

Astronomia współczesna

Pomiar odległości w kosmosie

Znaczenie

400 lat temu nie znaliśmy odległości do Słońca

200 lat temu nie znaliśmy odległości do najbliższych gwiazd

100 lat temu nie znaliśmy odległości do najbliższych galaktyk

Przykład z błyskami gamma

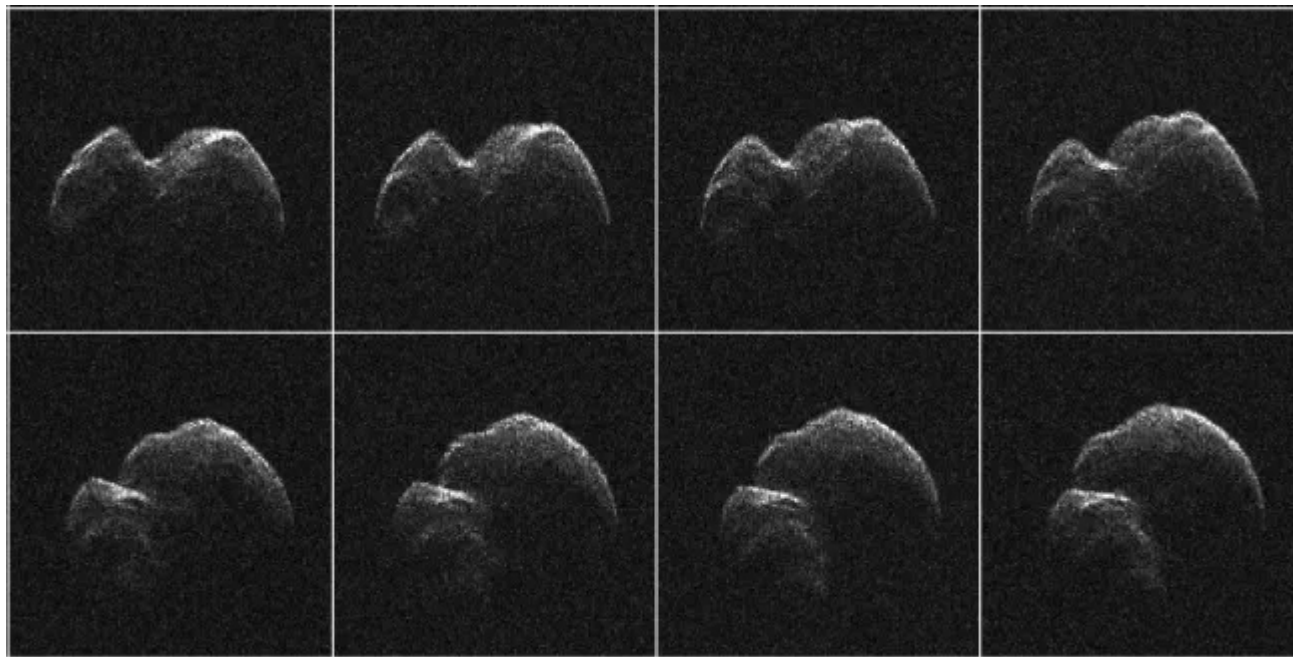
Odkryte w 1967 za pomocą satelitów wojskowych Vela.

Nie było wiadomo czy pochodzą z Układu Słonecznego, sąsiednich gwiazd, naszej Galaktyki, sąsiednich galaktyk czy z odległych rejonów Wszechświata. Każda z tych możliwości oznacza jednak drastycznie inną ilość energii i przez to wymaga zupełnie innego mechanizmu produkcji.

Dopiero pomiar odległości w 1997r umożliwił zrozumienie czym one są.

Metody laserowe / radarowe

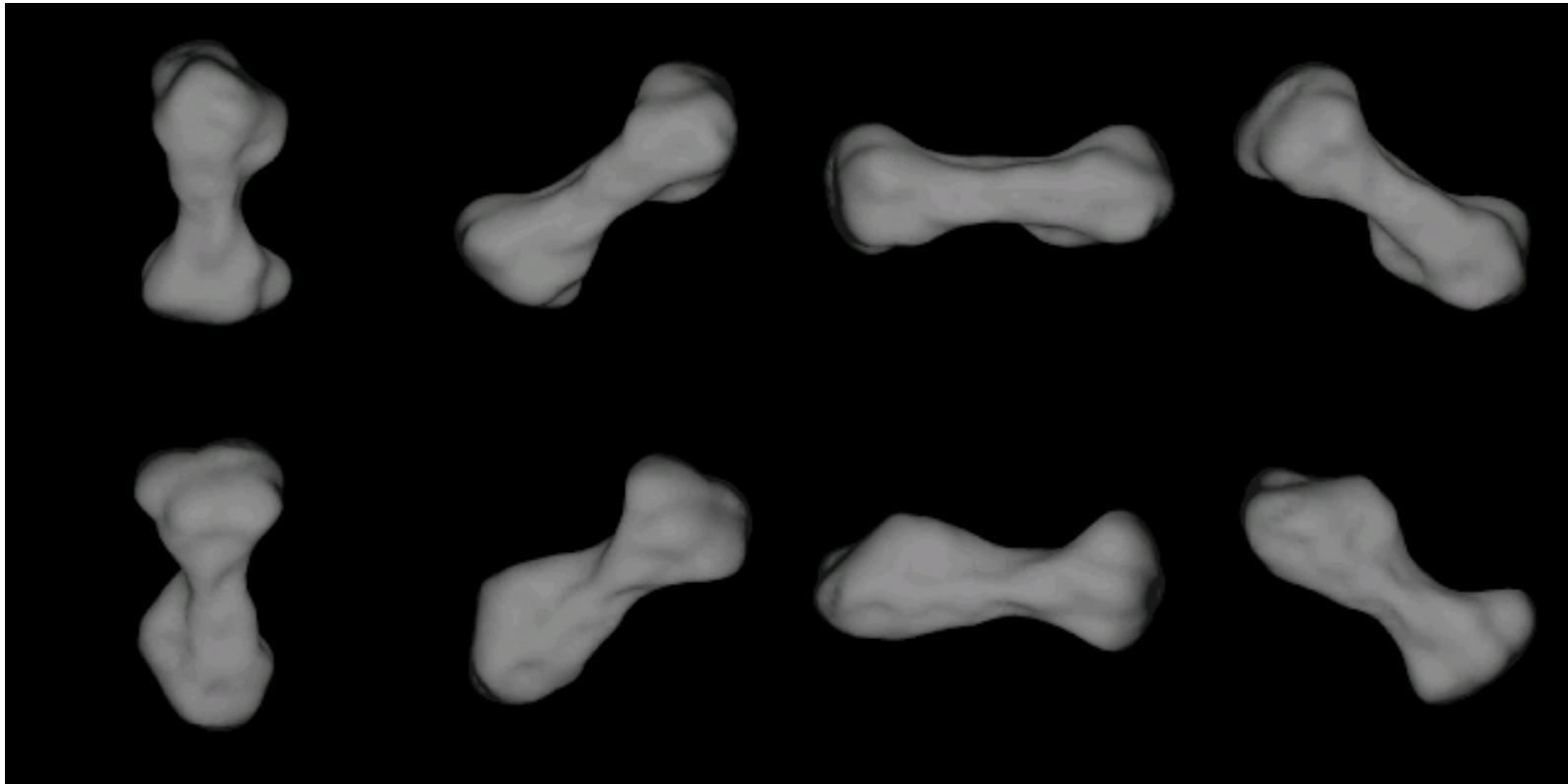
- bazują na pomiarze czasu lotu światła / fal radiowych po odbiciu
- tylko w Układzie Słonecznym
- obiekty naturalne – tylko bardzo bliskie ciała:
 - planetoidy zbliżające się do Ziemi
 - Księżyc
 - pobliskie planety
- obiekty nienaturalne – sztuczne satelity, sondy kosmiczne



Planetoida typu NEA oznaczona jako 2014 JO25 zarejestrowana za pomocą 70m radaru Goldstone (Kalifornia) w 2017r.

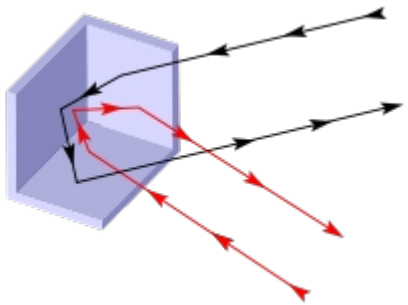
Planetoida ma rozmiar ok. 1km i była obserwowana z odległości 1.8 mln km.

Pomiary radarowe

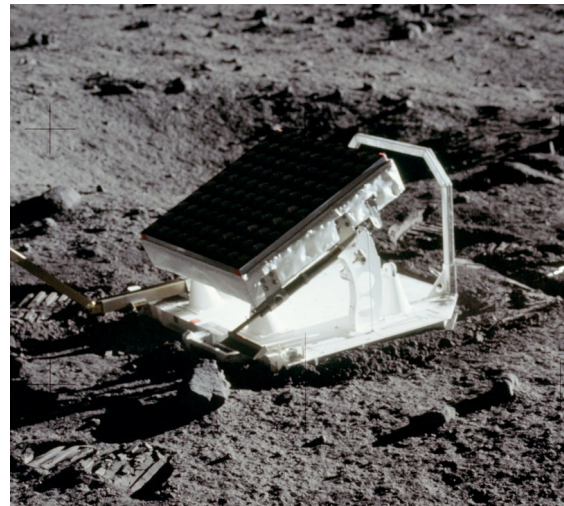


Model komputerowy planetoidy 216 Kleopatra o długości ok 250km stworzony na podstawie obserwacji radarowych z Arecibo opublikowane w 2000r. Radar nie wykrył znanych obecnie dwóch księżyców planetoidy o rozmiarach ok 8km.

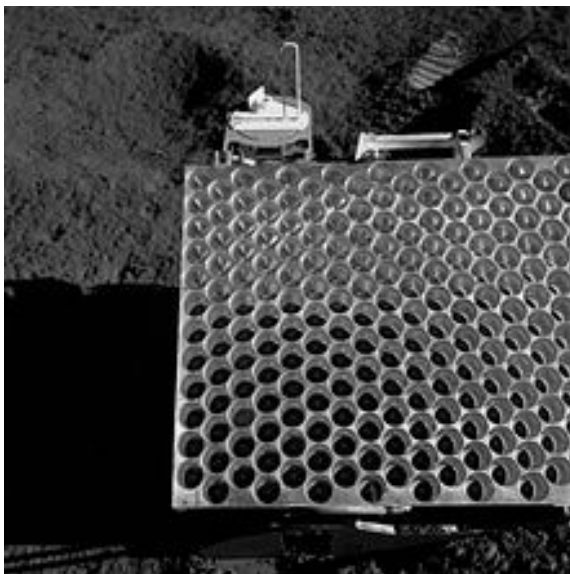
Pomiary laserowe



Retroreflektor (odbłyśnik)



