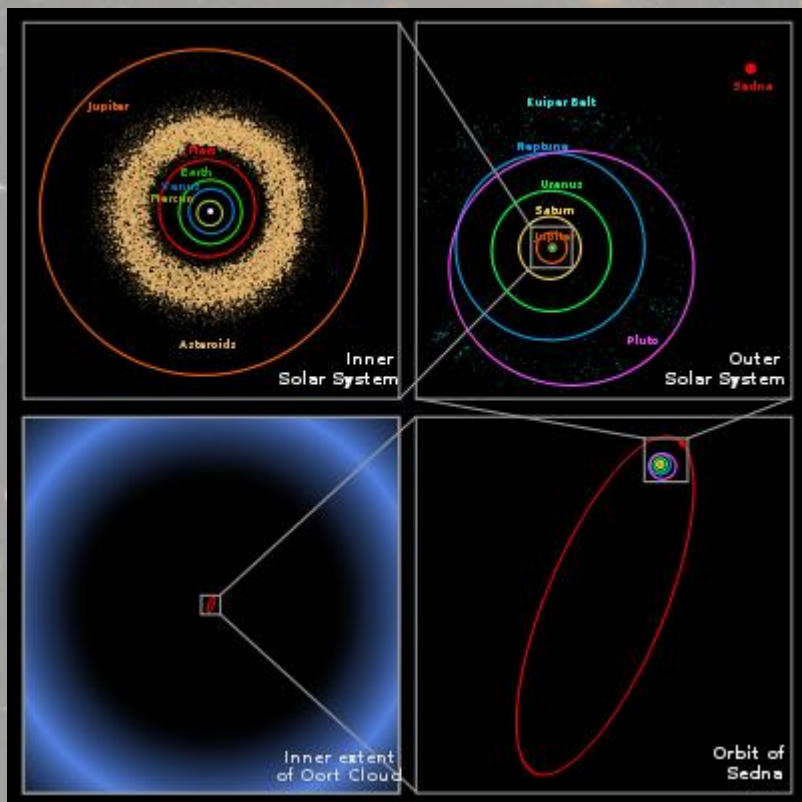
Na każde 10^{17} fotonów w kierunku Ziemi zostaje odbity tylko jeden

Ogromna dokładność. Stwierdzono np. oddalanie się Księżyca od Ziemi w tempie 38 mm/rok



Pomiary radarowe

Prawa Keplera pozwalają nam zmierzyć odległości w układzie słonecznym. Są to jednak odległości względne. Potrzeba wyznaczyć jakąś jednostkę odległości.



1961 r. – pierwsze pomiary (podczas zblizenia Wenus i Ziemi)

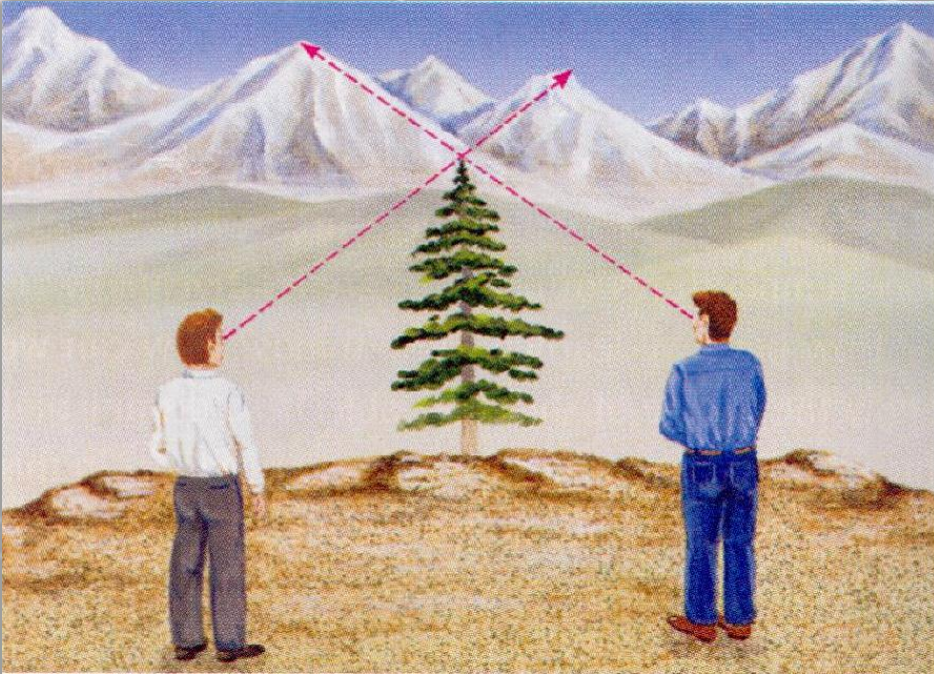
Sygnal pokonał ponad 40 mln km

Znając położenie planet w US wiedzieliśmy, że Słońce znajdowało się 3.6 razy dalej

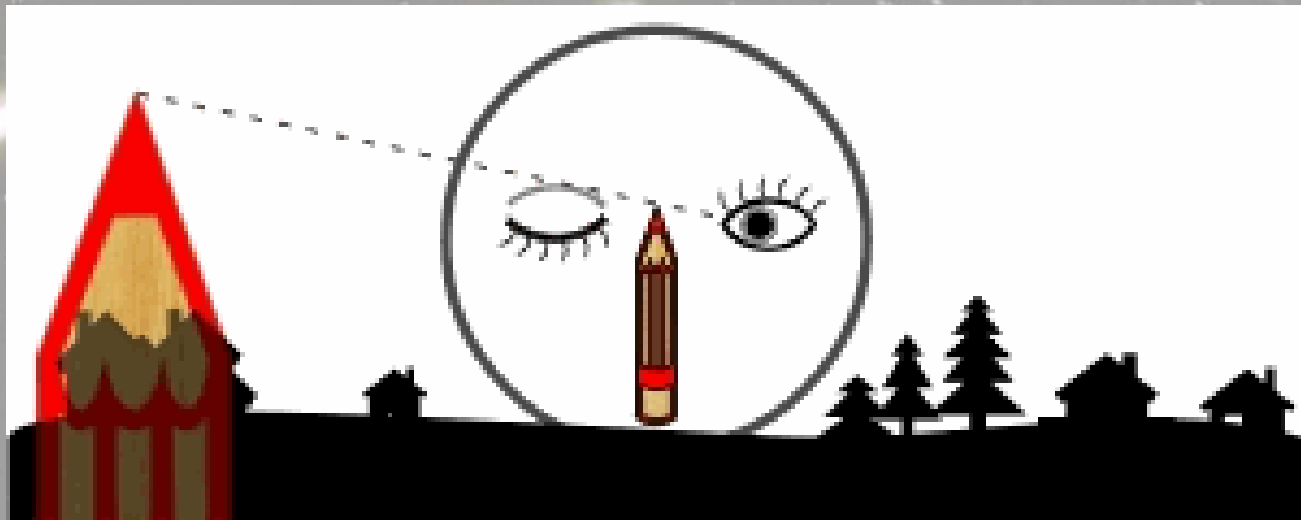
Wyznaczona wtedy wartość:

