

ASTRONOMIA WSPÓŁCZESNA

Krzysztof Kamiński
Instytut Obserwatorium Astronomiczne UAM

www.astro.amu.edu.pl

chrisk@amu.edu.pl

Wstępny plan zajęć

1. Skale Wszechświata
2. Teleskopy optyczne i kamery
3. Teleskopy kosmiczne
4. Pomiar jasności i widm
5. Metody wyznaczania odległości
6. Kosmologia

JEDNOSTKI STOSOWANE W ASTRONOMII

Typowe jednostki astronomiczne - rozmiary

- **metr** (układ jednostek SI - Système international d'unités)
- **centymetr** (układ jednostek CGS - Centymetr Gram Sekunda)
- średnica lub **promień Ziemi**
- średnica lub **promień Jowisza**
- średnica lub **promień Słońca**
- oraz jednostki stosowane do podawania odległości

Typowe jednostki astronomiczne - odległości

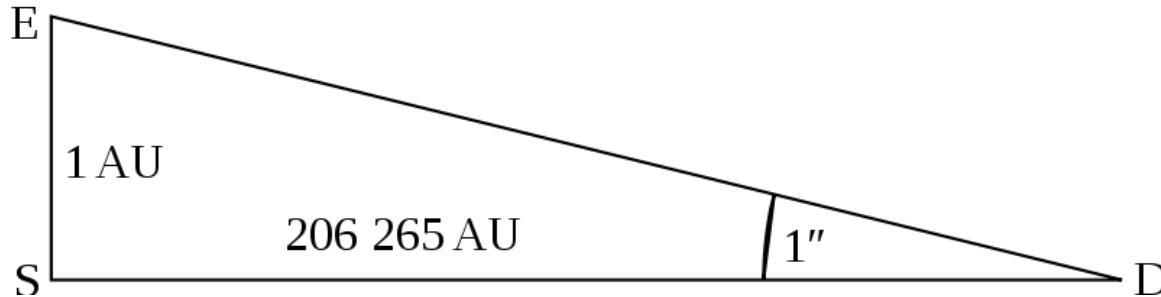
- **odległość Księżyca** - średnia odległość Ziemia-Księżyc
1 LD (lunar distance) = 384 tys. km
- **jednostka astronomiczna** - średnia odległość Ziemia-Słońce
1 AU (astronomical unit) lub 1 j.a. = 149.6 mln km = 390 LD
- **rok świetlny** - odległość pokonywana przez światło w ciągu roku
1 ly (light year) lub 1 r.ś.? = 9.5 bln km, 63241 AU

Stosuje się niekiedy również sekundy, minuty, godziny świetlne.

Typowe jednostki astronomiczne - odległości

Parsek – odległość z jakiej 1 AU jest widoczne pod kątem 1 sekundy łuku

$$1 \text{ pc} = 206264.8 \text{ AU} = 3.26 \text{ ly} = 3.086 \cdot 10^{16} \text{ m} = 31 \text{ bln km}$$