Retroreflektor z misji Apollo 11

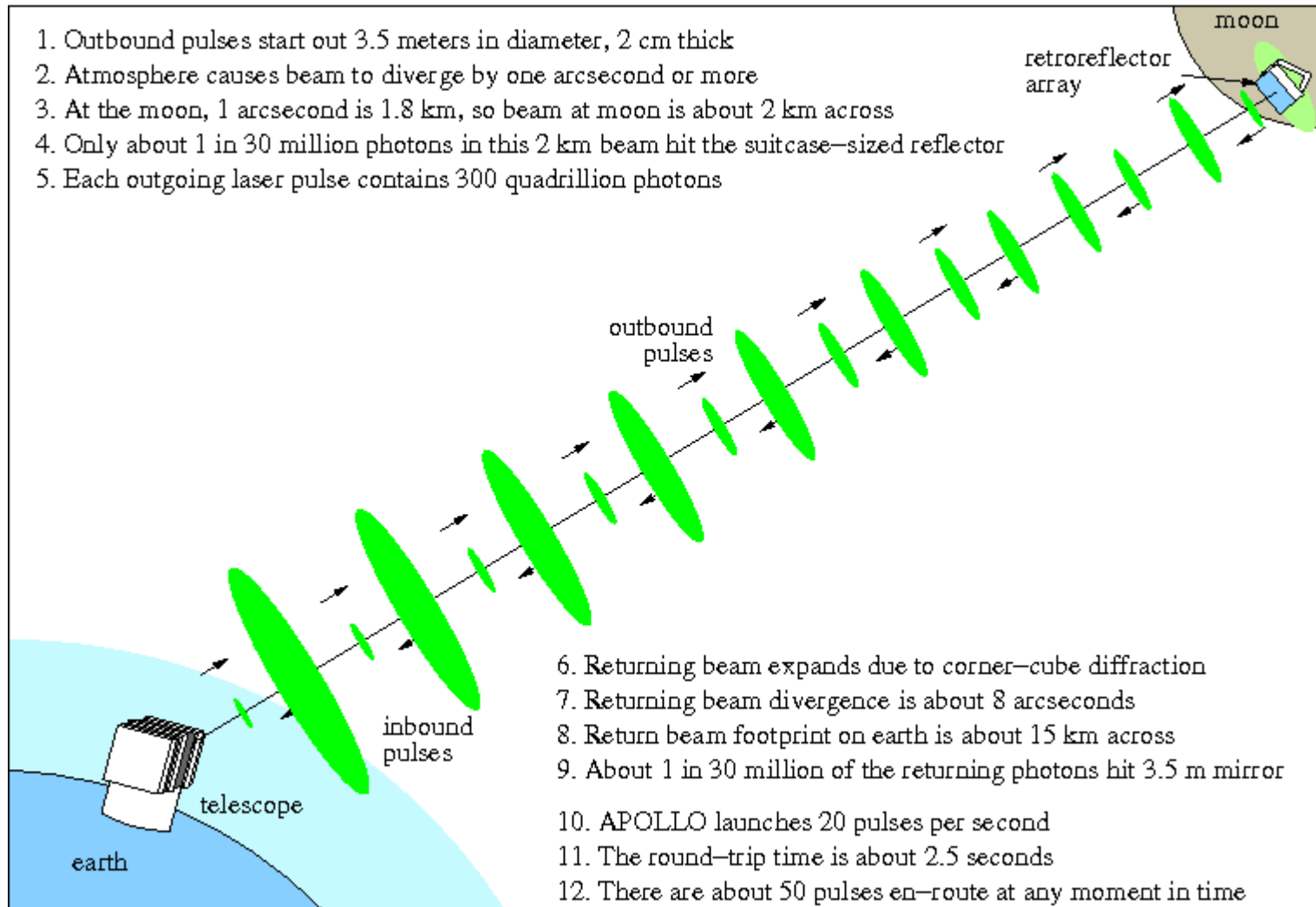


Retroreflektor z misji Apollo



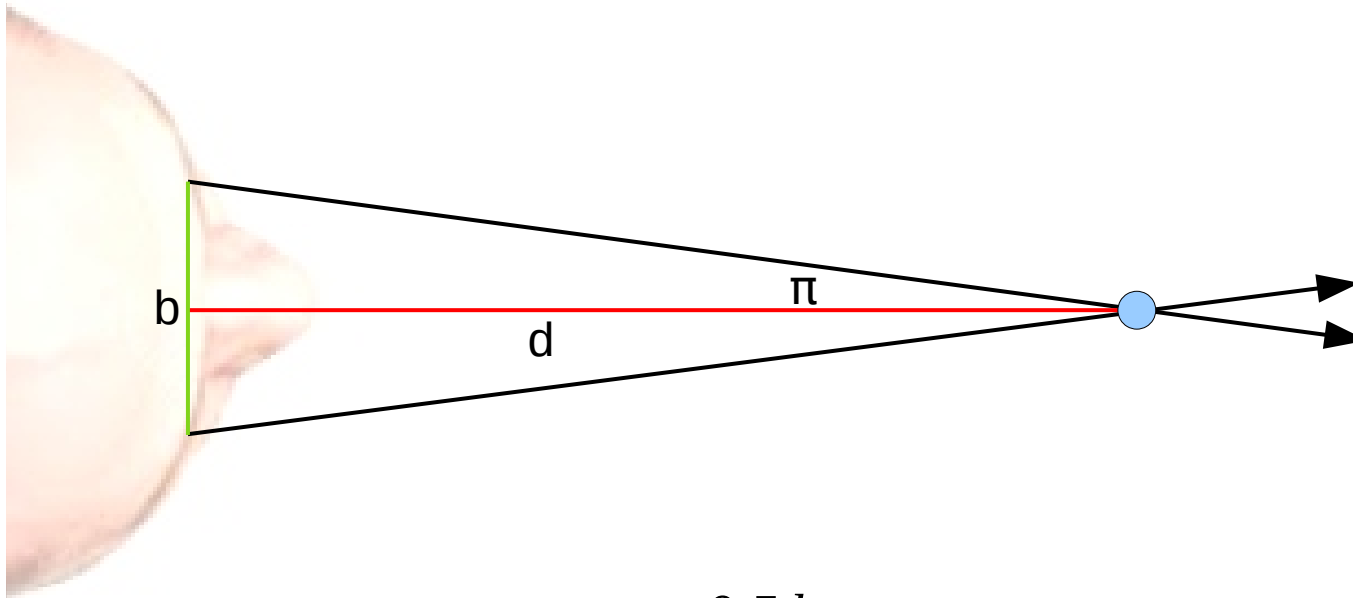
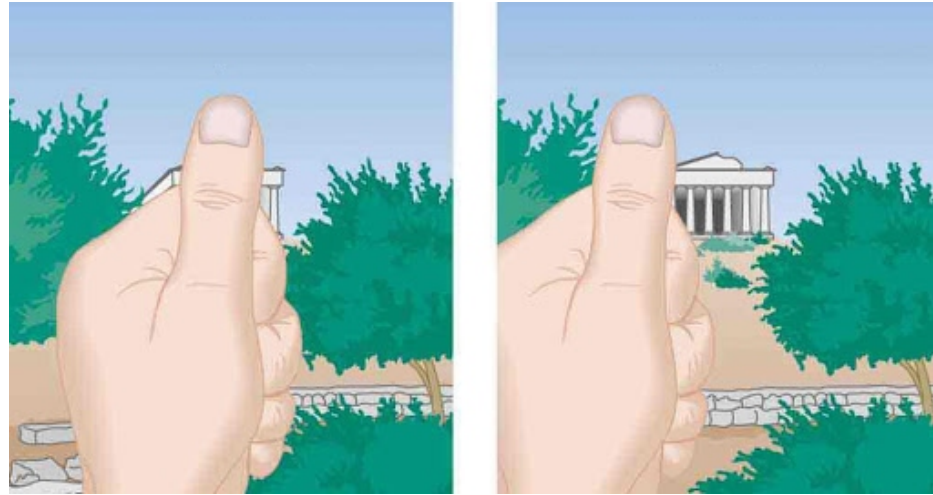
Pomiary odległości na stacji laserowej

Pomiary laserowe



Tylko 1 na 900 bln fotonów ma szansę wrócić do detektora w teleskopie odbiorczym.

Metody paralaktyczne



$$\operatorname{tg} \pi = \frac{0.5 b}{d}$$

Metody paralaktyczne



Księżyc widoczny z Ziemi w pewnym momencie czasu z południka 0° .

Metody paralaktyczne



Księżyc widoczny z Ziemi w tym samym momencie czasu z południka 10° .

Metody paralaktyczne

Przypadek Księżyca – jedna z największych paralaks w astronomii

$$\bar{d} = 384\,400 \text{ km}$$

$$b = 1\,000 \text{ km}$$

$$\pi = 0.075 \text{ st}$$

Przybliżenie dla małych kątów paralaktycznych

$$\operatorname{tg} \pi \approx \pi [\text{rad}]$$

$$\pi [\text{rad}] = \frac{0.5 b}{d}$$

Przypadek Słońca – za dnia nie widać innych gwiazd!

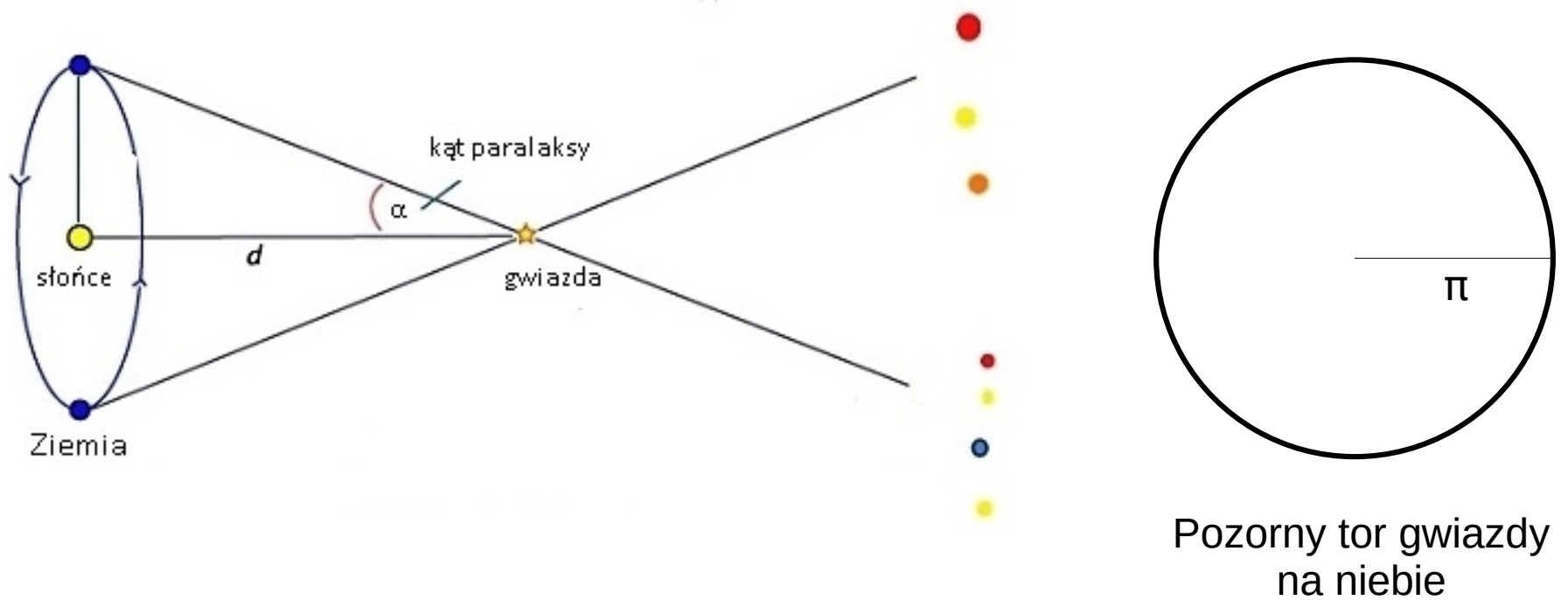
Mierzono paralaksę do bliskich planet i planetoid,
a potem wyliczano odległość Ziemia-Słońce z III prawa Keplera.