1 AU= 149 600 000 km

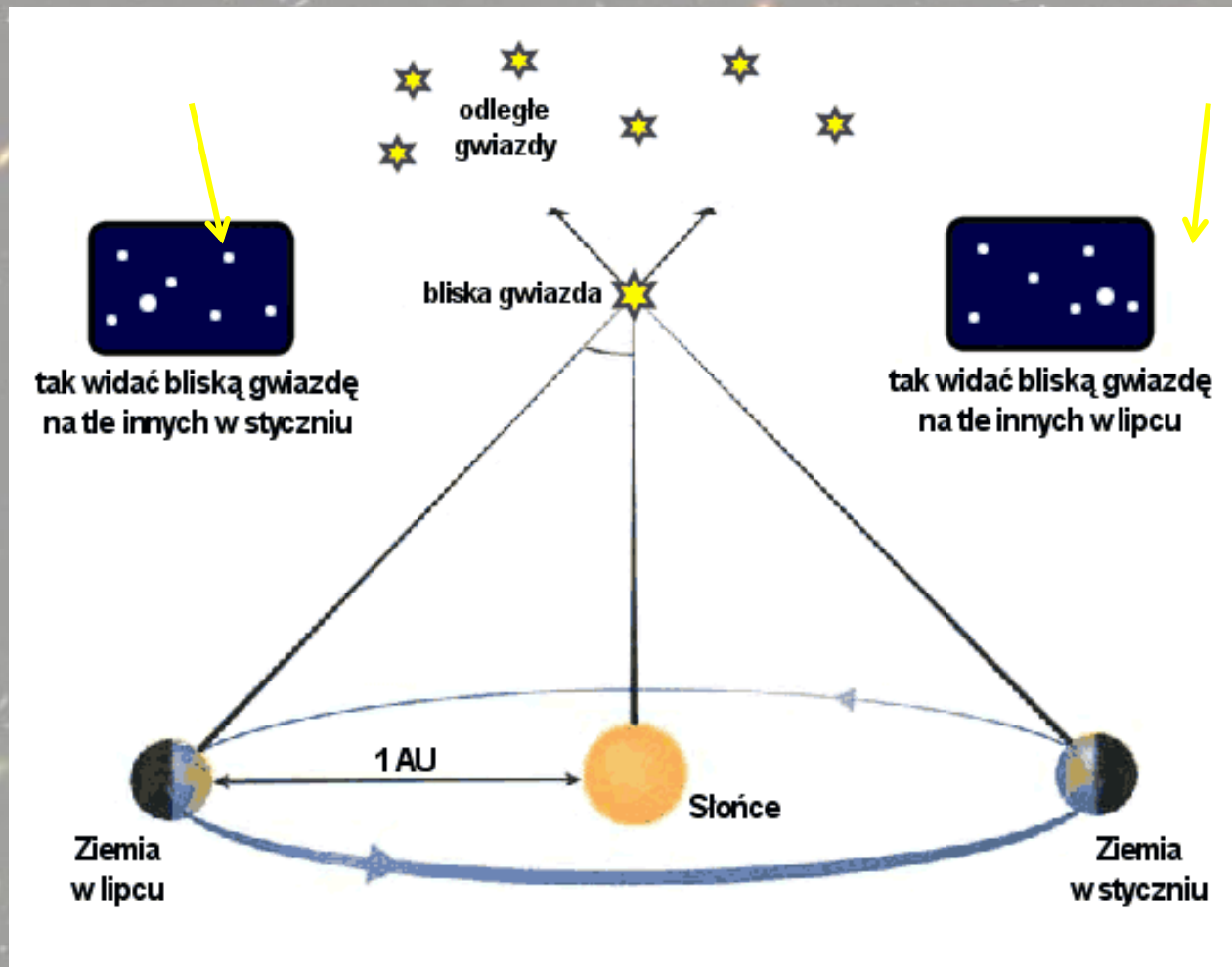
Paralaksa



Znając długość bazy i kąt o jaki przesunął się obiekt na dalekim tle można wyznaczyć odległość



Paralaksa heliocentryczna



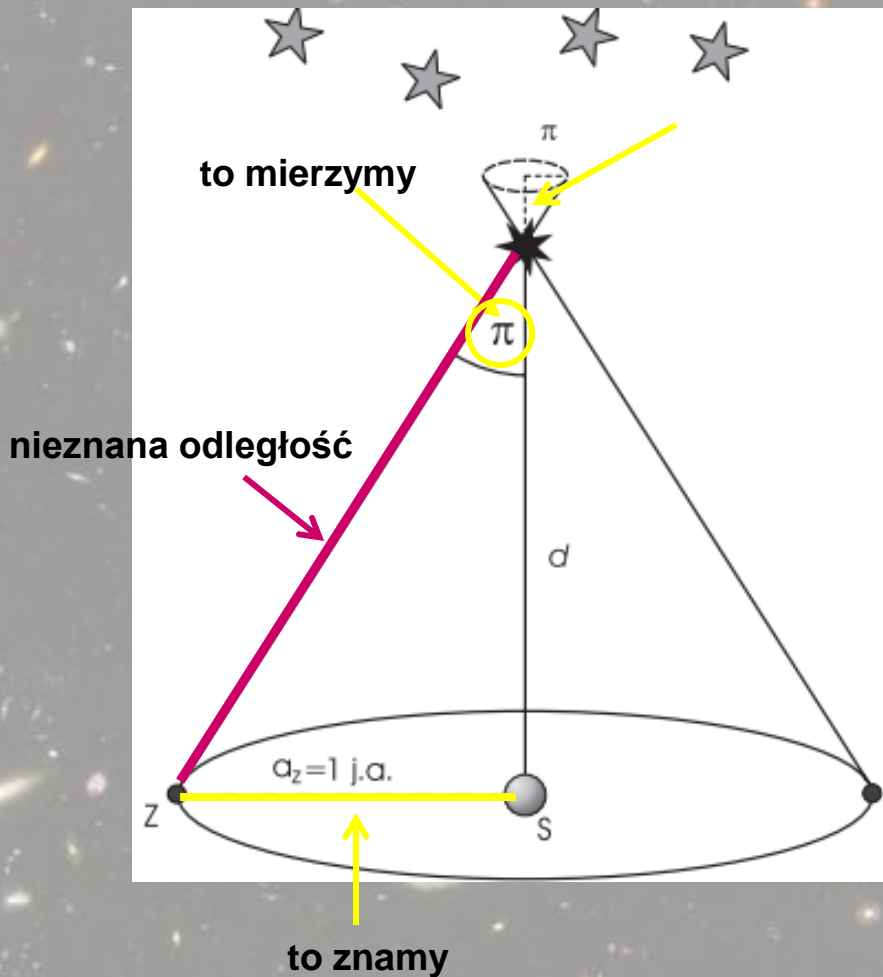
Friedrich Bessel w 1838
mierzy paralaksę gwiazdy
61 Cygni



Kolejnego pomiaru
dokonał Thomas
Henderson. Zmierzył
odległość **α Cen**

Paralaksa heliocentryczna

$$D[\text{pc}] = 1/\pi''$$



Nazwa Galaktyki	Odleglosc (lata swietlne)
Wielki Oblok Magellana	160 000
Malý Oblok Magellana	180 000
Tarcza	270 000
Lew I	900 000
Wielka Mgławica Andromedy	2 200 000
NGC 598	2 300 000

wyznacz paralaksy tych obiektów

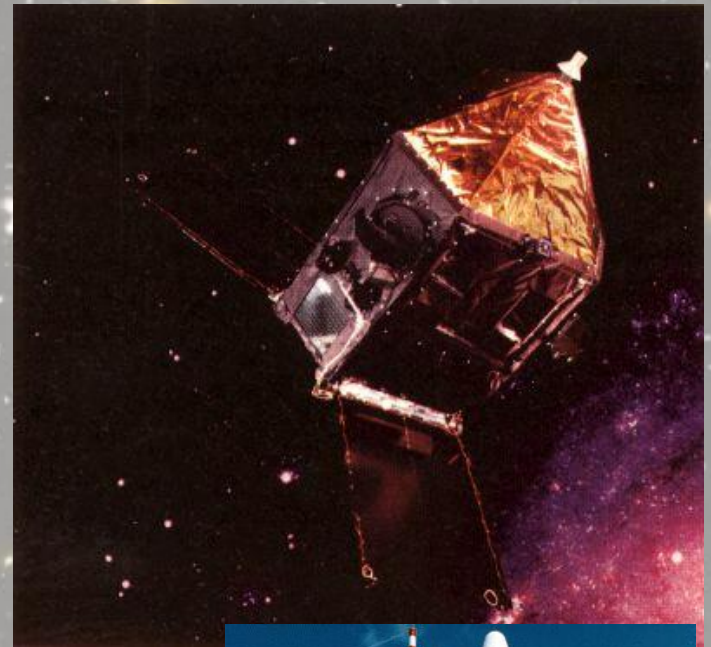
Paralaksa - Hipparcos

High Precision Parallax Collecting Satellite

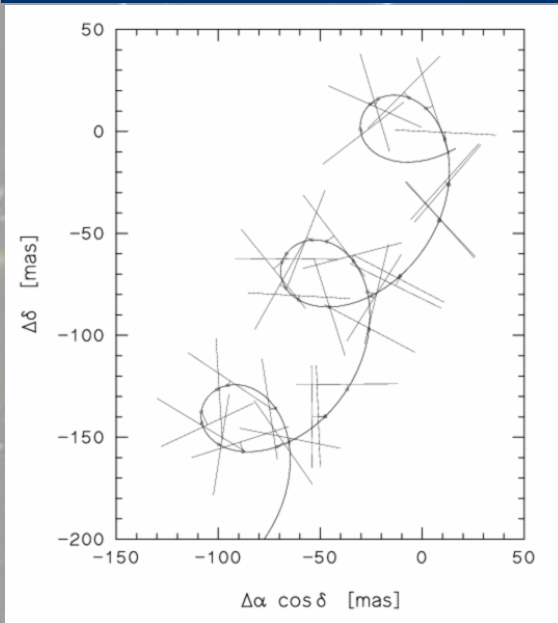
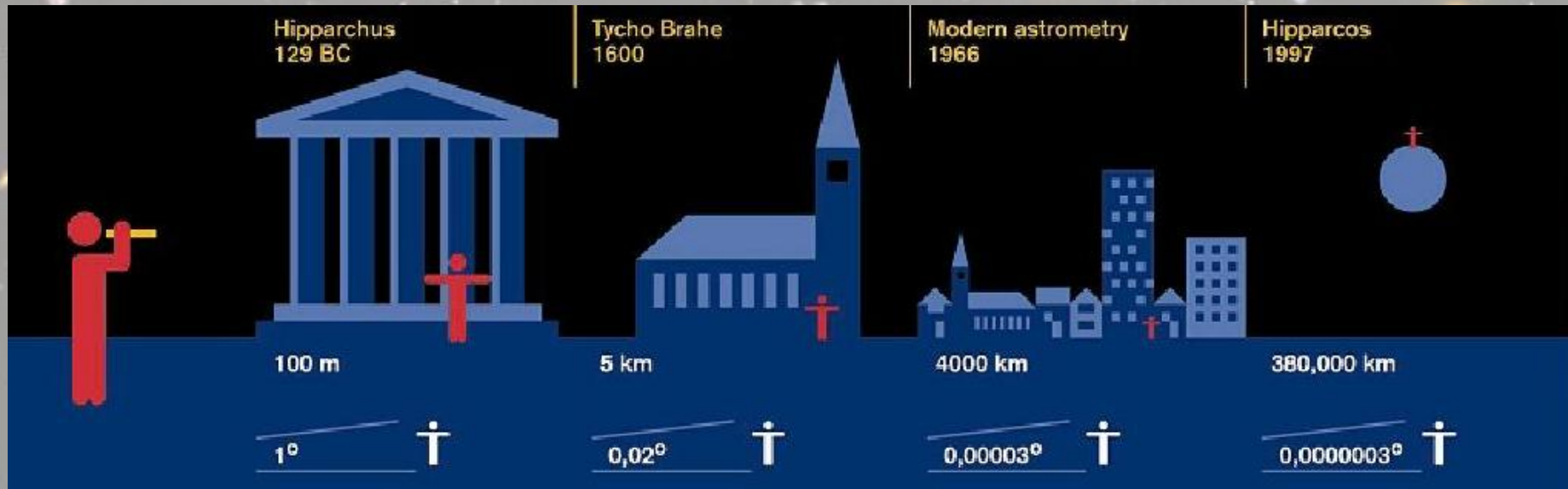
Wystrzelony 8 sierpnia 1989 r.