Stosuje się również przedrostki kilo, mega i giga: kpc, Mpc, Gpc

Typowe jednostki astronomiczne - masy

- masa Ziemi = $6 \cdot 10^{24}$ kg

- masa Jowisza = $318 M_{\text{Ziemi}}$

- masa Słońca = $330000 M_{\text{Ziemi}} = 1047 M_{\text{Jowisza}}$

- masa Galaktyki – ok. $10^{12} M_{\text{Słońca}}$ – słabo znana

SKALE WSZECHŚWIATA

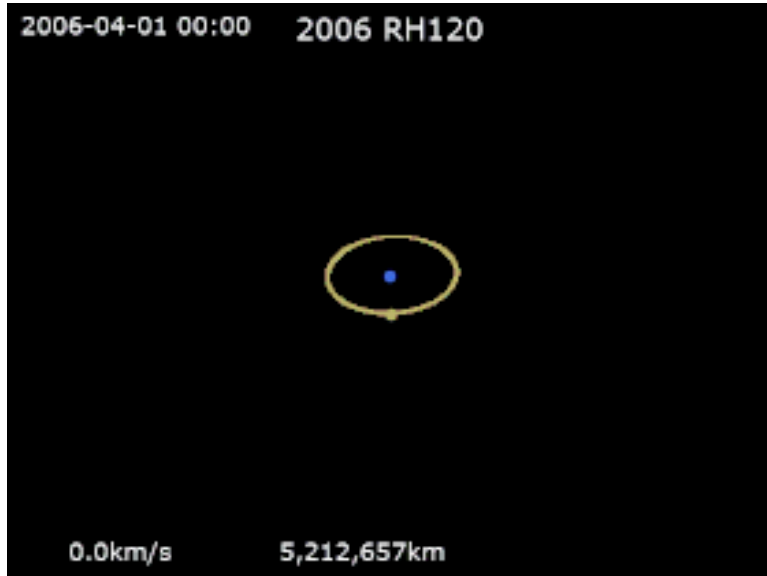
Układ Ziemia-Księżyc

Odległość:	średnia 384 tys. km (od 363 tys. do 406 tys. km)	= 1 LD
Rozmiary:	$R_{\text{Ziemi}} = 6371 \text{ km}$, $R_{\text{Księżyc}} = 1738 \text{ km}$	= $0.27 R_{\text{Ziemi}}$
Masy:	$M_{\text{Ziemi}} = 5.97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, $M_{\text{Księżyc}} = 7.35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$	= $0.012 M_{\text{Ziemi}}$

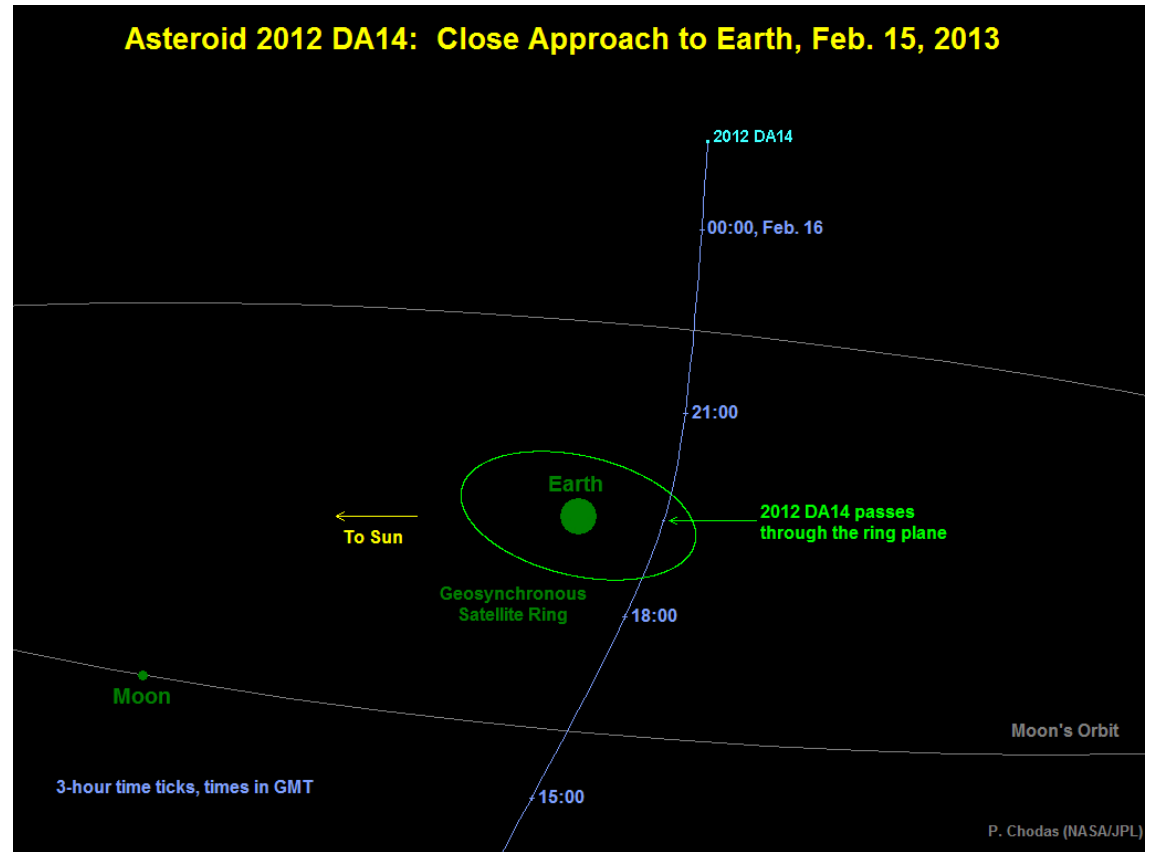
Co znajduje się pomiędzy Ziemią a Księżycem?