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G(M+m)}{4\pi^2}$$

$$m \ll M$$

$$\frac{a_1^3}{T_1^2} = \frac{a_2^3}{T_2^2}$$

Paralaksa heliocentryczna



$$\pi[\text{rad}] = \frac{0.5b}{d}$$

$$b = 1 \text{ AU}$$

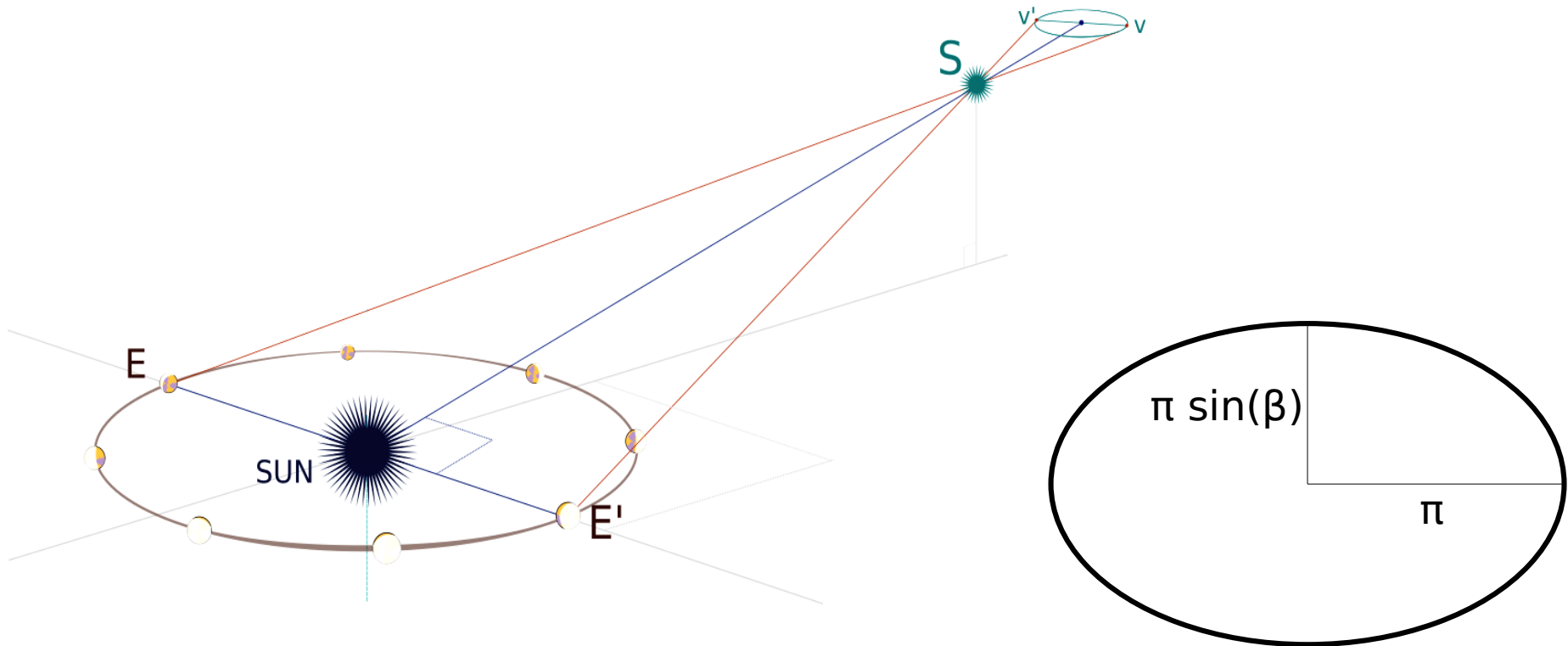
$$\pi - ['']$$

$$d - [\text{pc}]$$

$$\pi [''] = \frac{1}{d [\text{pc}]}$$

Paralaksa heliocentryczna

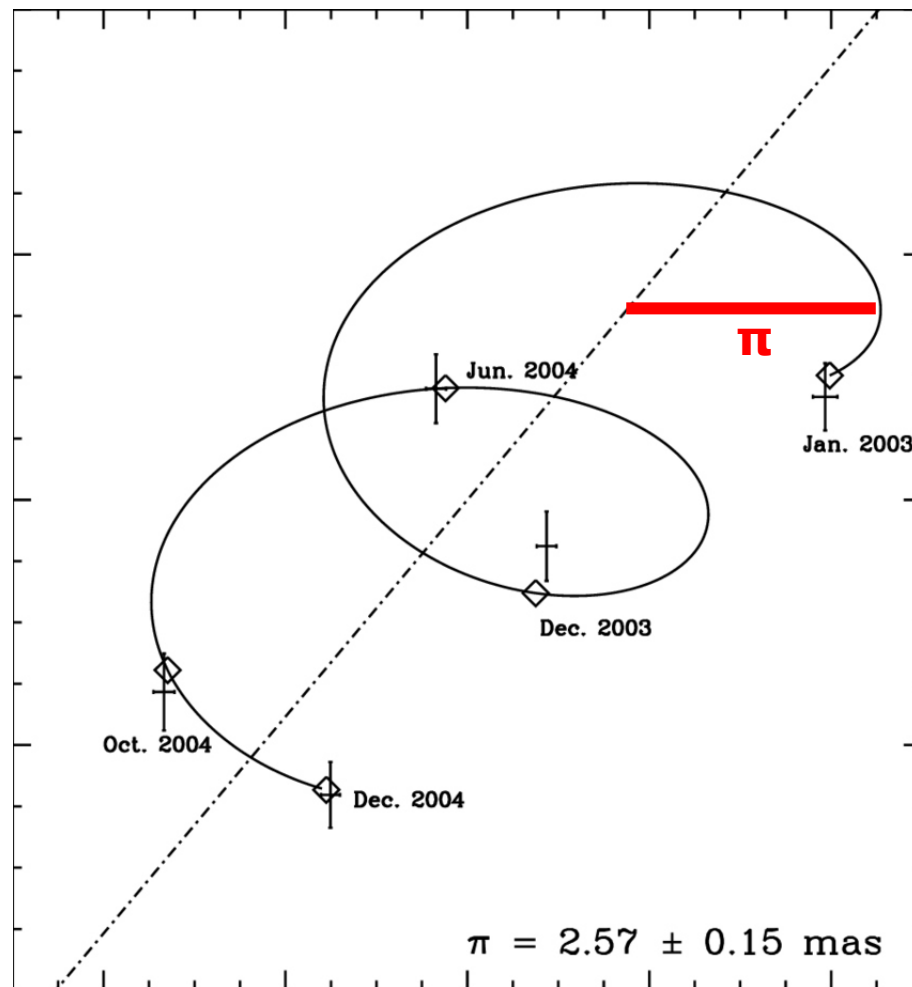
Ponieważ orbita Ziemi nie jest kołowa,
a gwiazdy rzadko kiedy obserwujemy prostopadle do orbity Ziemi,
kąąt paralaksy jest zmienny w czasie,
a gwiazdy zakreślają na niebie tor o kształcie elipsy.



Pozorny tor gwiazdy
na niebie

Paralaksa heliocentryczna

Dodatkowo ponieważ Układ Słoneczny oraz gwiazdy poruszają się w przestrzeni kosmicznej więc obserwowany tor ruchu gwiazd na niebie jest złożeniem eliptycznych pętli oraz liniowego ruchu postępowego.



Obserwowany tor ruchu gwiazdy na niebie na przestrzeni ok 2 lat.

Paralaksa heliocentryczna

Limit dokładności metody paralaksy heliocentrycznej

$$d [pc] = \frac{1}{\pi ['']}$$

Typowa dokładność pomiaru pozycji we współczesnym teleskopie naziemnym wynosi ok 0.01" (choć są metody by to polepszyć).

Przykładowo jeśli zmierzymy paralaksę $0.02'' \pm 0.01''$ to:

$$\pi = 0.02'' \rightarrow d = 33 - 100 pc$$

Typowe pomiary z powierzchni Ziemi dają więc dokładność ok. $\pm 10\%$ do odległości ok. 10 pc.

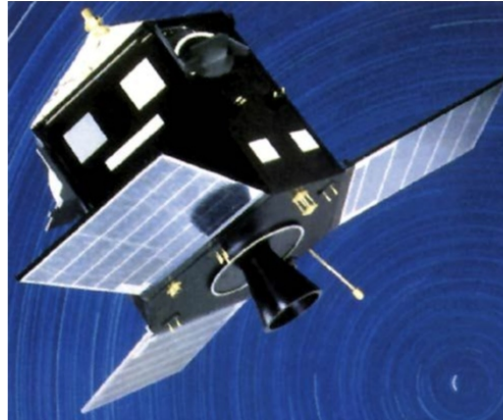
W odległości do 10 pc znamy ok 400 gwiazd.

W Galaktyce jest szacunkowo ok 400 000 000 000 gwiazd.

Paralaksa heliocentryczna

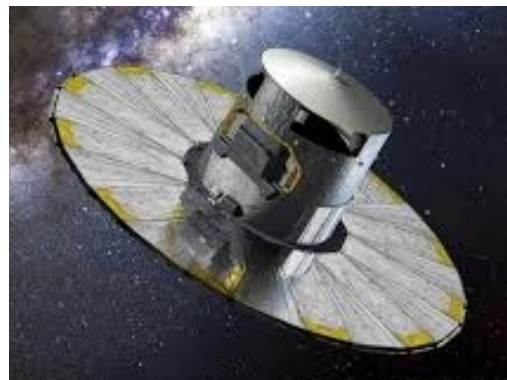
Teleskop kosmiczny Hipparcos (1989-93)

100 000 gwiazd z pomiarem paralaksy z dokładnością co najmniej 0.001"
(10% do 100pc)

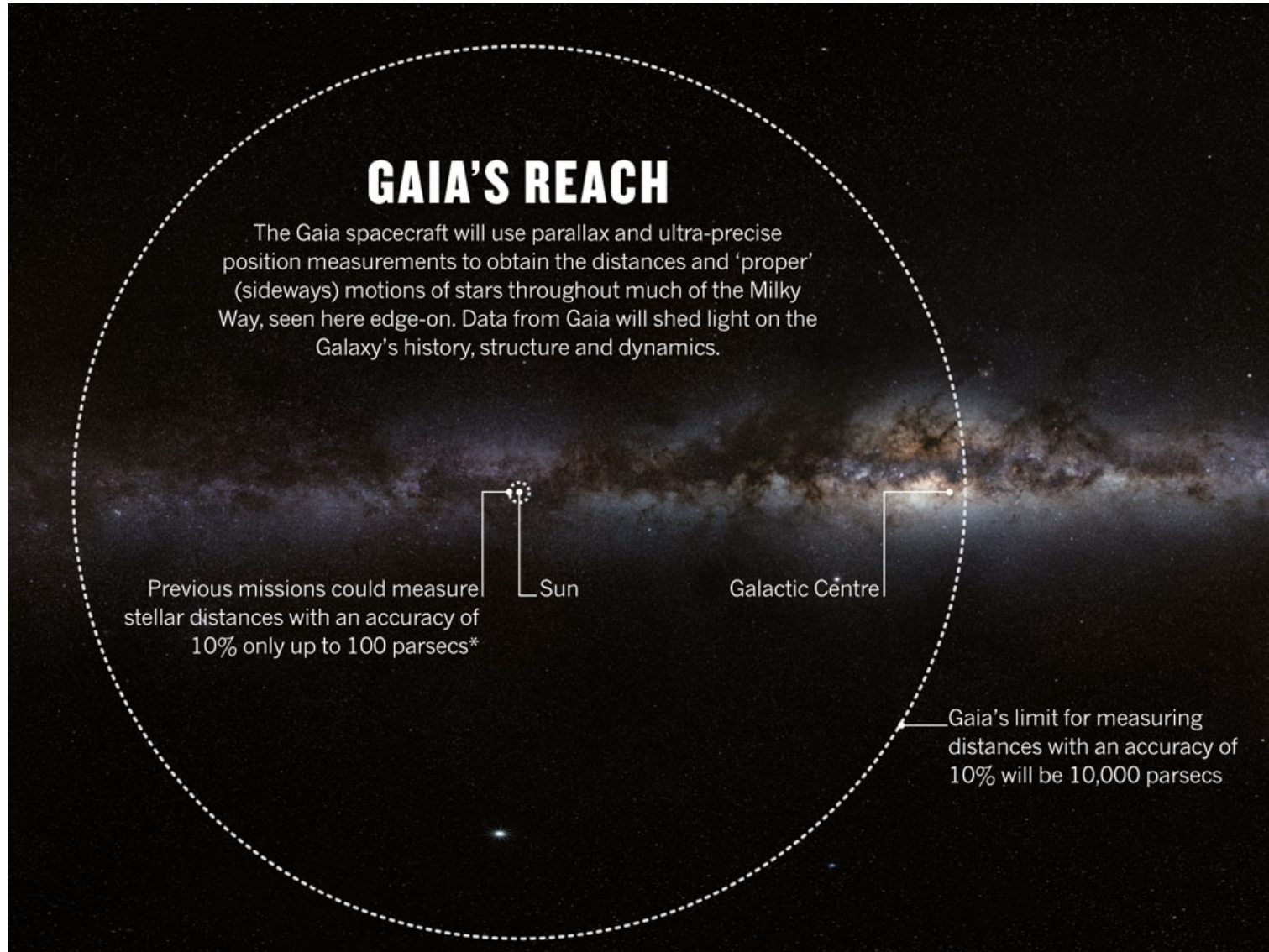


Teleskop kosmiczny Gaia (2013-22)

Ok. miliard gwiazd z pomiarem paralaksy z dokładnością co najmniej 0.00001"
(10% do 10000pc)

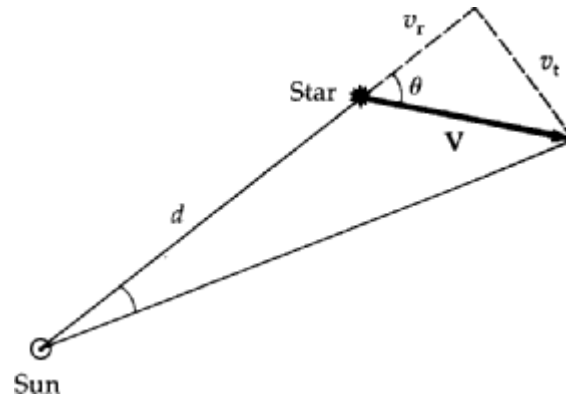


Paralaksa heliocentryczna



Porównanie zasięgu pomiaru odległości z dokładnością 10% dla teleskopów kosmicznych Hipparcos i Gaia (planowany).

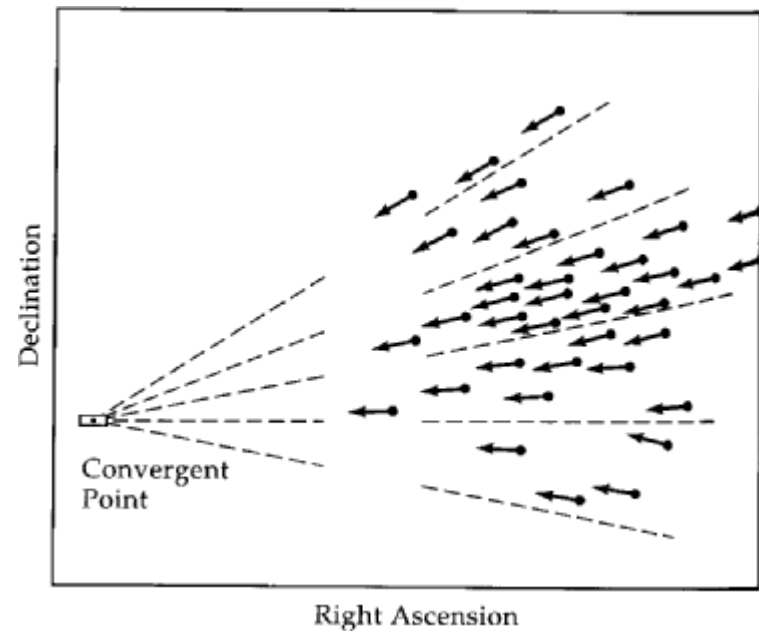
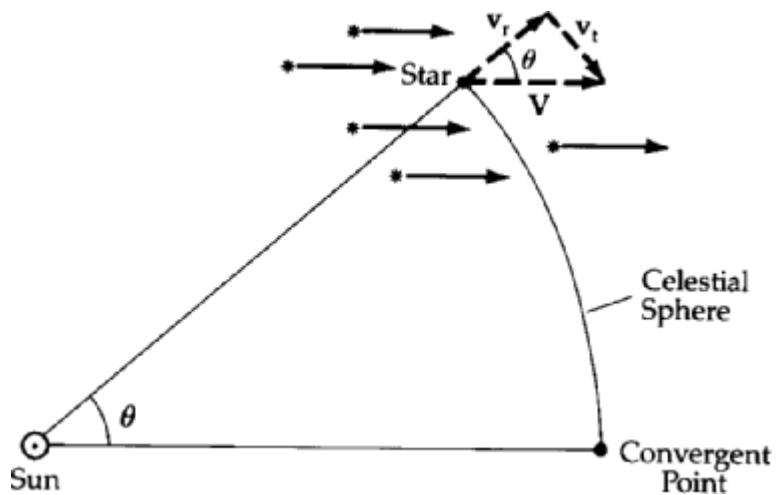
Paralaksa ruchoma (dla gromady gwiazd)



Dla pojedynczej gwiazdy łatwo zmierzyć prędkość radialną v_r w km/s.