Dwa katalogi z obserwacjami:

1. Hipparcos – pomiary położeń (dokładność 1 milisekundy kątowej) i jasności (dokładność 2%) dla 118 tys. gwiazd
2. Tycho – pozycje (z dokładnością 20-30 milisekund kątowych) i jasności (dokładność 6%) dla ponad miliona gwiazd



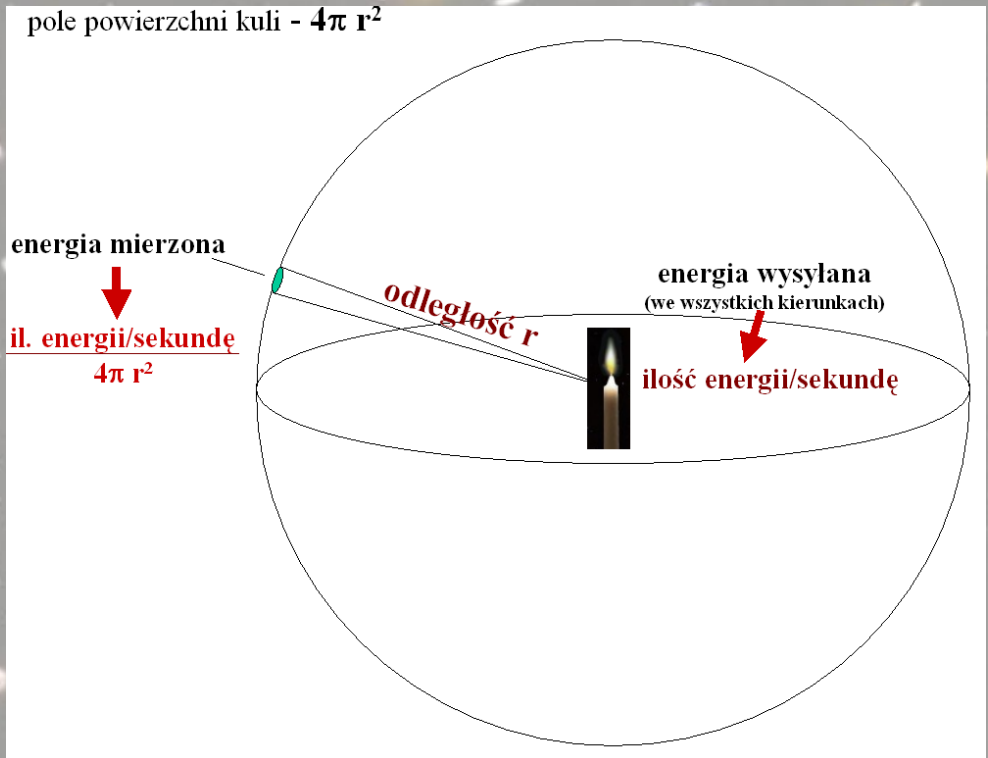
Paralaksa - dokładność



Wyznaczono paralaksy dla około 7 tys. gwiazd do odległości 500 lat świetlnych

W niektórych przypadkach okazało się, że pomiary są obarczone (w niektórych obszarach nieba) błędem na poziomie 1 sekundy kątowej

Świece standardowe



Na podstawie obserwacji obiektu o znanej jasności wyznaczamy odległość do niego

Rolę świec standardowych spełniają między innymi gwiazdy zmienne (pulsujące) i supernowe typu Ia

Jeżeli świecą standardową jest bardzo jasny obiekt, to możemy wyznaczyć naprawdę duże odległości

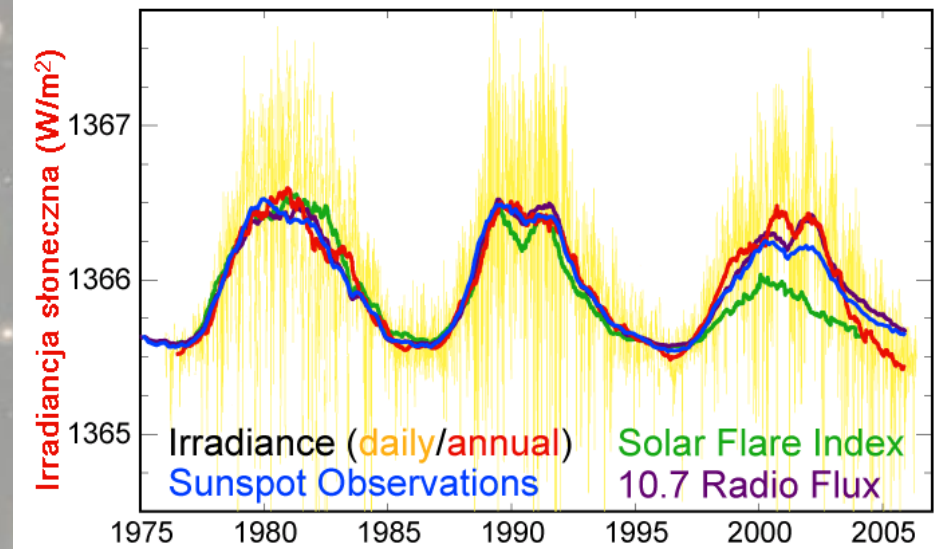
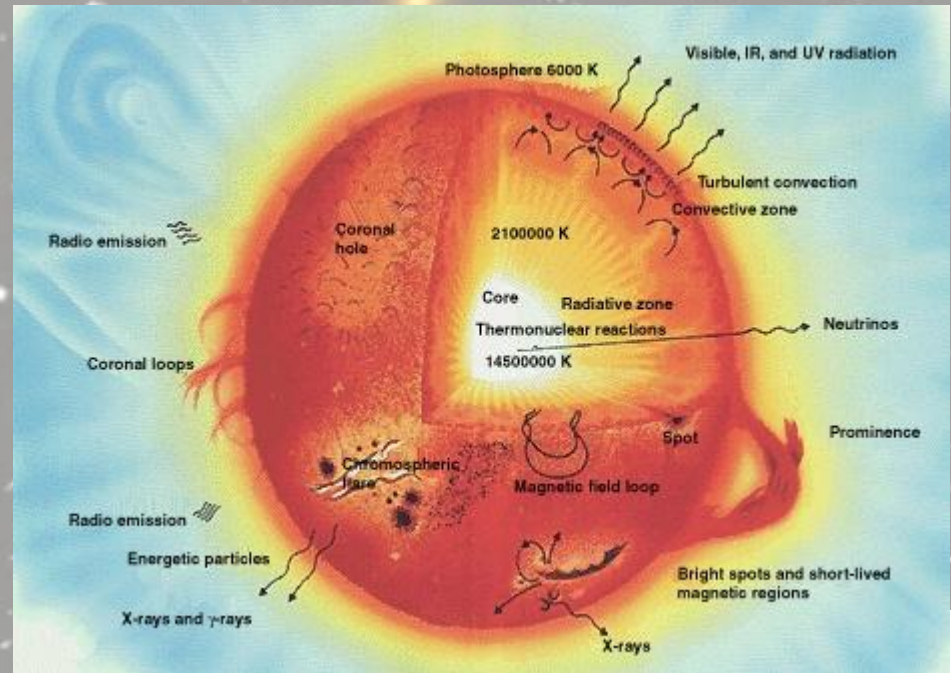
Ilość energii produkowanej w Słońcu

Mierzmy odległość do Słońca i
wyznamy powierzchnię sfery o
rozmiarze 1 AU

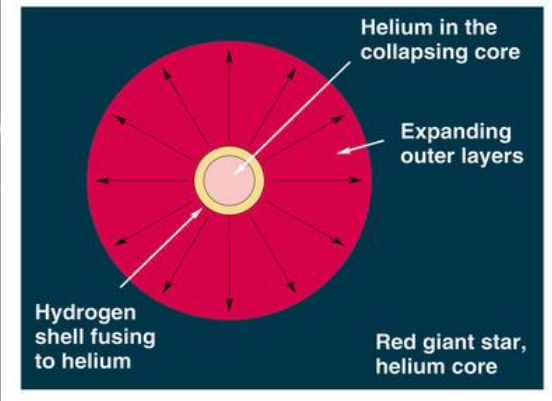
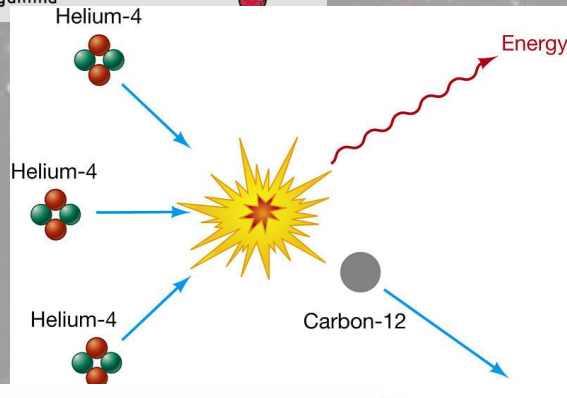
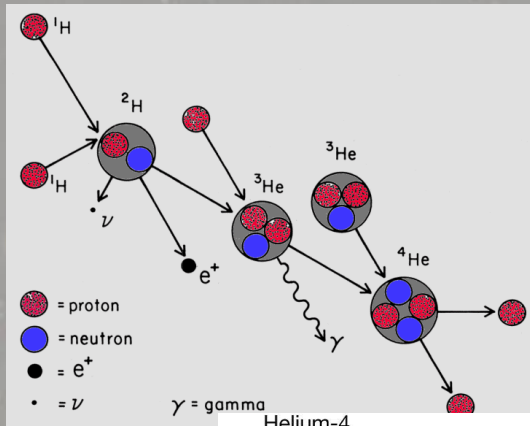
Mierzmy ilość energii docierającej w
okolice Ziemi w każdej sekundzie
($\sim 1366 \text{ W/m}^2$) i mnożymy przez
powierzchnię wyznaczonej sfery