- promieniowanie e-m, głównie słoneczne
- sztuczne satelity i śmieci kosmiczne
- cząstki elementarne pochodzące z wiatru słonecznego (ok. 5 cz. / cm^3)
- cząstki elementarne zaliczane do promieni kosmicznych (ok. 10^{-9} cz. / cm^3)
- ziarenka pyłu (meteoroidy) pochodzące głównie z komet (ok. 10^{-23} cz. / cm^3)
- od czasu do czasu przelatują niewielkie planetoidy
- tymczasowe pseudo-księżyce Ziemi

Obiekty w pobliżu Ziemi



Chwilowy pseudo-księżyc Ziemi



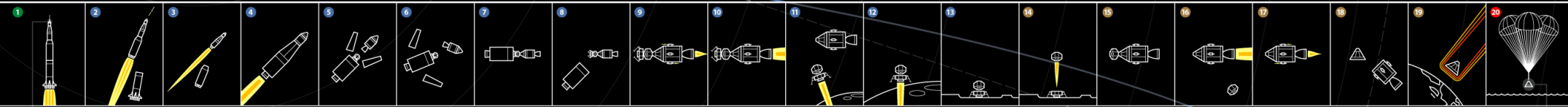
Bliski przelot planetoidy 2012 DA14,
minimalna odległość: $4.3 R_{\text{Ziemi}}$

Loty załogowe na Księżyc

DESTINATION MOON

Flying to the Moon and back is not as simple as pointing a rocket in the Moon's direction. The Moon orbits the Earth (both shown to scale here), and the Earth around the Sun. The Apollo spacecraft had to aim for where the Moon would be after their quarter of a million mile, three-day journey from the launch site on the Florida coastline. For the return journey, their precise aim for a specific slice of Earth's atmosphere required perfect precision and navigation to ensure a splashdown in the Pacific Ocean. Illustrations by Nik Schulz

DESTINATION MOON



JULY 16, 1969

8:32 a.m. EST
The Saturn V rocket carrying Apollo 11 lifts off from the launch pad. Its S-IC Stage 11 engine producing 3.4 million kilograms/7.5 million pounds of thrust.

8:34:42 a.m.

Thirty miles up, the first stage and launch escape tower are jettisoned. The S-II (Stage 2) engines are ignited.

8:41:09 a.m.

The second stage is jettisoned and the S-IVB (Stage 3) engine fires as the rocket enters Earth parking orbit.

11:16:16 a.m.

After travelling one and a half times around the Earth, the S-IVB is fired again to leave Earth orbit.

11:47:23 a.m.

The Command and Service Module separates from the S-IVB Lunar Module.

11:49:04 a.m.

The Command and Service Module begins rotation.

11:56:03 a.m.

The Command and Service Module docks with the Lunar Module.

12:49:03 p.m.

The S-IVB stage is jettisoned.

JULY 17

11:16:58 a.m. EST

The Command and Service Module's rocket is burned for a mid-course correction.

JULY 19

12:21:50 p.m. EST

The Command and Service Module's rocket is burned once again for lunar orbit insertion.

JULY 20

11:11:52 p.m. EST

The Lunar Module separates from the Command and Service Module and begins its descent.

3:04:55 p.m.

The Lunar Module continues its descent to within 15,000 meters/50,000 feet of the lunar surface.

3:17:39 p.m.

Touchdown!

JULY 21

12:54:00 p.m. EST

The Lunar Module ascent stage lifts off, leaving the descent stage behind on the surface of the moon.

4:35:00 p.m.

The Lunar Module ascent stage re-docks with the Command and Service Module.

6:41:31 p.m.

The Lunar Module ascent stage is jettisoned and 5 hours, 14 minutes and 11 seconds later the crew fires the rocket for Trans-Earth injection.

JULY 22

3:01:57 p.m. EST

The crew fires the rocket once again for a mid-course correction.

JULY 24

11:21:12 a.m. EST

The Command and Service Modules separate.

11:35:05 a.m.