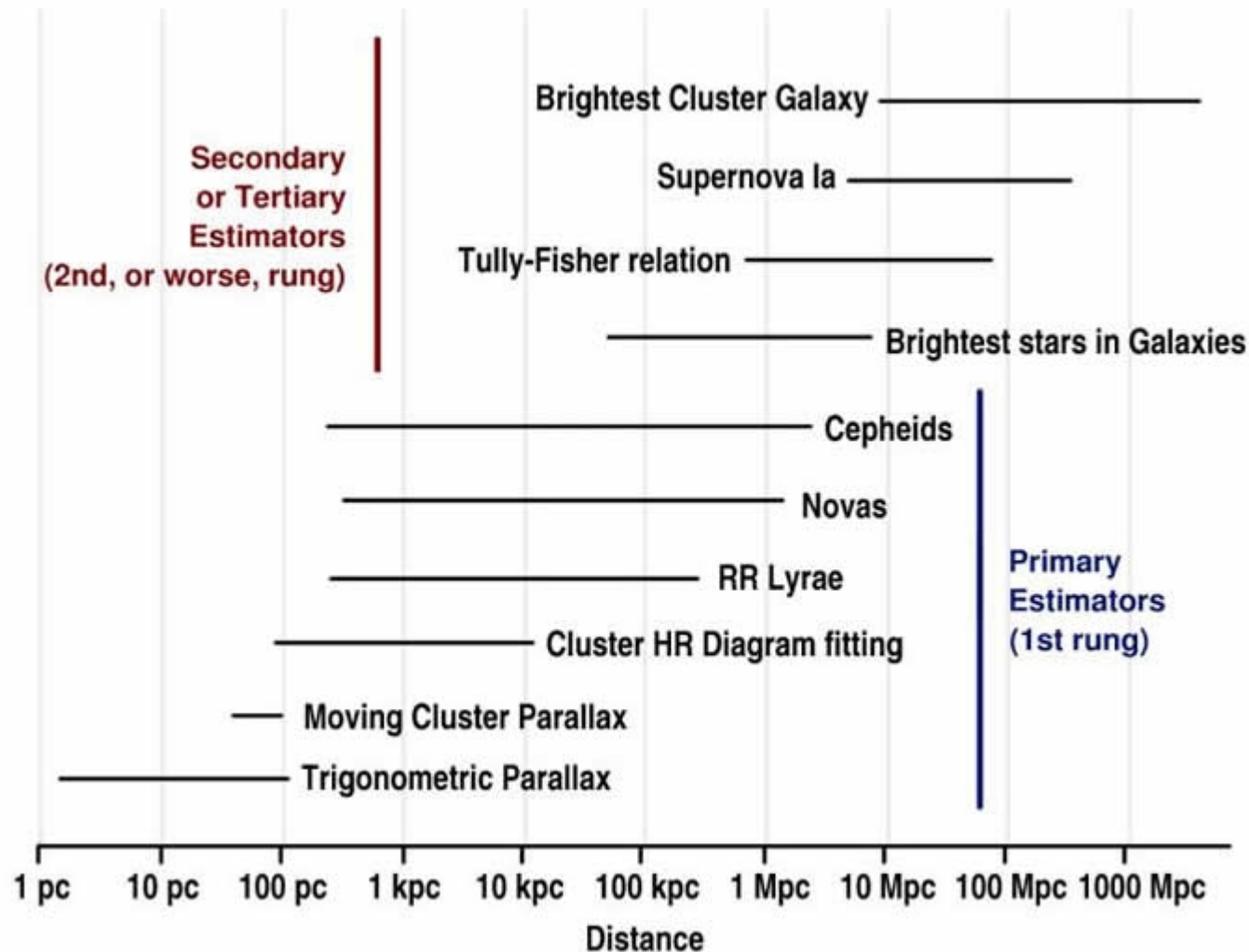
Dla gromady możemy zmierzyć kąt pod jakim poruszają się gwiazdy w 3D!

Łącząc to z pomiarami prędkości kątowej na niebie można wyznaczyć odległość.



Założenie – gwiazdy w gromadzie poruszają się równoległe do siebie.

Kosmiczna drabina pomiarów odległości



W astronomii pomiary odległości do obiektów odległych zależą od pomiarów do obiektów bliższych. Na skutek kumulacji błędów najodleglejsze obiekty jesteśmy w stanie jedynie szacować z niewielką odległością np. 50%.

Odległość a jasność obserwowana (przypomnienie)

Jasność obserwowana dowolnego obiektu w przyrodzie zależy od trzech czynników:

Mocy promieniowania – im większa moc tym większa jasność obserwowana

Odległości – im większy kwadrat odległości tym mniejsza jasność obserwowana

Stopnia pochłaniania światła pomiędzy obiektem a obserwatorem, im większe pochłanianie tym mniejsza jasność obserwowana

Gwiazda o tej samej jasności obserwowanej na niebie może być bardzo jasnym obiektem daleko stąd, albo przeciętniakiem który jest blisko nas.

Odległość a jasność obserwowana (przypomnienie)

Jasność obserwowana m wyraża się wzorem:

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

m – jasność obserwowana na niebie
(w magnitudo czyli w wielkościach gwiazdowych, skrót mag)

M – jasność absolutna (też w magnitudo),
jest to jasność obserwowana jaką miałby obiekt na niebie
gdyby był w odległości 10pc ($M=0$ oznacza moc ok. $3 \cdot 10^{28}$ W)

d – odległość w parsekach (skrót: pc)

$$\text{Gdy } d=10 \text{ wówczas } m = M + A$$

A – ekstynkcja – sumaryczny efekt absorpcji i rozpraszania światła
w ośrodku pomiędzy obiektem a obserwatorem,
czyli całkowite osłabienie strumienia światła (też w magnitudo)

$$m = f(M, d, A)$$

Jeśli znamy M oraz A wówczas pomiar jasności na niebie m
pozwala wyliczyć odległość d !

Pomiary gwiazd

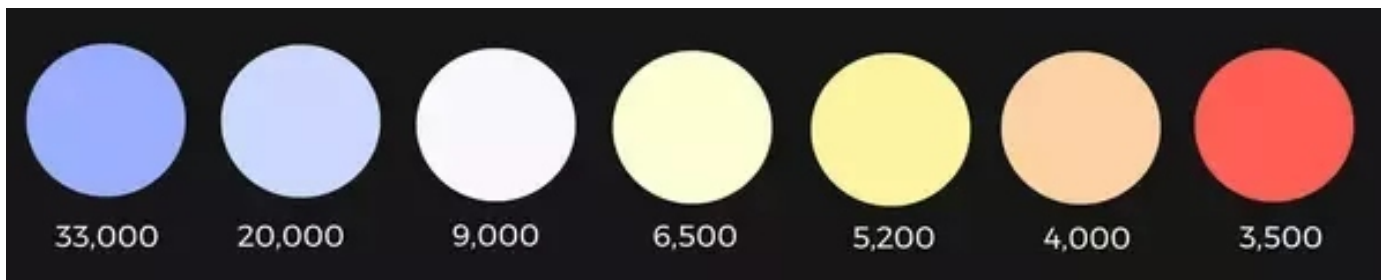
Skąd wziąć jasność absolutną (moc promieniowania) gwiazdy?
Np. z pomiaru jej temperatury i promienia.

$$m = f(M, d)$$

$$M = f(T, R)$$

$$m = f(T, R, d)$$

Temperaturę można określić mierząc barwę gwiazdy.



Niestety obserwowane barwy gwiazd są często zafałszowane przez poczerwienienie, któremu ulega światło wędrujące przez gaz i pył międzygwiazdowy.

Promień gwiazdy nie da się zmierzyć bezpośrednio, ale dla niektórych gwiazd można zmierzyć promień kątowy θ metodą interferometrii optycznej.

$$\text{jasność obserwowana } m = f(T, R, d)$$

$$\text{rozmiar kątowy } \theta = f(R, d)$$

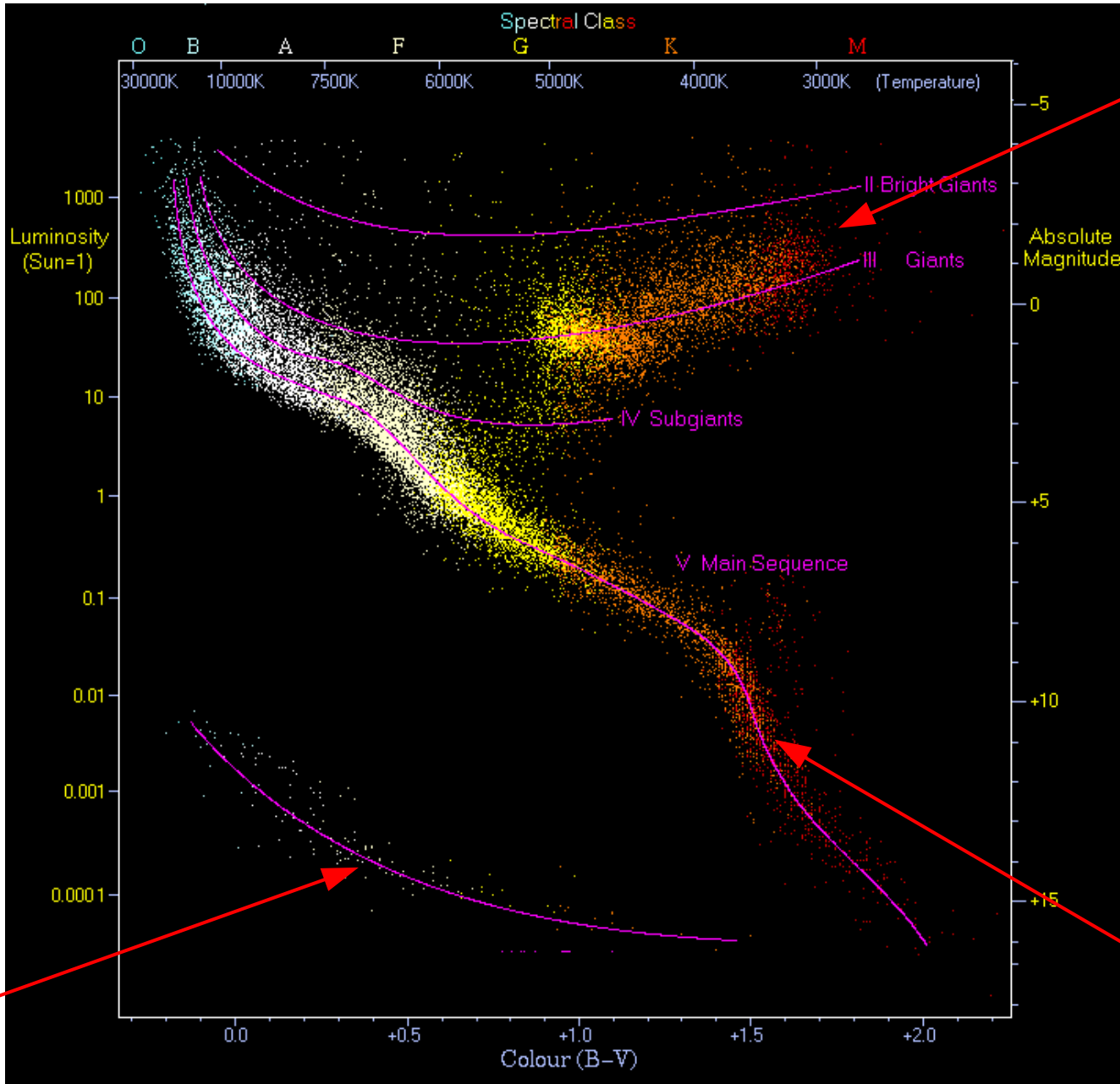
Dla większości gwiazd nie da się pomierzyć rozmiaru kąowego (szczególnie gdy chodzi o pomiary z zadowalającą dokładnością).

W takim przypadku jasność absolutną (moc) gwiazdy można oszacować z samego pomiaru jej temperatury, jeśli wiemy do której klasy (grupy) gwiazd ona należy.

Diagram H-R

temperatura gwiazdy (w Kelvinach)

moc promieniowania w stosunku do Słońca



olbrzymy

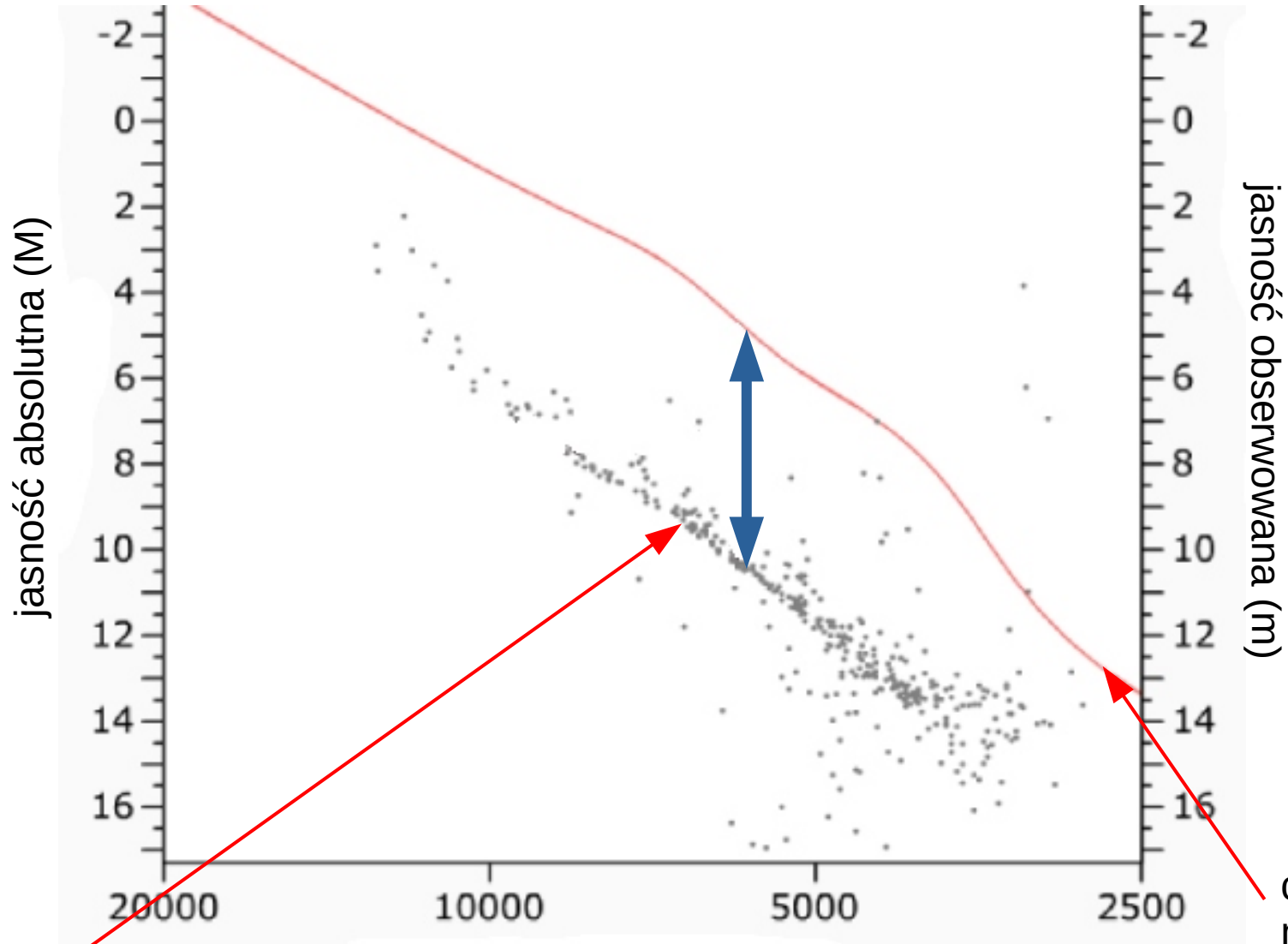
jasność absolutna (w magnitudo)

ciąg główny

białe karły

kolor gwiazdy (wskaźnik barwy)