Ta sama energia opuszcza powierzchnię
Słońca. Zakładając, że Słońce działa
stabilnie możemy założyć, że jednocześnie
tyle samo jest produkowane wewnątrz

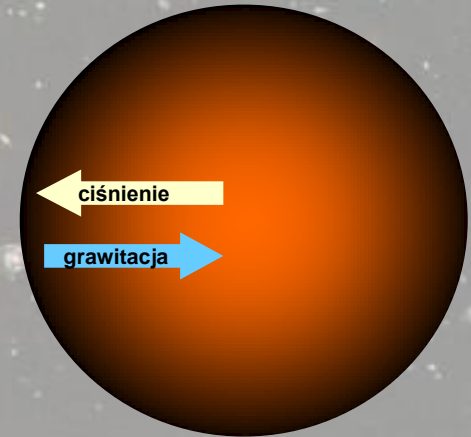
W każdej sekundzie Słońce musi zamienić
600 mln ton wodoru w hel aby
wyprodukować tak ogromną ilość energii



Krótko o ewolucji gwiazd



Gwiazda jest w równowadze do momentu gdy nie zabraknie w jej wnętrzu paliwa.



Kiedy skończy się wodór rozpoczynają się reakcje palenia helu, a potem cięższych pierwiastków

Trwa to do momentu pojawienia się w centrum dużych ilości żelaza (o tym później)

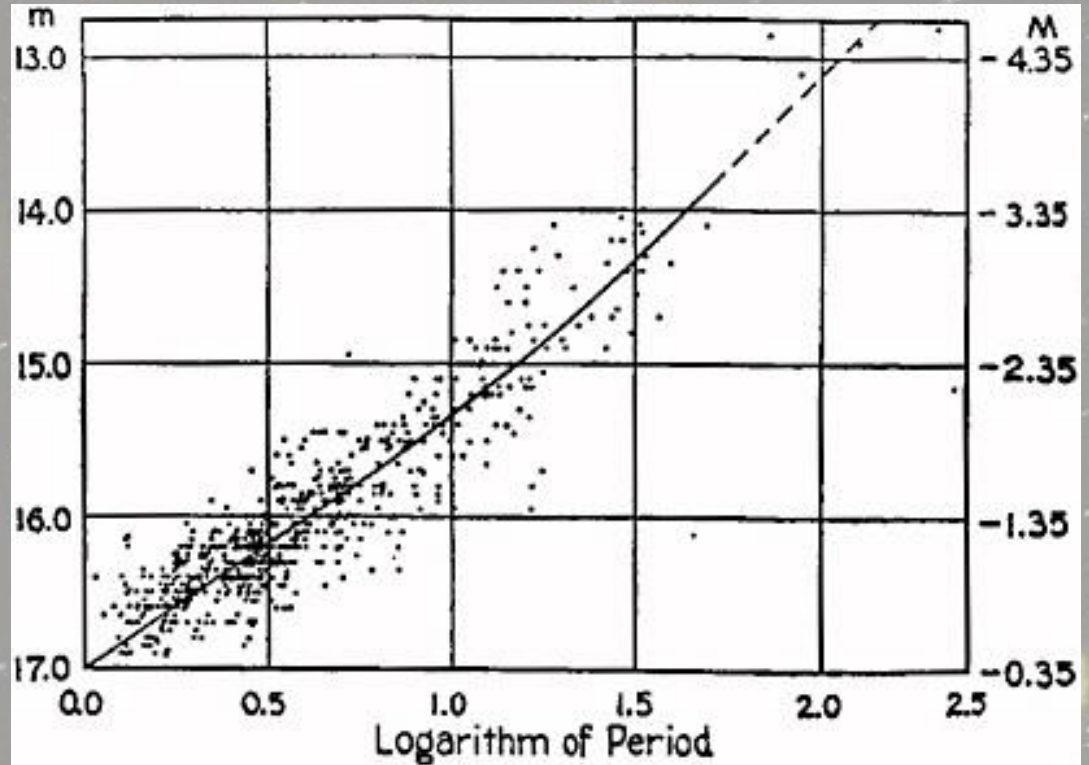
Na niektórych etapach swojego życia gwiazda może zacząć pulsować

Niektóre gwiazdy pulsujące spełniają bardzo ważną zależność: okres-jasność

Świece standardowe – zmienne pulsujące

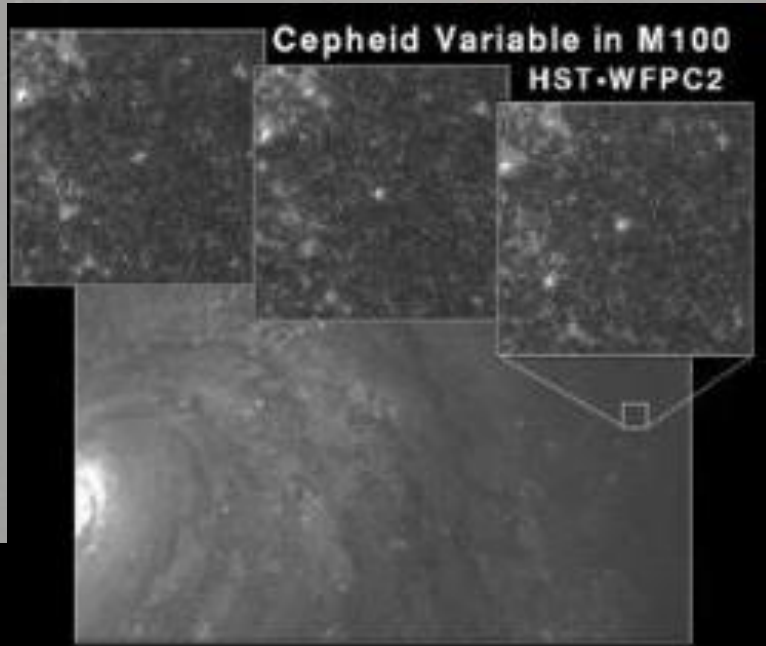


Henrietta Swan Leavitt
4.06.1868 r.- 12.12.1921 r.



Związek jasności absolutnej z okresem zmian blasku sprawia, że cefeidy są świecami standardowymi

Świece standardowe – zmienne pulsujące



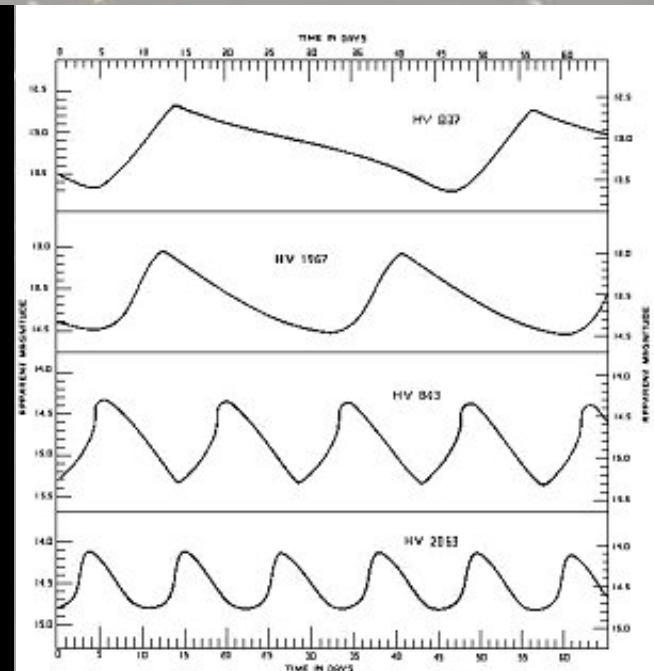
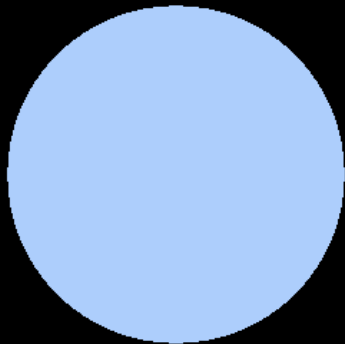
Cefeidy:

nadolbrzmy (widoczne z dużych odległości)

gwiazdy zmienne pulsujące

okres zmian jasności: od 1 do 150 dni.