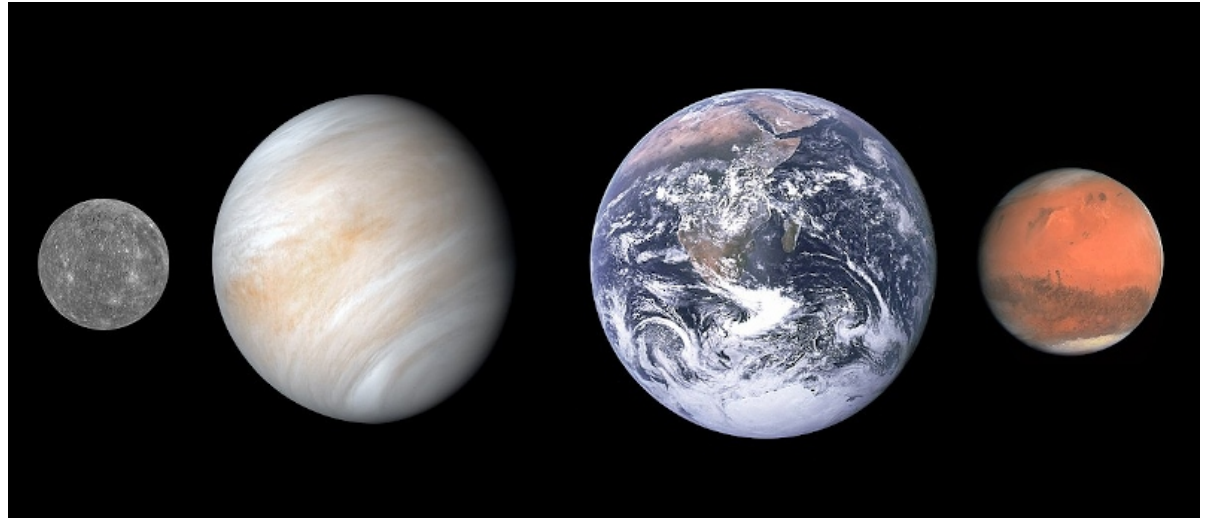
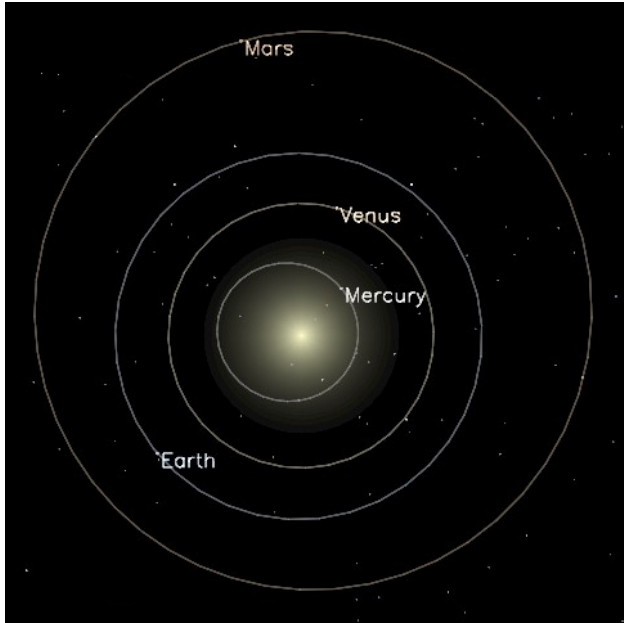
The Command Module descends through the atmosphere. Communication blackout ensues.

11:50:35 a.m.

Splashdown!