Diagram H-R

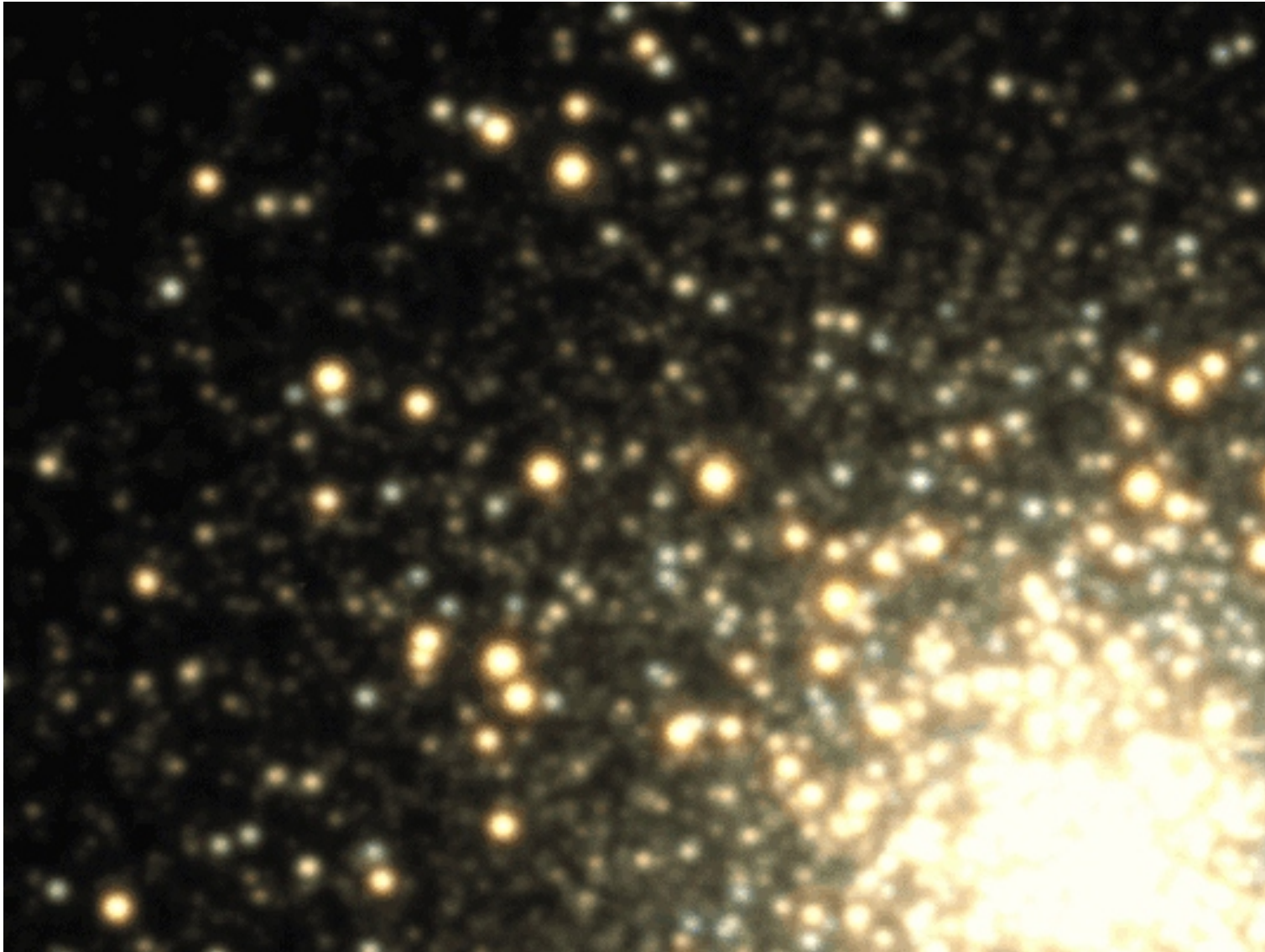


gwiazdy z jednej gromady gwiazd

temperatura gwiazdy (w Kelvinach)

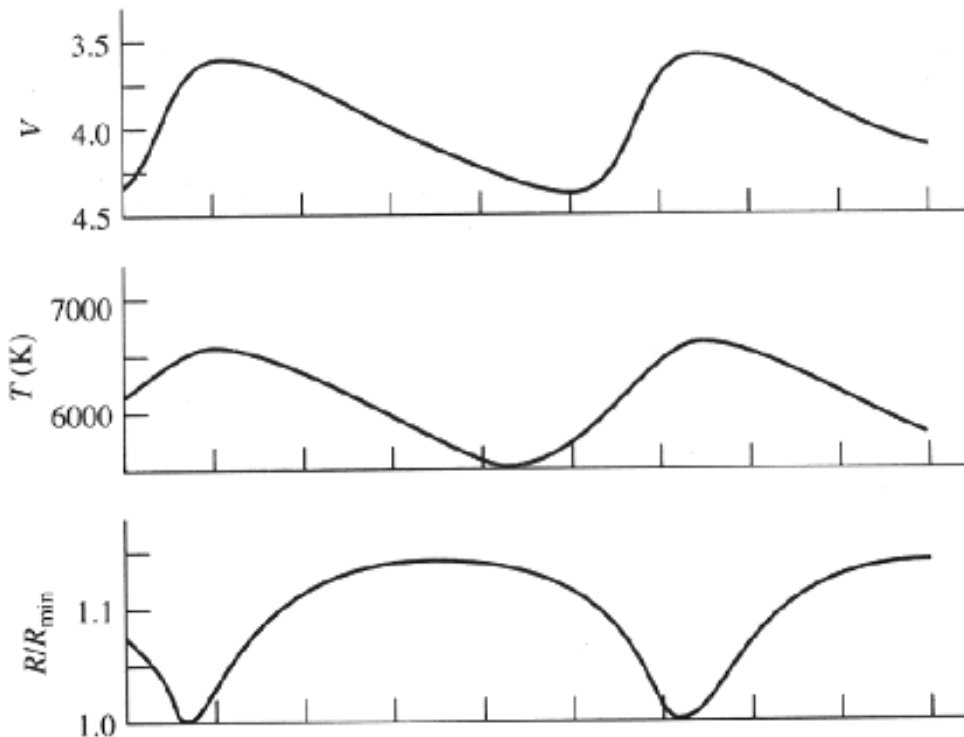
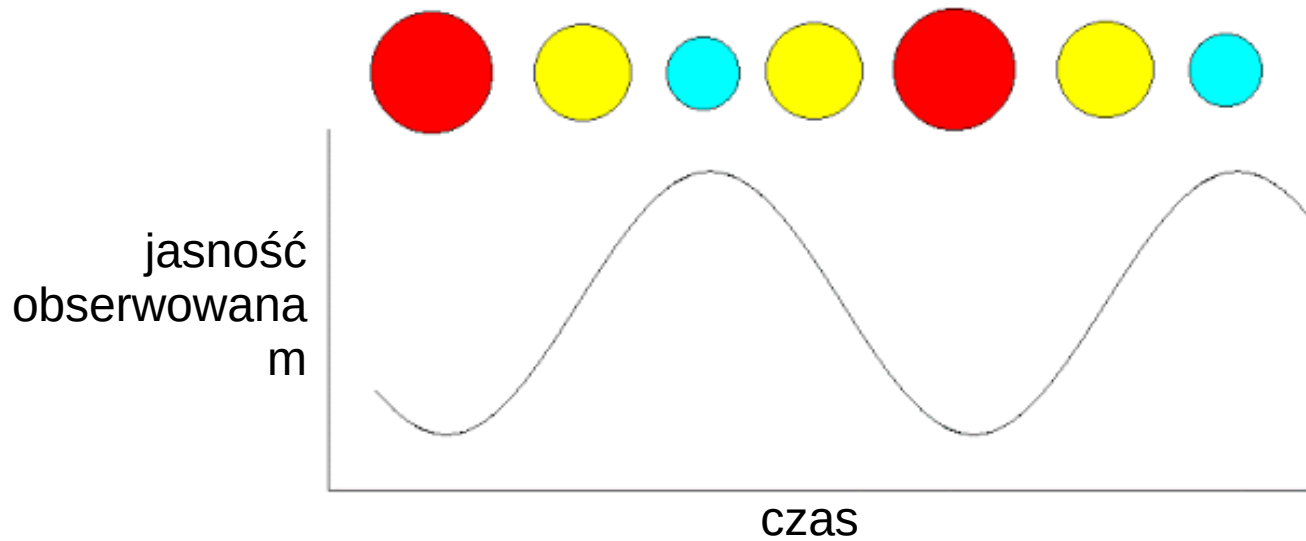
ciąg główny na diagramie H-R

Gwiazdy pulsujące



Gwiazdy pulsujące w gromadzie kulistej gwiazd M3.
Sekwencja zdjęć wykonanych w ciągu kilkunastu godzin.

Gwiazdy pulsujące



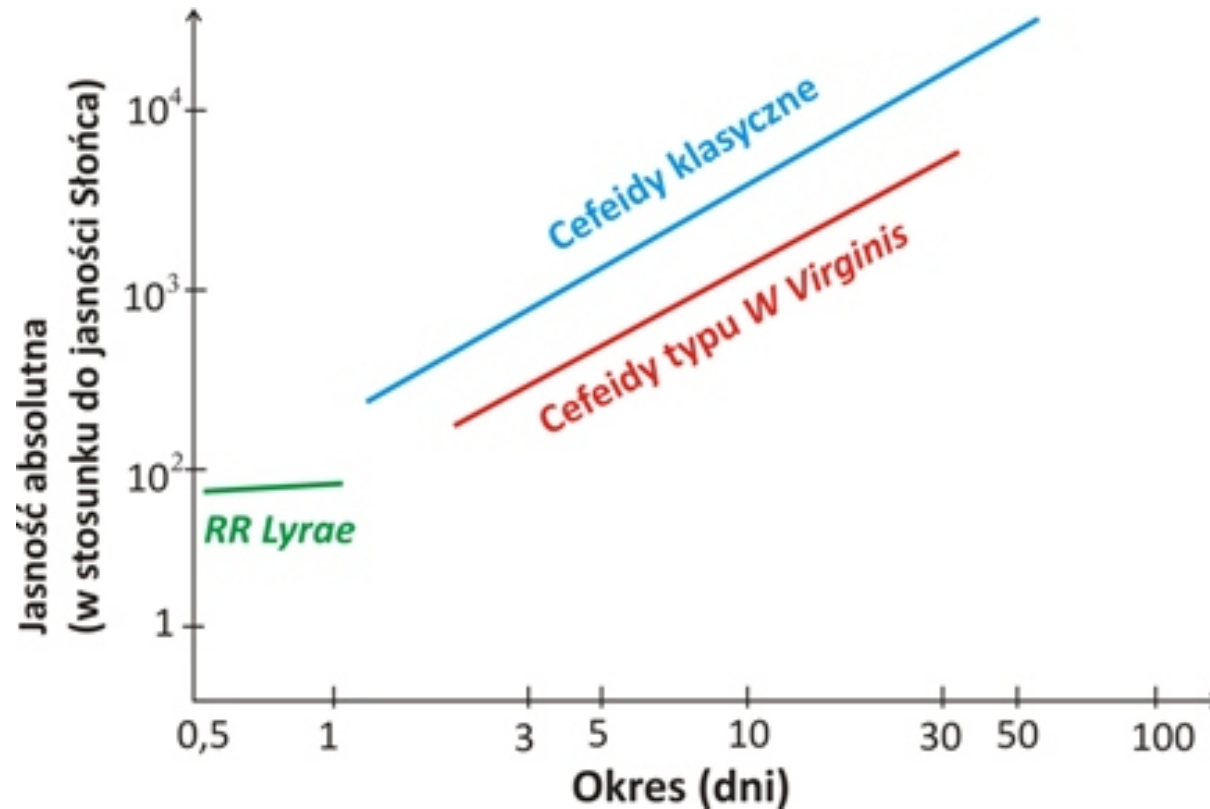
Zmiany:

jasności,
temperatury,
promienia

dla gwiazdy δ Cephei
zmiennnej odkrytej
w 1784 roku.