amplituda zmian jasności: od 0,1 do 2 mag



Świece standardowe – zmienne pulsujące

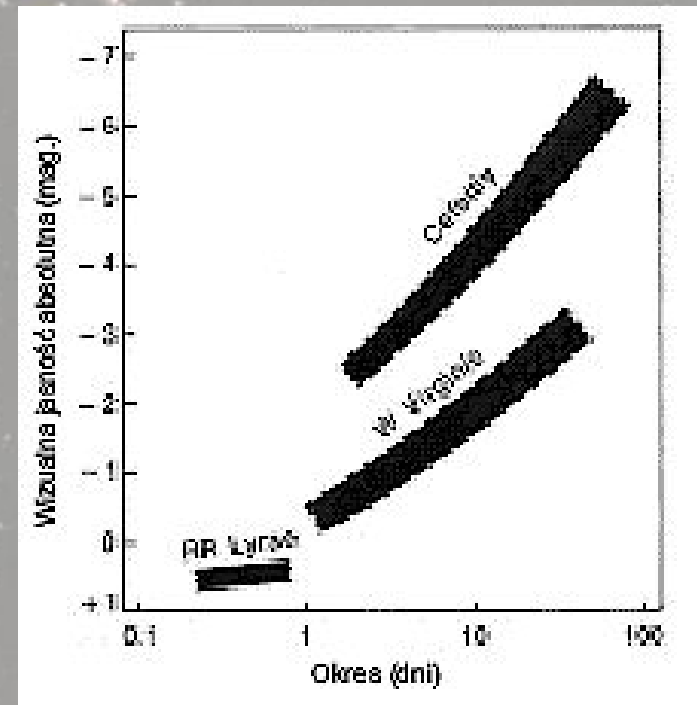
RR Lyrae

- gwiazdy pulsujące,
- podobne do cefeid, ale mają mniejsze rozmiary i krótsze okresy pulsacji,
- wykorzystywane do wyznaczania odległości do gromad kulistych

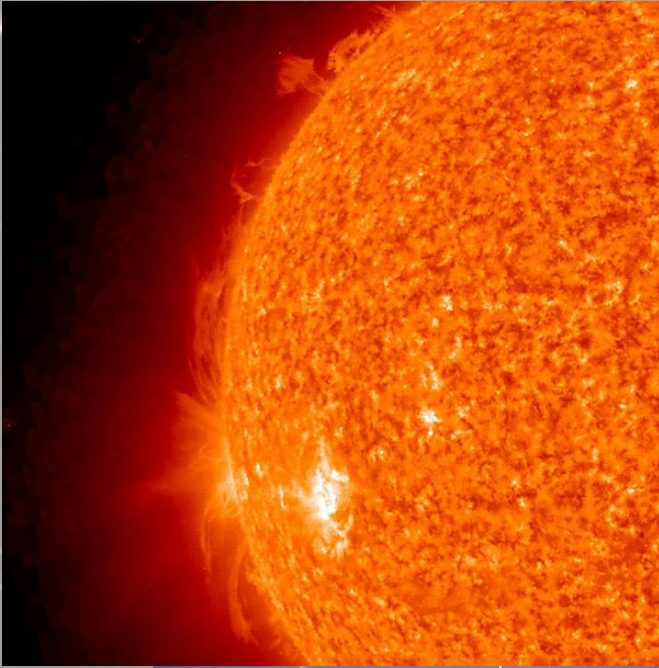


W Virginis

- gwiazdy pulsujące,
- podobne do cefeid (cefeidy typu II),
- obserwuje się je w gromadach kulistych,



Końcowe etapy życia gwiazd – małe masy

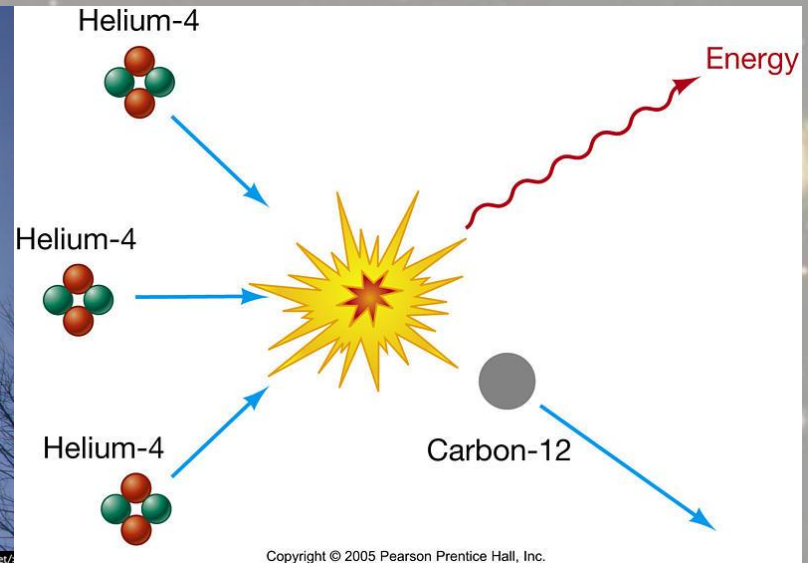
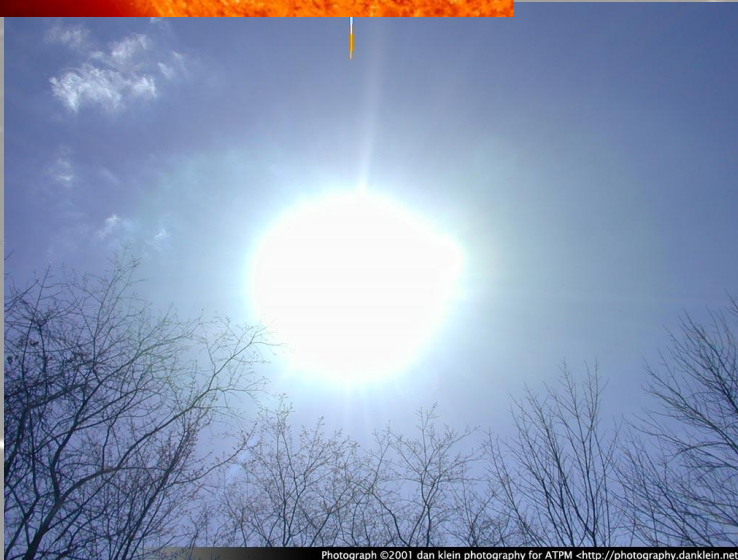


Gwiazdy o masie:

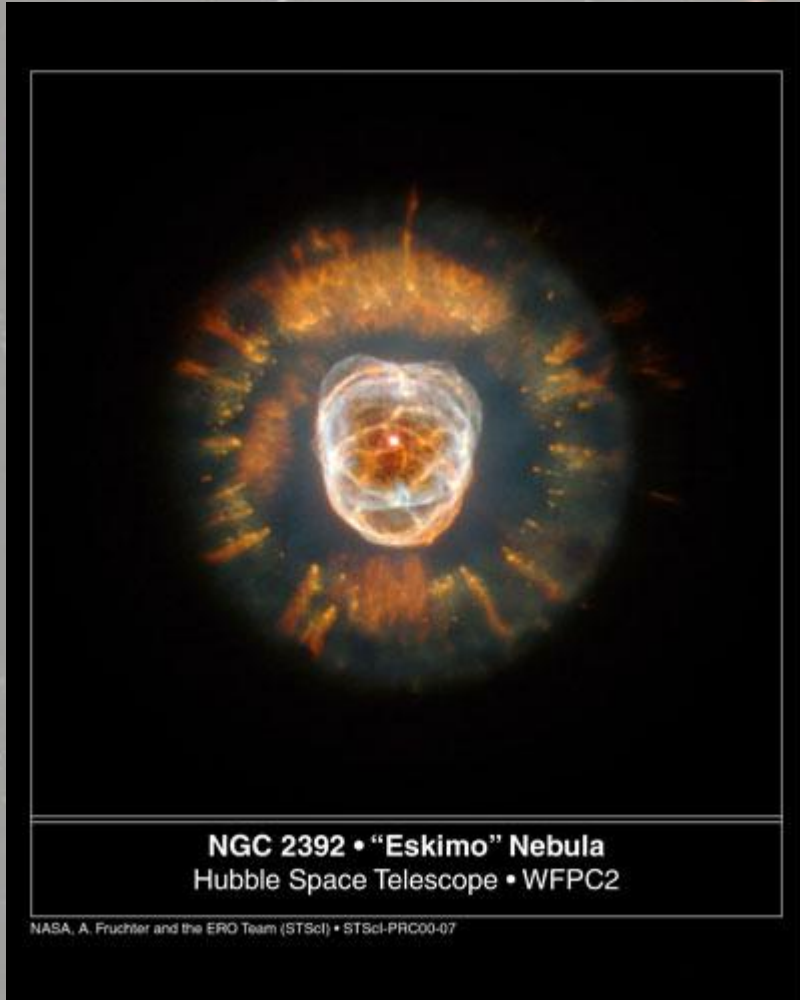
$$0,4 M_{\odot} < M < 1.5 M_{\odot}$$

Typowym przykładem jest nasze Słońce

Po wypaleniu wodoru we wnętrzu gwiazda kurczy się i rozgrzewa w centrum do temperatury ponad 100 milionów kelwinów – zaczynają się reakcje syntezy węgla