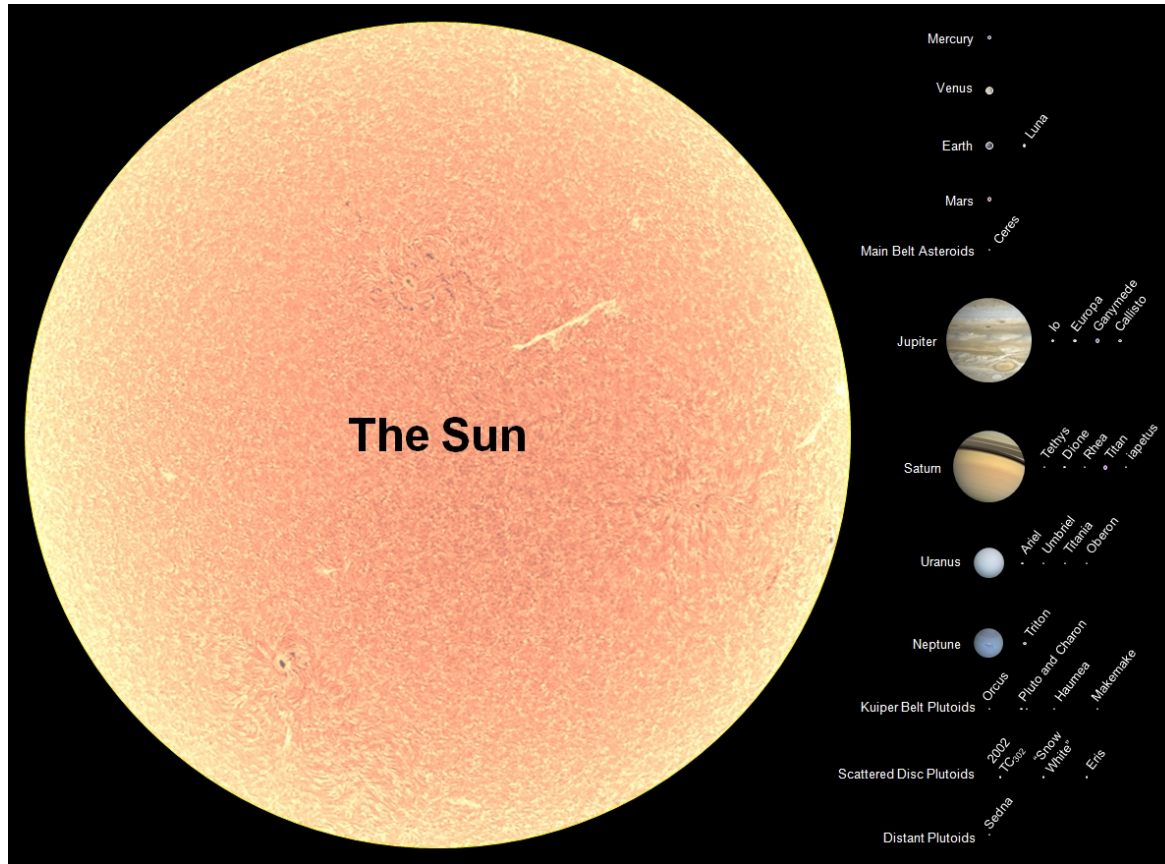


Najbliższe planety



Odległość od Słońca:	0.39 AU,	0.72 AU,	1 AU,	1.52 AU
Min. odl. od Ziemi:	Wenus ~ 0.26 AU = 102LD			Mars ~ 0.37 AU = 142 LD
Rozmiary:	0.38 R_{Ziemi}	0.95 R_{Ziemi}	1.0 R_{Ziemi}	0.53 R_{Ziemi}
Masy:	0.055 M_{Ziemi}	0.82 M_{Ziemi}	1.0 M_{Ziemi}	0.11 M_{Ziemi}