Gwiazdy pulsujące

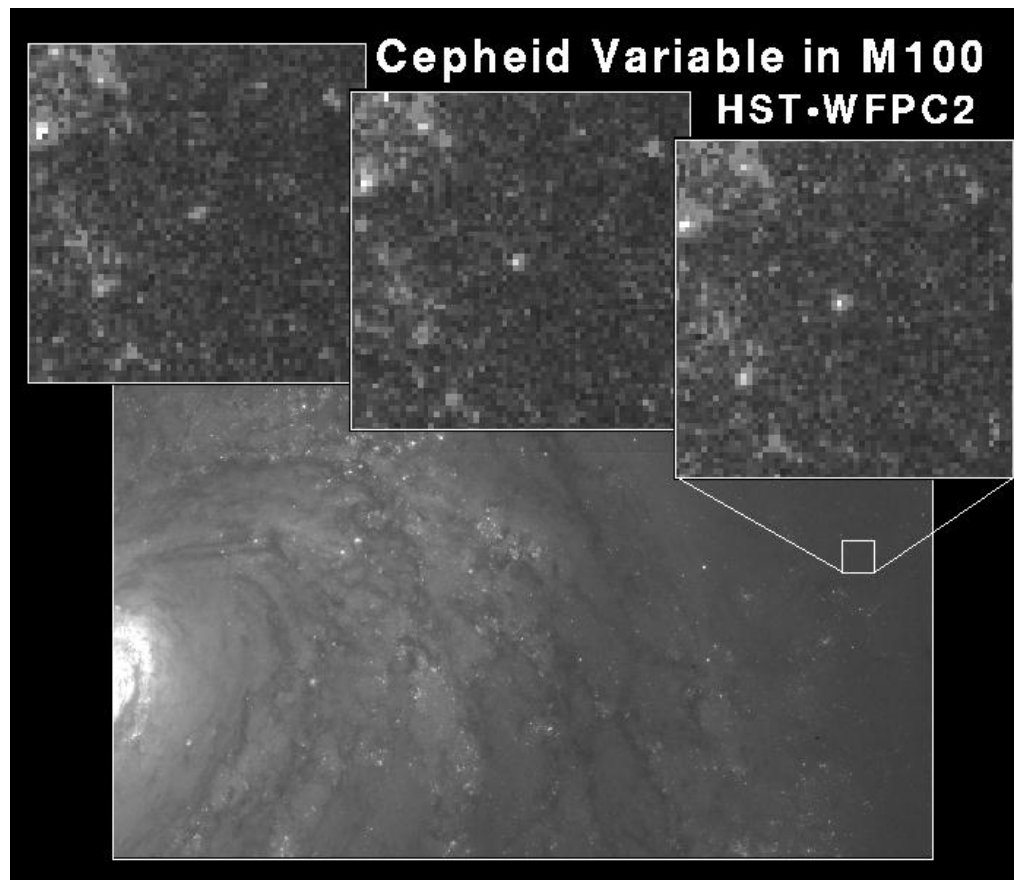
Zależność okres pulsacji a jasność absolutna, w skrócie **okres-jasność** pozwala określić jasność absolutną gwiazdy na podstawie okresu pulsacji.



$$T = \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$

Gwiazdy pulsujące

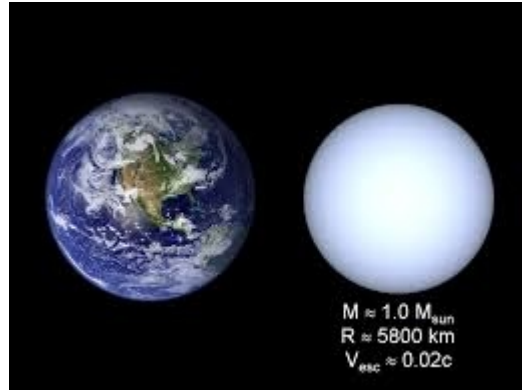
Niektóre gwiazdy pulsujące są bardzo jasne. Jasność absolutna Cefeid dochodzi do -7 mag (są nawet 100 000 x jaśniejsze od Słońca). Dlatego możemy je obserwować nawet z sąsiednich galaktyk.



Galaktyka M100 w odległości 17 Mpc (55 lyr).

Gwiazdy eksplodujące Supernowe typu Ia

Białe karły



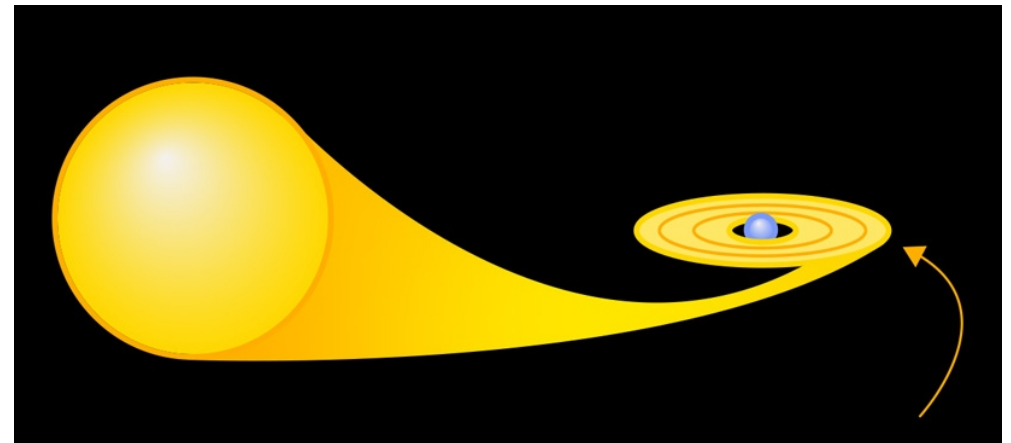
„Masa krytyczna” – limit Chandrasekhara

Maksymalna masa przy której może istnieć stabilny biały karzeł wynosi ok **1.4** M_{S} .