Końcowe etapy życia gwiazd – małe masy

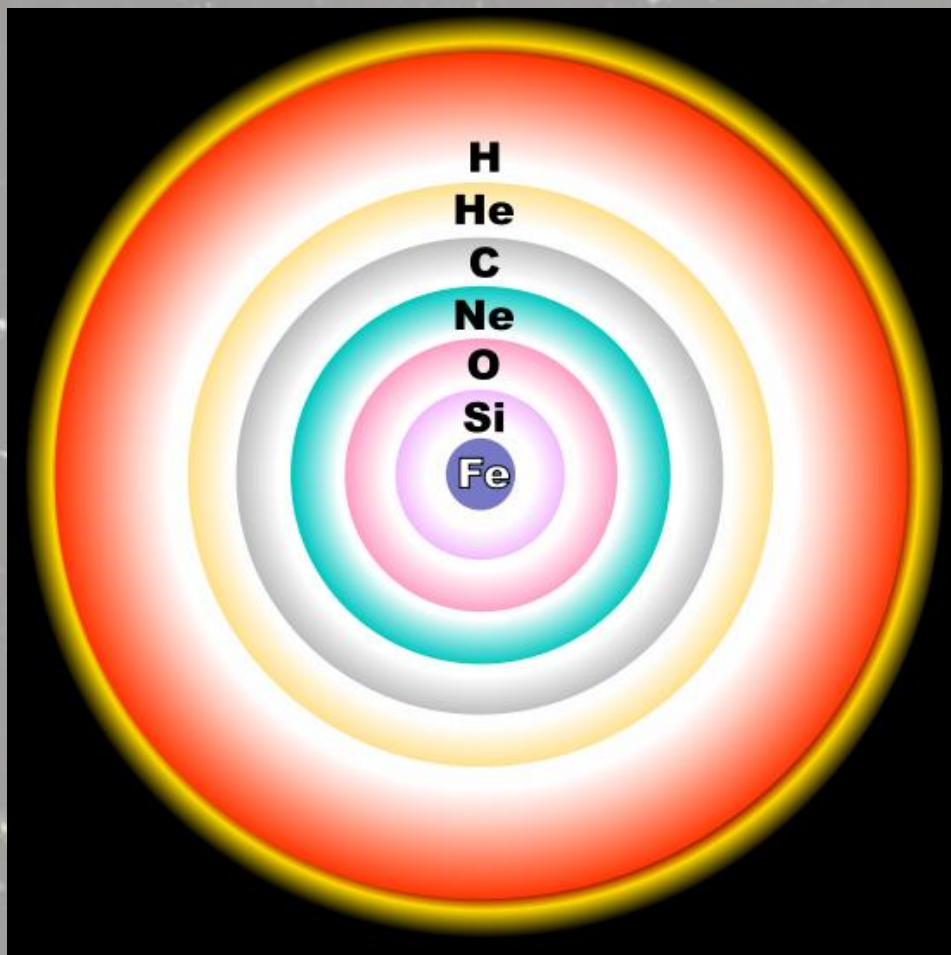


W pewnym momencie kończy się hel i zapadanie jądra trwa aż do etapu białego karła.

Biały karzeł jest jądrem gwiazdy, które ma ogromną temperaturę i wielką gęstość.

Zewnętrzne warstwy oddalają się od jądra i w pewnym momencie rozświetlają dzięki promieniowaniu ultrafioletowemu pochodzącemu od gorącego białego karła – obserwujemy tzw. mgławice planetarne.

Końcowe etapy życia gwiazd – duże masy



Początkowo ewoluują podobnie jak gwiazdy o mniejszych gwiazdach

Po wypaleniu wodoru i helu gwiazda ma na tyle dużą masę, że po zapadnięciu się jądra temperatura może wzrosnąć do wartości umożliwiającej zapalenie węgla i przemianę w neon, następnie (po kolejnym zapadaniu) neon przemienia się w tlen, tlen w krzem, a krzem w żelazo.

Gwiazda przechodzi etap, w którym przypomina cebulę. W różnych jej warstwach spalane są różne pierwiastki

Końcowe etapy życia gwiazd – duże masy



Dalsza ewolucja zależy od tego jak masywne jest jądro.

Jeżeli jego masa nie przekracza $1.4 M_{\odot}$ to gwiazda kończy jako biały karzeł.

Gdy masa jądra jest większa to jego kurczenie nie jest zatrzymywane przez degenerację materii i kurczenie trwa aż do momentu gdy elektrony zostaną „wciśnięte” w jądra atomów żelaza.

W wyniku tego powstaje gwiazda zbudowana z samych neutronów – gwiazda neutronowa.

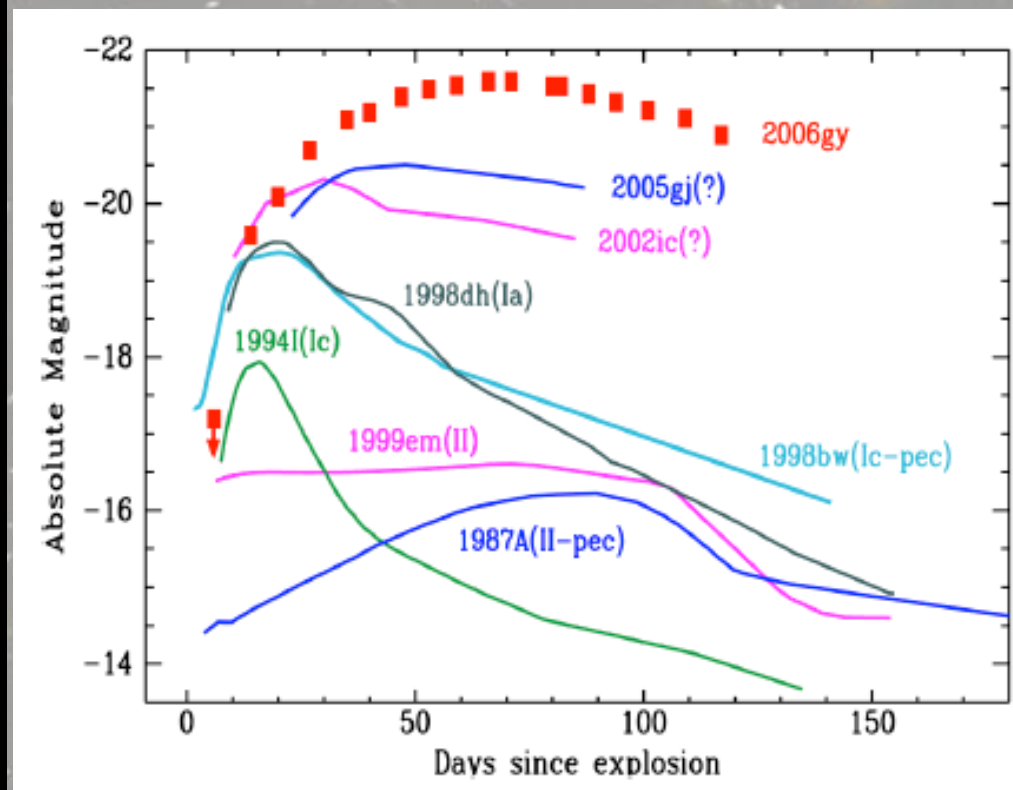
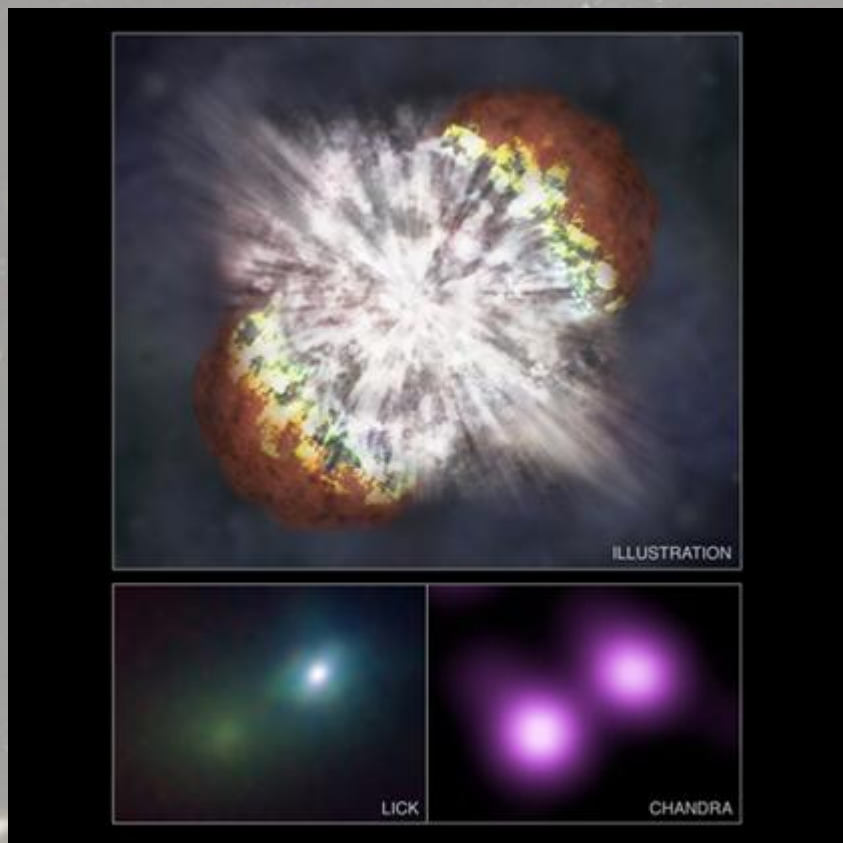
Podczas tego procesu obserwuje się wybuch supernowej