Układy podwójne gwiazd

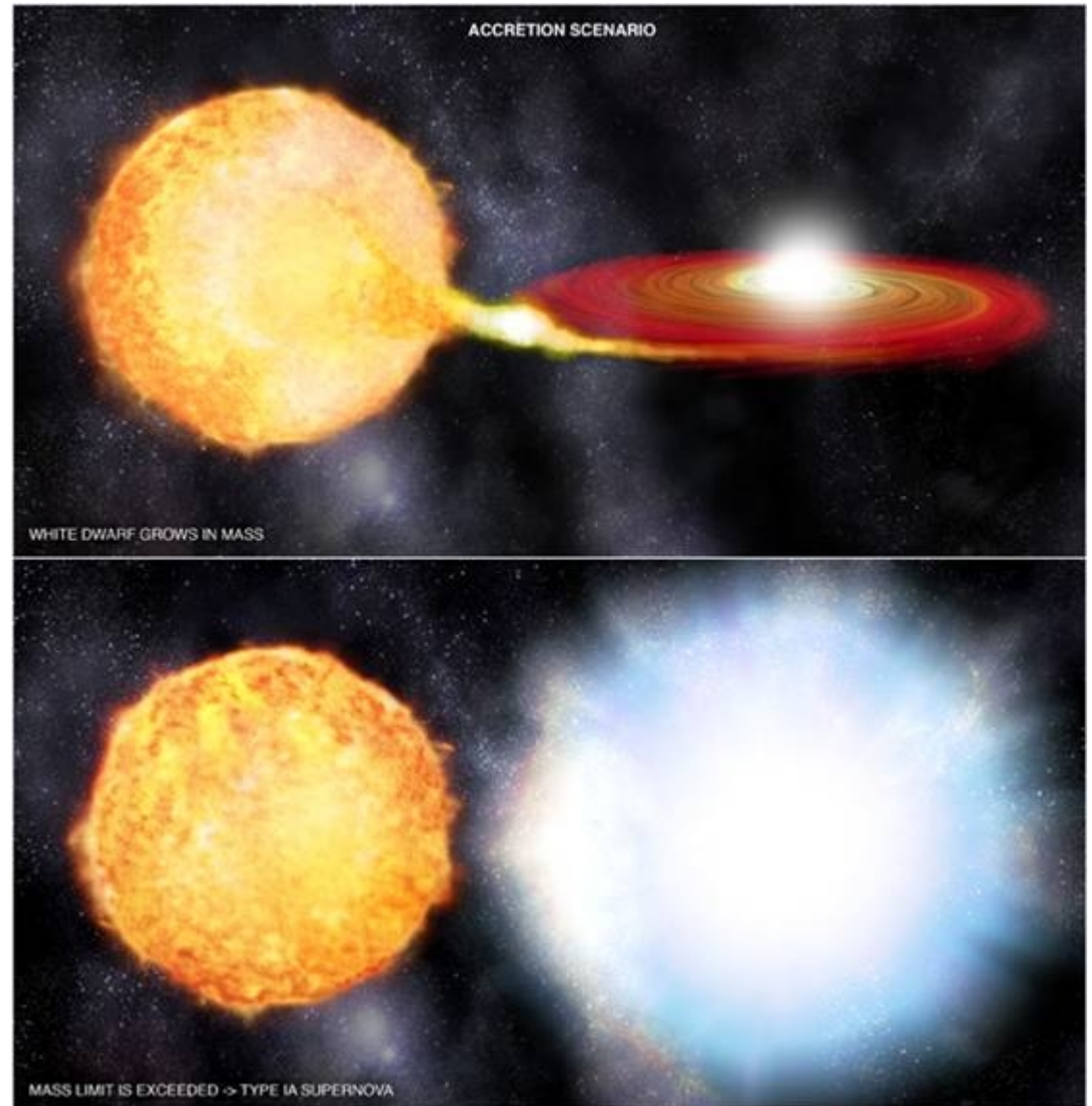


Dysk akrecyjny



Gwiazdy eksplodujące Supernowe typu Ia

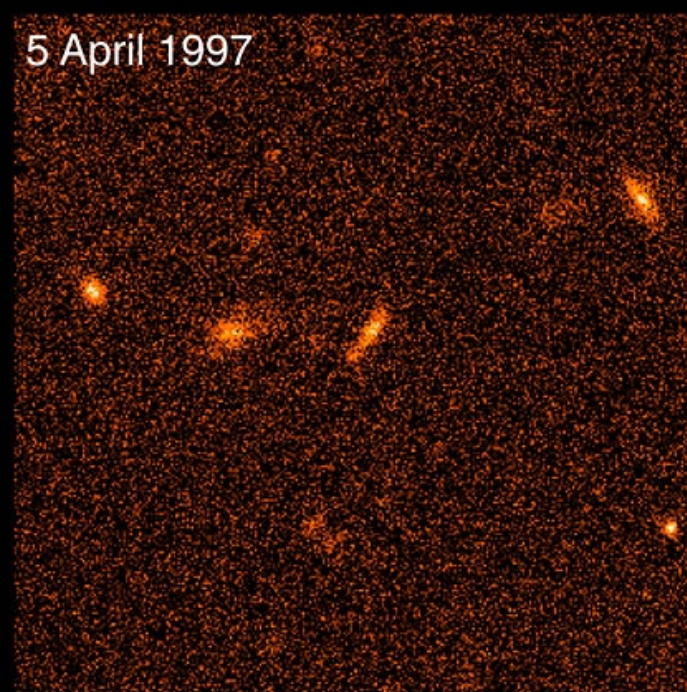
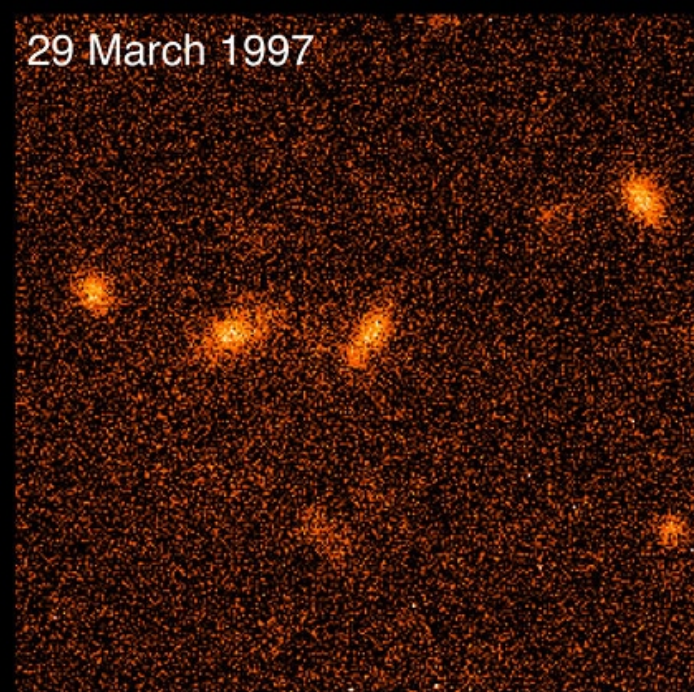
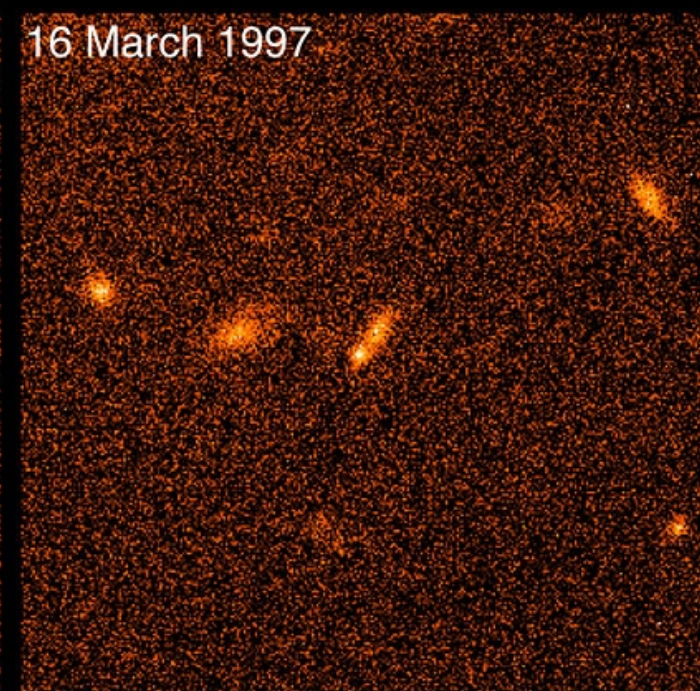
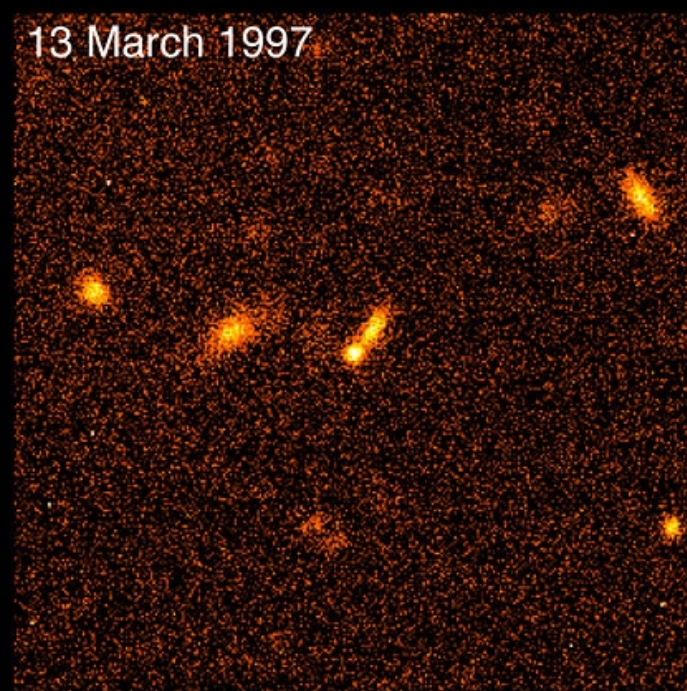
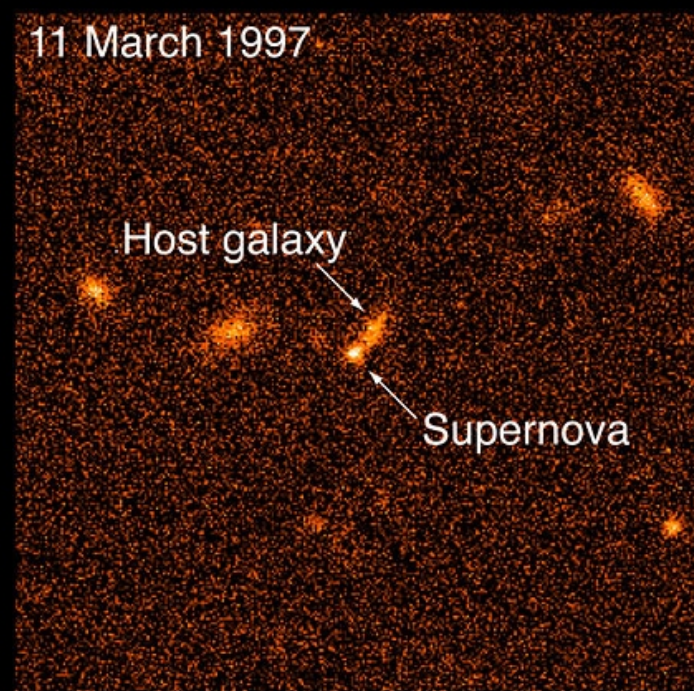
Układ podwojny gwiazd
z białym karłem
i dyskiem akrecyjnym.



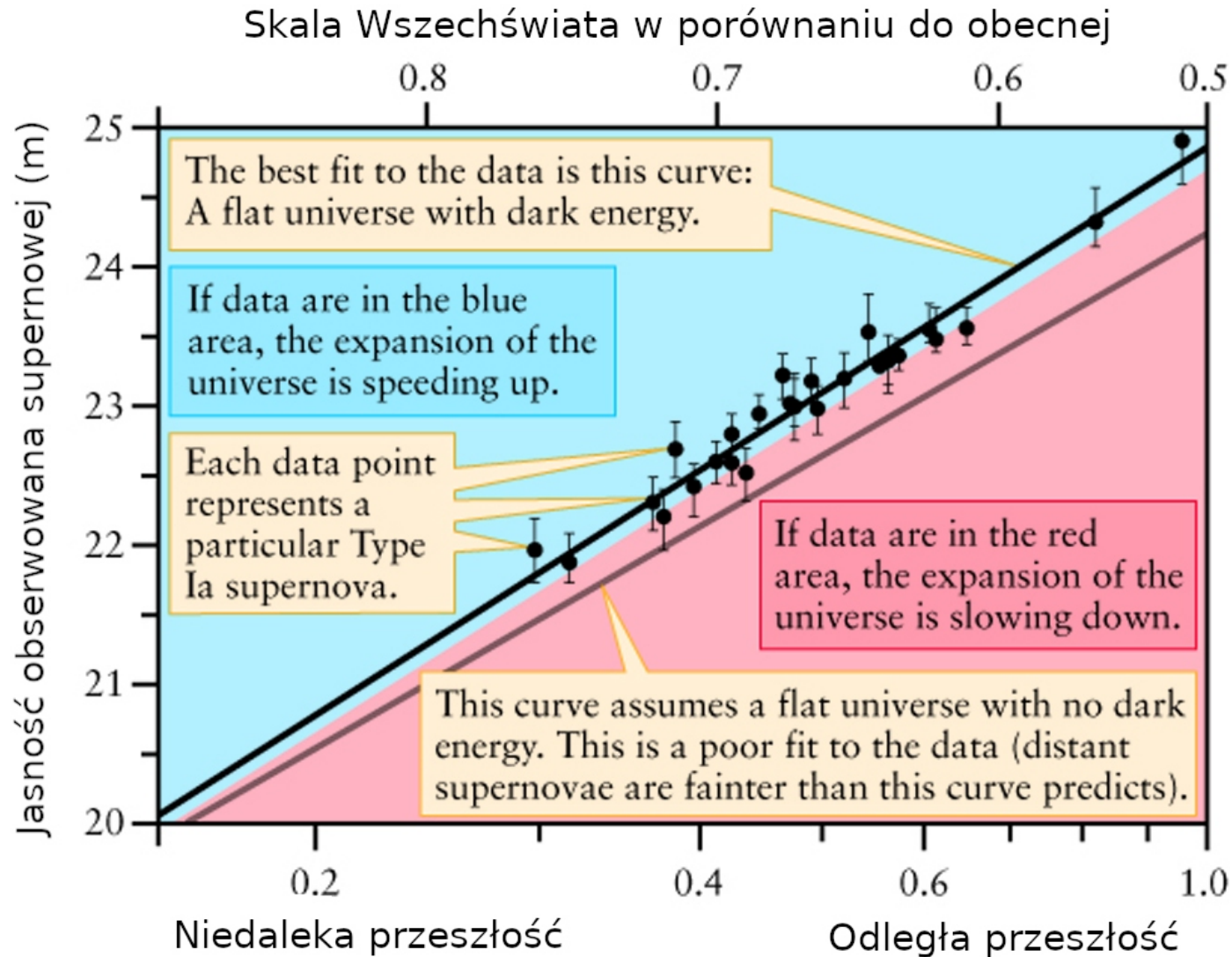
Gwiazdy eksplodujące Supernowe typu Ia



Gwiazdy eksplodujące Supernowe typu Ia



Gwiazdy eksplodujące a ekspansja wszechświata



Odkrycie ciemnej energii i przyspieszającej ekspansji Wszechświata opierało się o obserwacje odległych supernowych typu Ia.

Świeca standardowa

Każdy obiekt lub grupa obiektów, który ma w przybliżeniu stałą i znaną jasność absolutną jest uważany za tzw. **świecę standardową**, gdyż pozwala na wyznaczenie odległości do siebie za pomocą prostego pomiaru jasności (+ trudniejszy pomiar ekstynkcji).

Mogą to być przykładowo:

- najjaśniejsze gwiazdy w danej galaktyce, gdyż przypuszczalnie we wszystkich galaktykach są podobnej jasności
- najjasniejsze gromady gwiazd, gdyż przypuszczalnie we wszystkich galaktykach są podobnej jasności
- gwiazdy na określonym etapie swojego życia, gdyż powinny mieć wszędzie podobną jasność
- eksplozje gwiazd (nie tylko supernowe typu Ia), które zdarzają się wąskiej grupie gwiazd o zbliżonych parametrach
- najjaśniejsze galaktyki w gromadzie, gdyż przypuszczalnie mają wszędzie podobną ilość gwiazd i podobną jasność

Prawo Hubble'a – Lemaitre'a

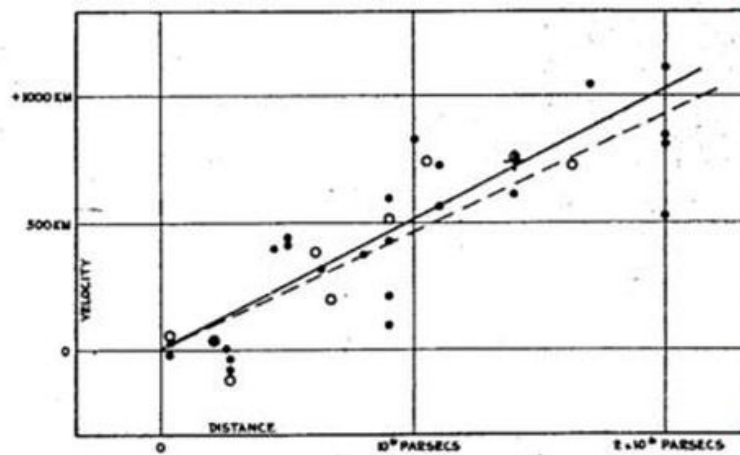
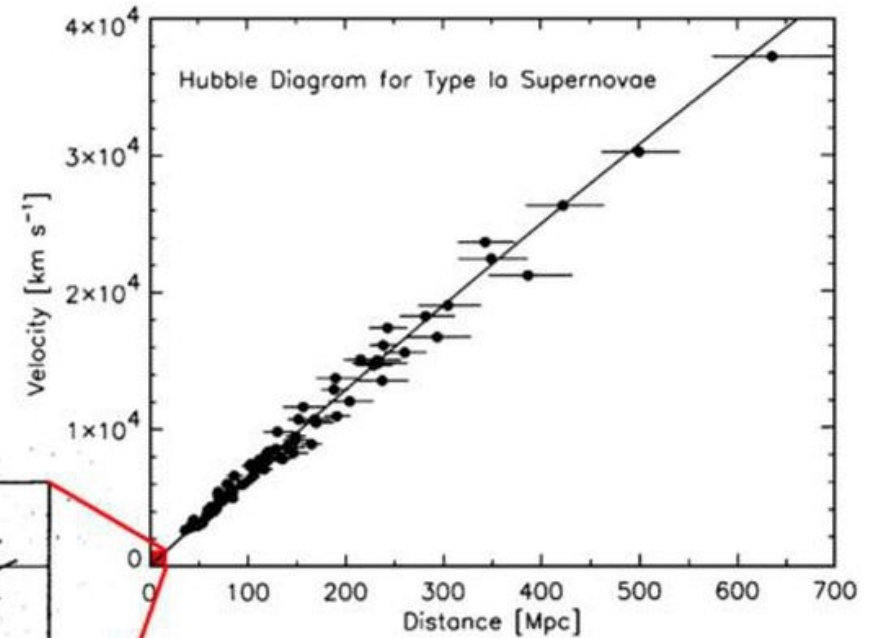
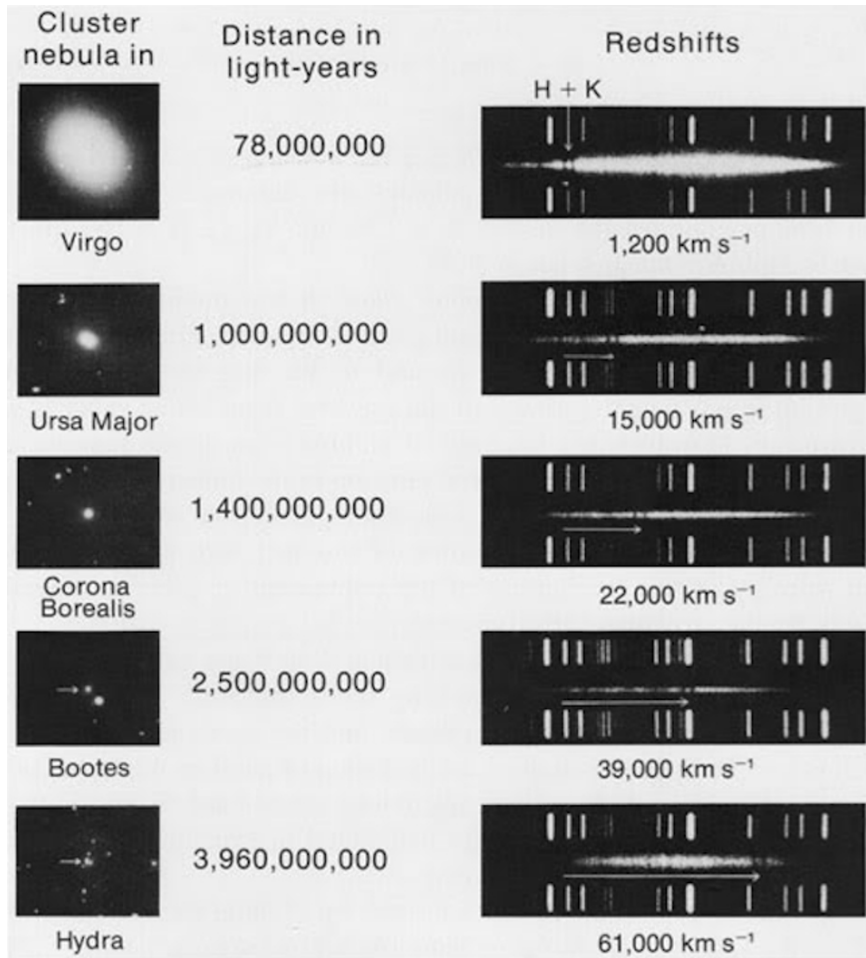