© Anglo-Australian Observatory

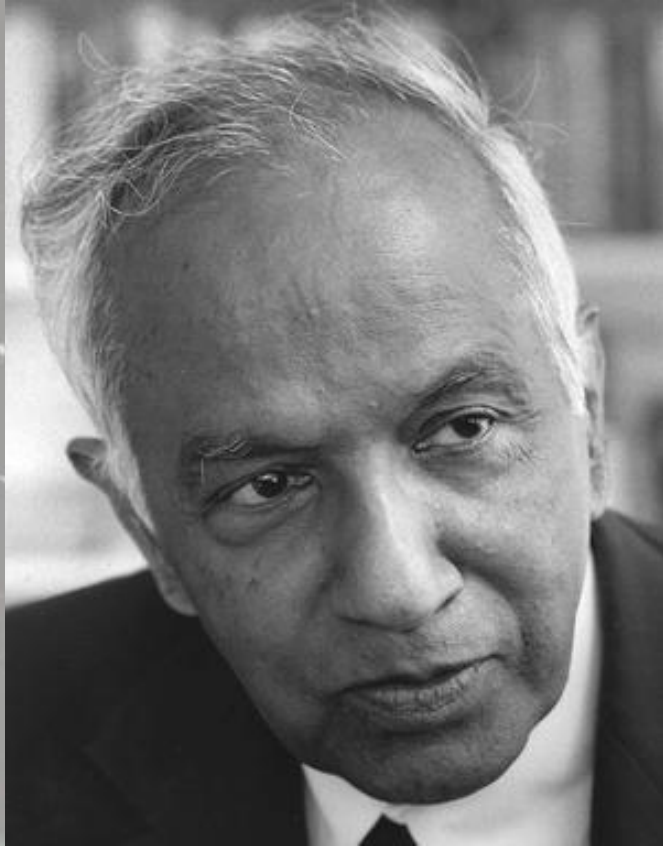
Wybuch supernowej 1987 w LMC

Końcowe etapy życia gwiazd – duże masy



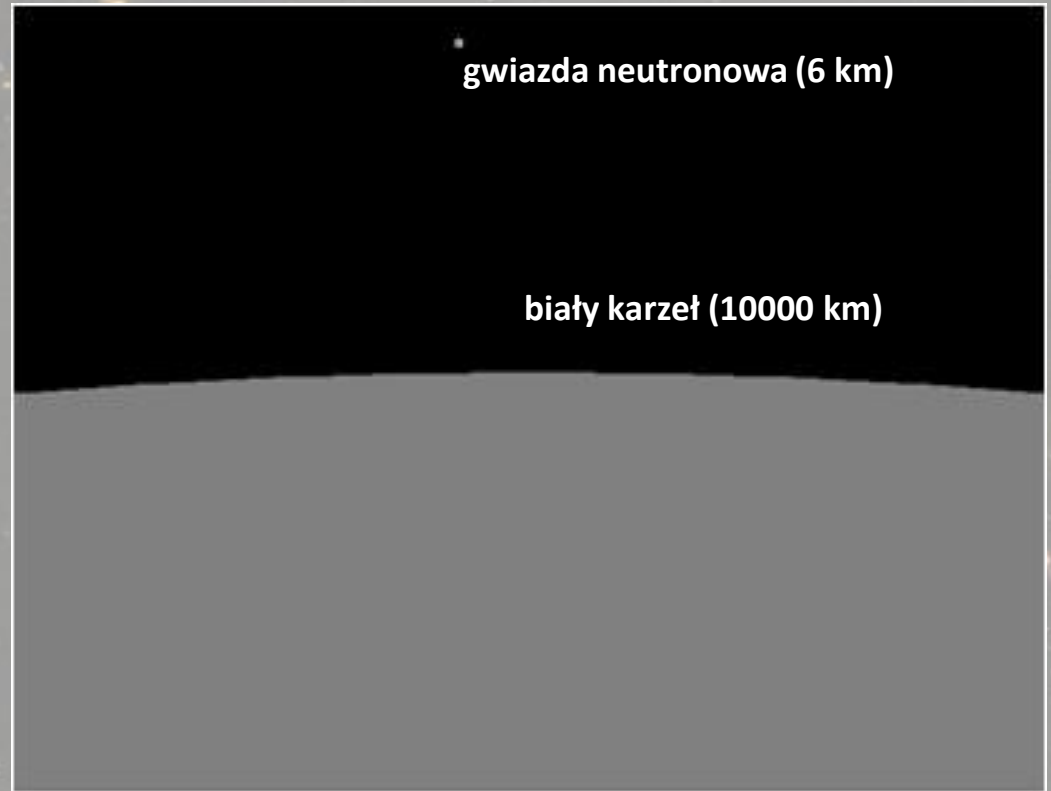
Jasność supernowych w maksimum jest różna i zależy od wielu czynników – nie nadają się na świece standardowe. Jest jeden wyjątek – supernowe typu Ia

Biały karzeł a gwiazda neutronowa



19.10.1910 r. – 21.08.1995 r.

Górny limit na masę białego karła: $\sim 1.4 M$

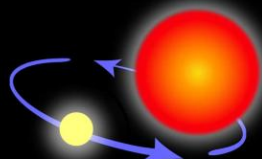


Ewolucja w układzie podwójnym

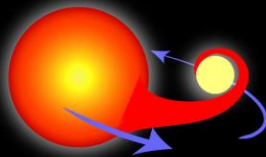
The progenitor of a Type Ia supernova



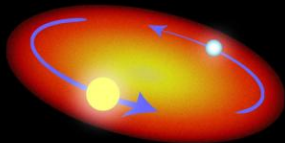
Two normal stars are in a binary pair.



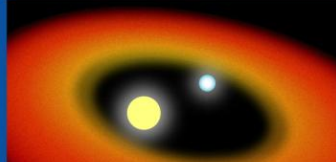
The more massive star becomes a giant...



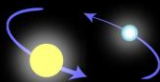
...which spills gas onto the secondary star, causing it to expand and become engulfed.



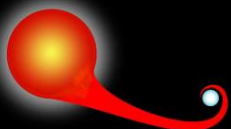
The secondary, lighter star and the core of the giant star spiral inward within a common envelope.



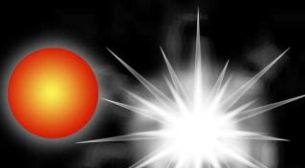
The common envelope is ejected, while the separation between the core and the secondary star decreases.



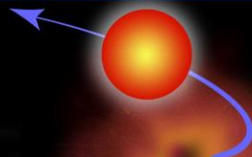
The remaining core of the giant collapses and becomes a white dwarf.



The aging companion star starts swelling, spilling gas onto the white dwarf.



The white dwarf's mass increases until it reaches a critical mass and explodes...



...causing the companion star to be ejected away.

Gwiazdy stosunkowo rzadko żyją samotnie

W odpowiednio ciasnych układach podwójnych ewolucja może przebiegać nieco inaczej

Przyczyną jest masa przepływająca między składnikami

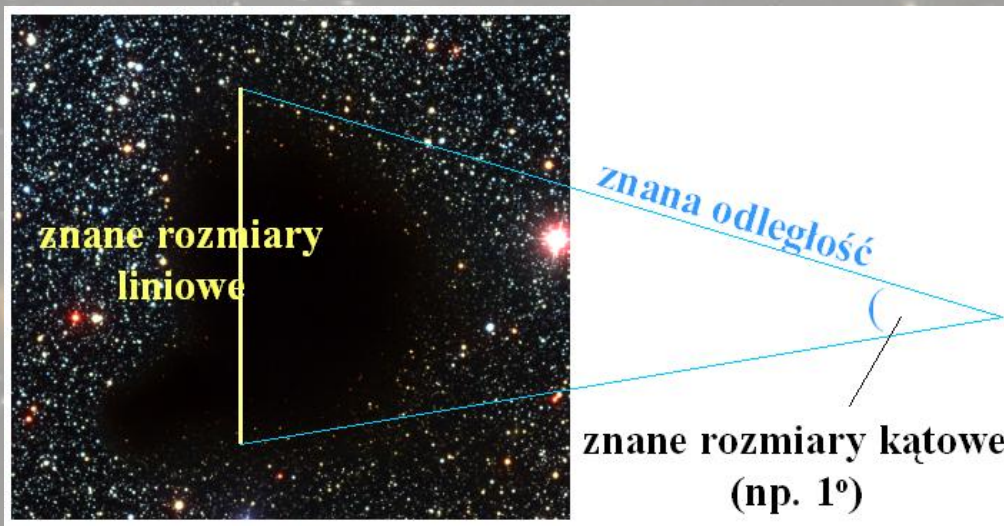
W końcowym etapie życia biały karzeł dostaje dodatkową masę, która powoduje przekroczenie masy Chandrasekhara

Eksplodujące w ten sposób gwiazdy mają zawsze taką samą masę.

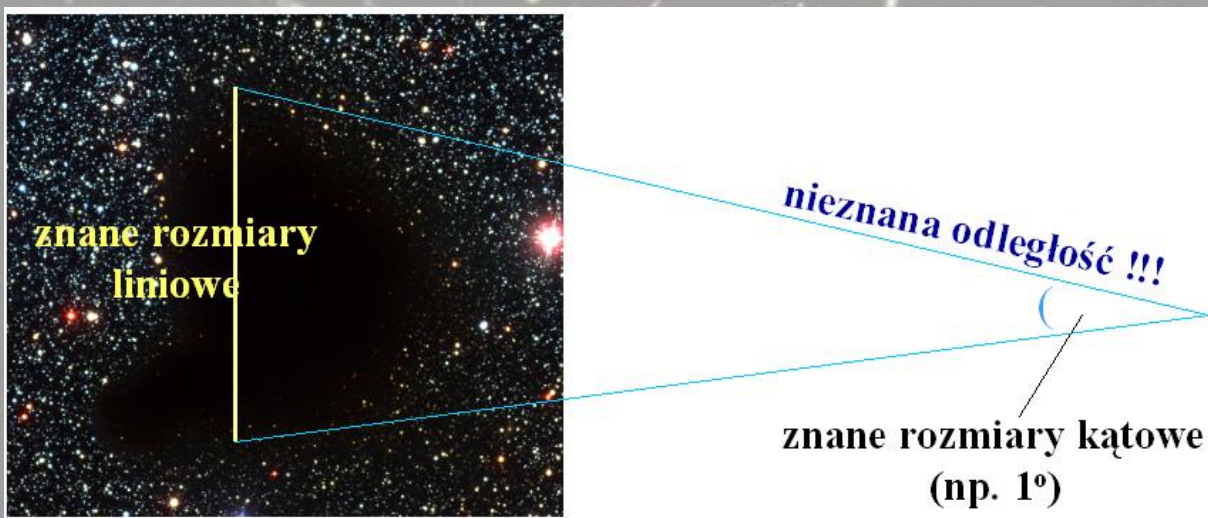
Są też bardzo jasne – doskonałe świece standardowe (dają pomiary odległości około 500 razy większe niż w przypadku cefeid)

Pręty miernicze

Szukamy obiektów o znanych, charakterystycznych rozmiarach liniowych



Pomiar rozmiaru katowego pozwala wyznaczyć odległość



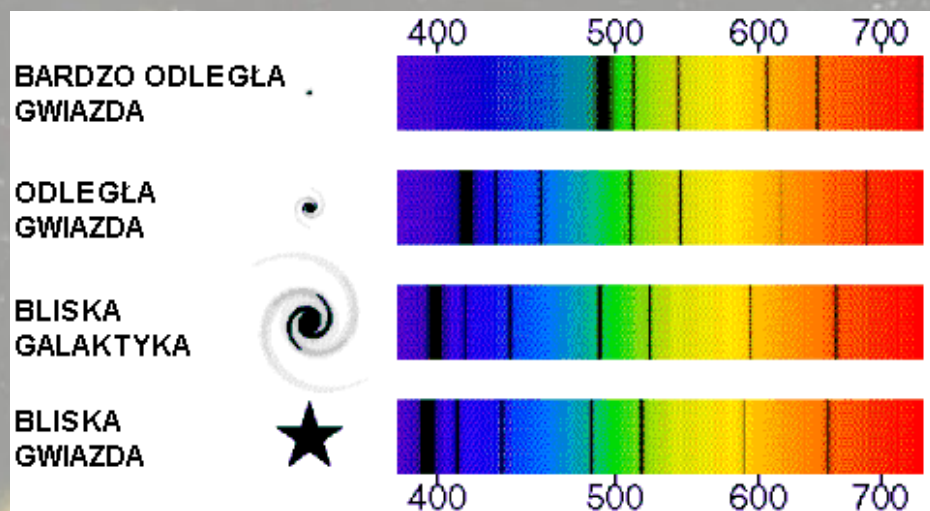
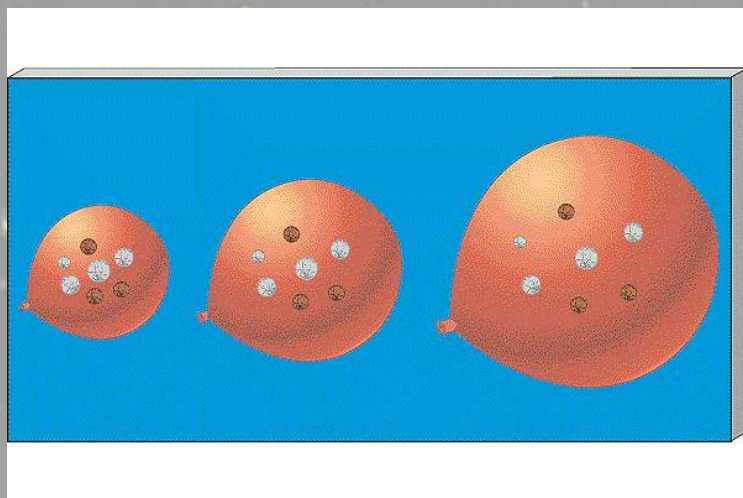
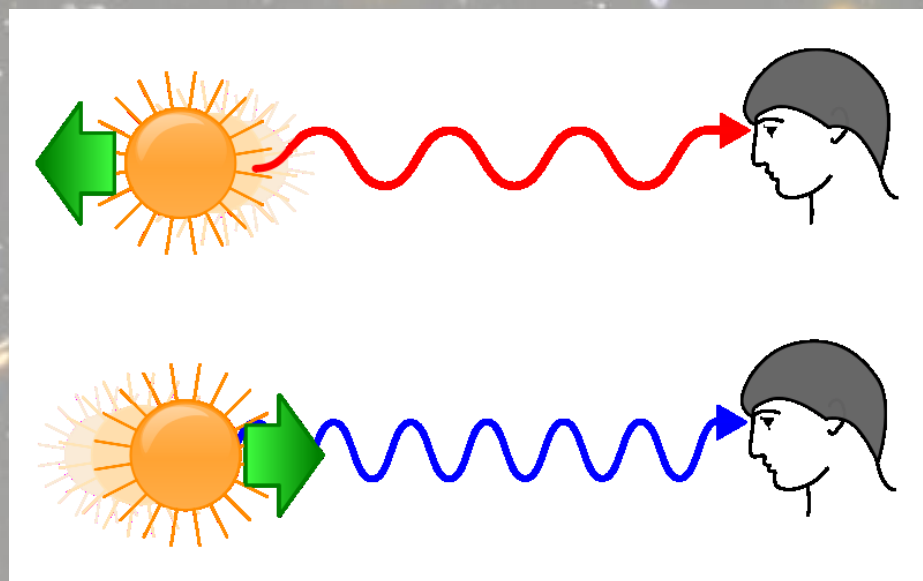
Ta metoda pozwala wyznaczyć odległości rzędu 200 Mpc

Odległości kosmologiczne

Efekt Dopplera związany jest z ruchem źródła lub/i obserwatora

Obserwowane jest przesunięcie ku długofalowej (oddalanie) lub krótkofalowej (zbliżanie) części widma

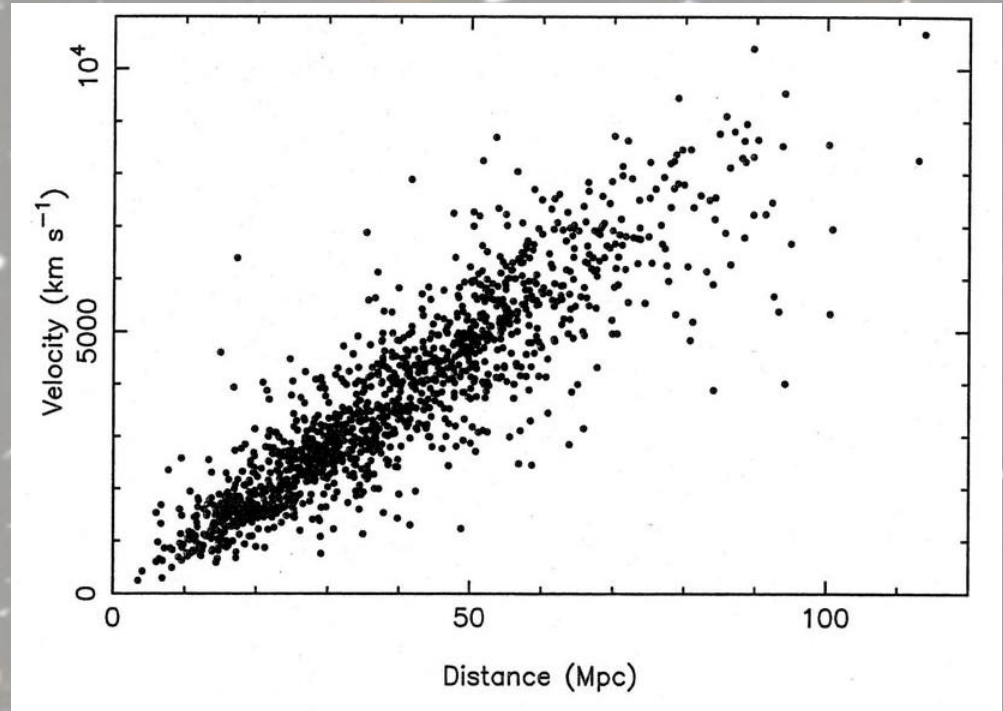
W przypadku odległości kosmologicznych poczerwienienie jest związane z ekspansją Wszechświata



Odległości kosmologiczne



Edwin Hubble
(20.11.1889 r. – 28.09.1953 r.)



$$v = H_0 r \quad H_0 = 73 \pm 3 \text{ km/s/Mpc}$$

Im dalsza galaktyka tym większa prędkość oddalania się od nas

Mierzymy odległości w całym widzialnym Wszechświecie