FIGURE 1

Prawo Hubble'a – Lemaitre'a

$$v_r = H_0 d$$

v_r – prędkość oddalania się galaktyki
nie związanej silnie grawitacją z Drogą Mleczną w km/s

d – odległość galaktyki w Mpc

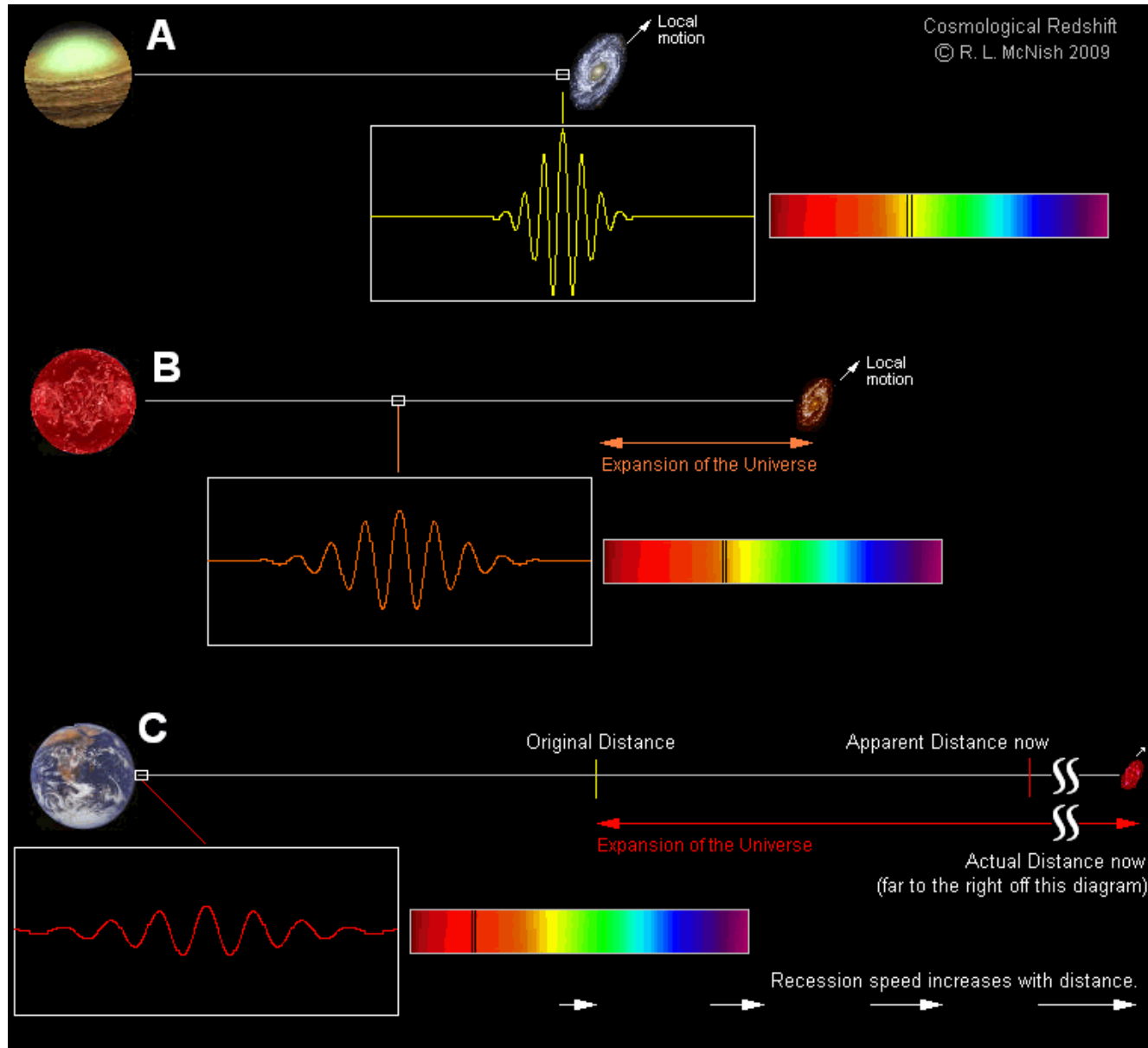
H_0 – stała Hubble'a – Lemaitre'a

Wg. pierwszych szacunków Edwina Hubble'a $H_0 = 500$ km/s/Mpc

Odwrotność H_0 to tzw. czas Hubble'a – zbliżony do wieku Wszechświata.

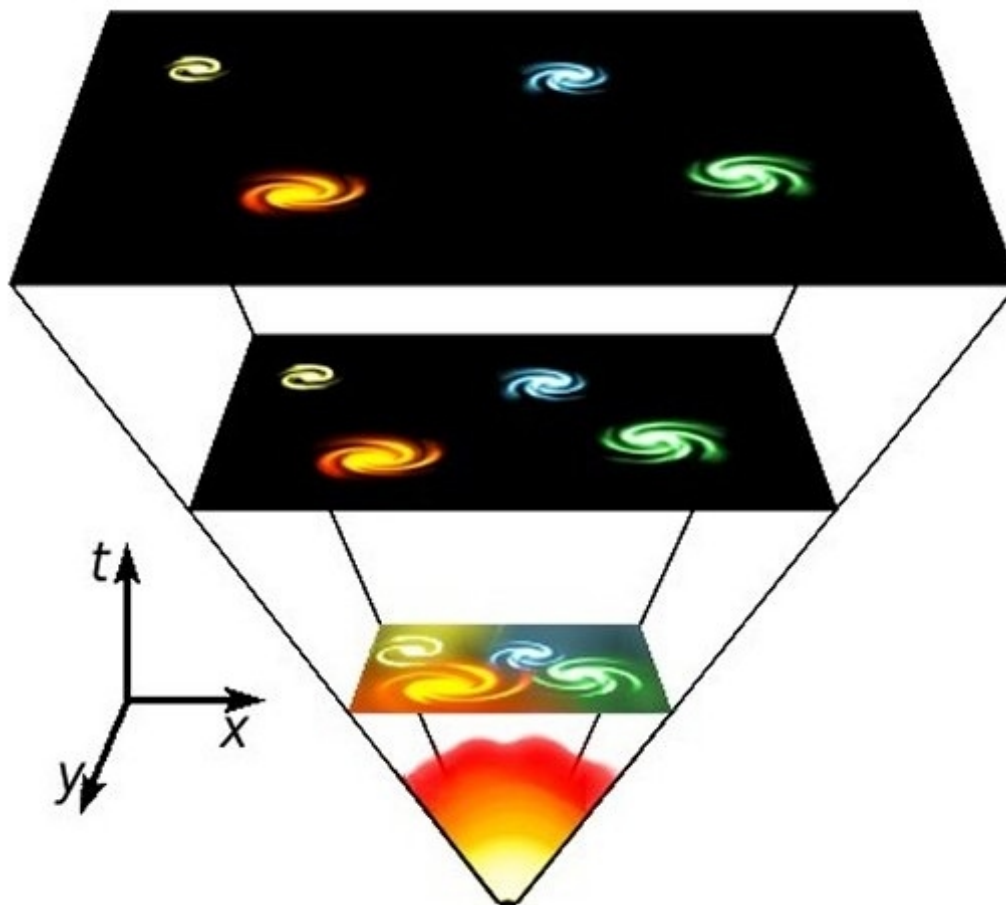
Współcześnie poprawiono wyznaczenie H_0 na ok. 70 km/s/Mpc.

Prawo Hubble'a – Lemaitre'a



Rozszerzanie się Wszechświata powoduje przesunięcie ku czerwieni, czyli wydłużenie wszystkich fal e-m które były wyemitowane z dalekiej odległości.

Prawo Hubble'a – Lemaitre'a

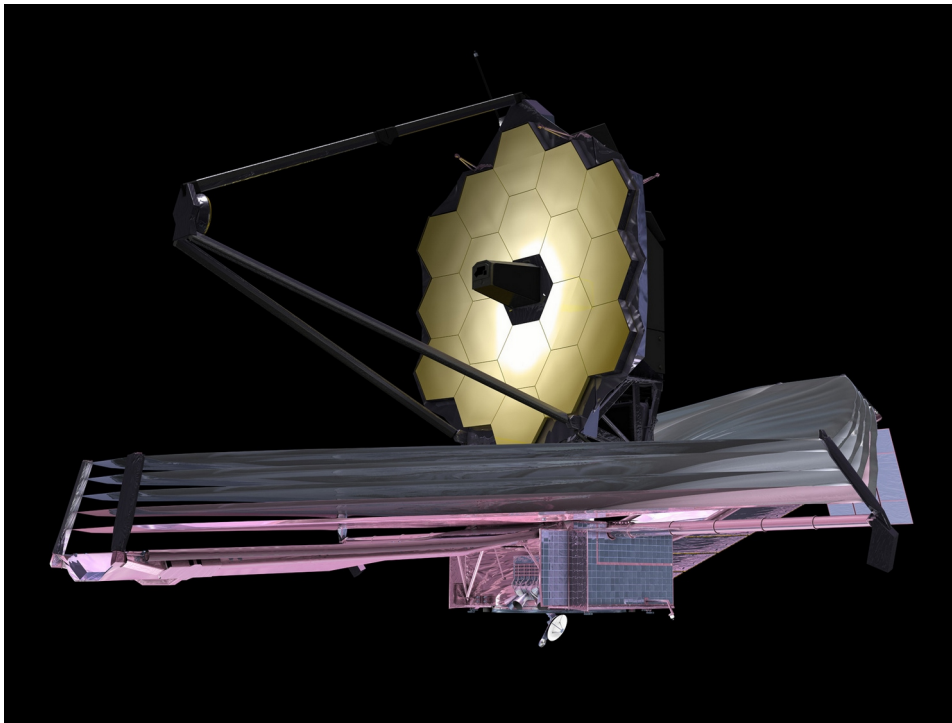


Ekspandujący Wszechświat nie ma „środka”,
gdyż rozszerza się wraz z przestrzenią.

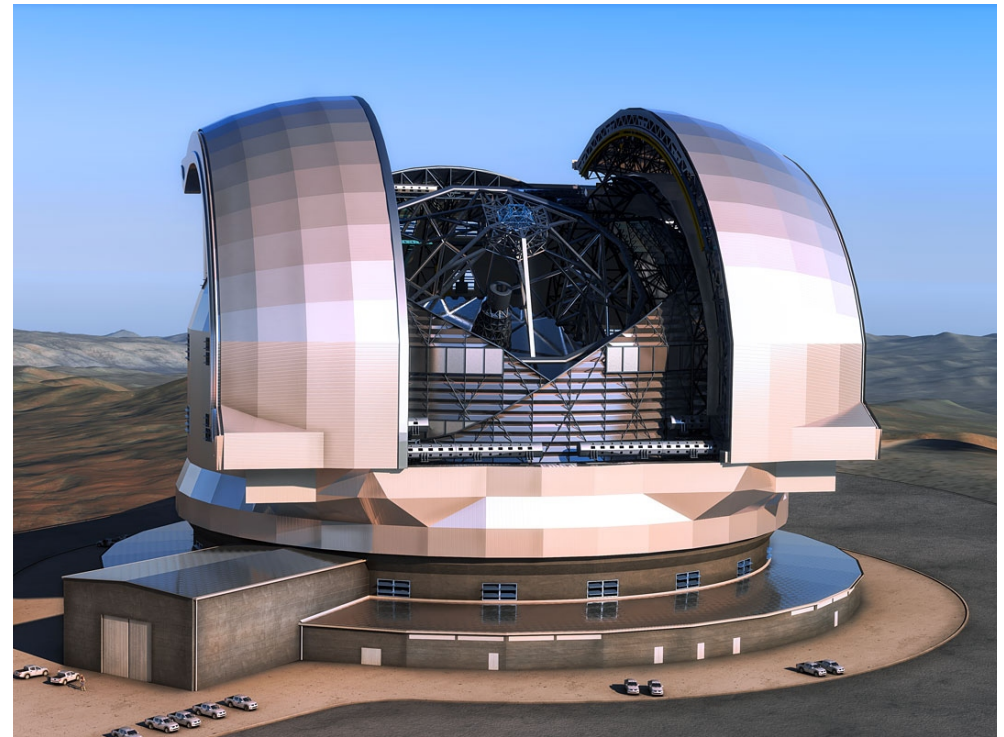
Prawo Hubble'a – Lemaitre'a

A co z obiektami tak słabymi i odległymi,
że nie jesteśmy w stanie zmierzyć ich prędkości oddalania się?

Wówczas stosuje się metody bardzo przybliżone,
które obarczone są dużą niepewnością i nierzadko dają błędne wyniki.



6.5m James Webb Space Telescope



39m Extremely Large Telescope