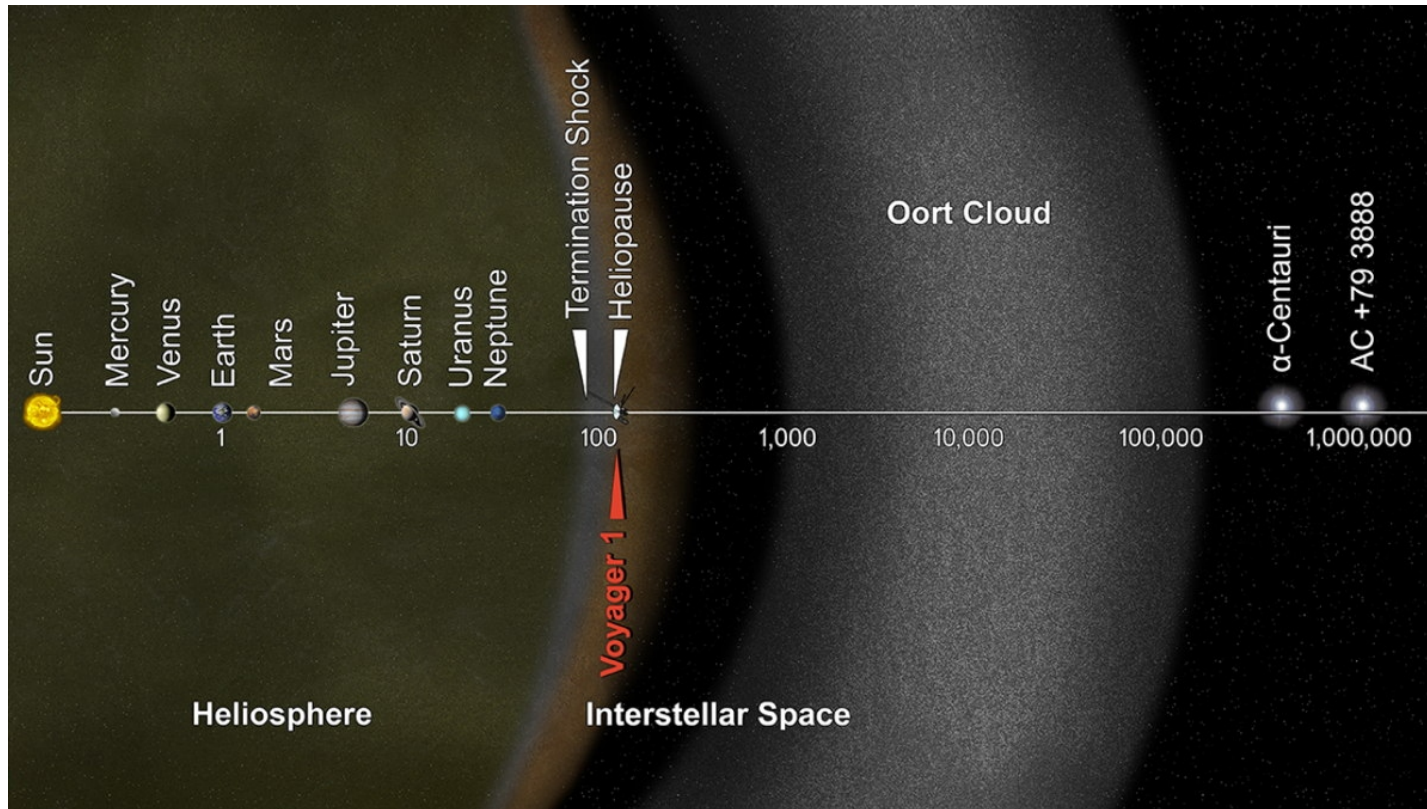
Słońce



Rozmiar: $109 R_{\text{ziemi}}$ (objętość: 1.3 mln razy większa)

Masa: $330000 M_{\text{ziemi}}$ (gęstość ok. 25% ziemskiej)

Układ Słoneczny



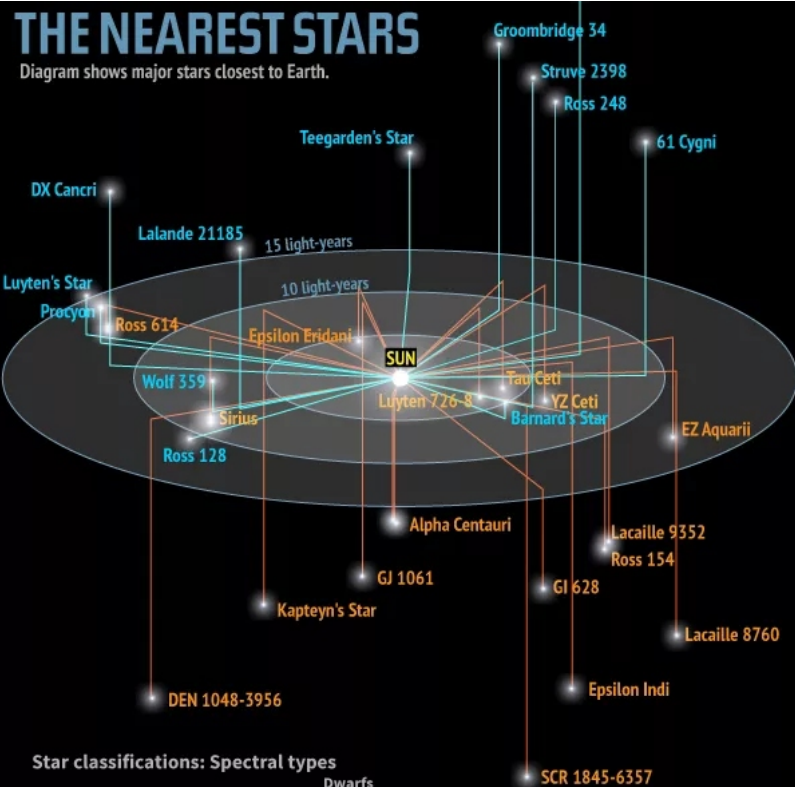
Układ Słoneczny w skali logarytmicznej.

Jak przedstawić US z zachowaniem skali rozmiarów i odległości naraz?

If Moon were only 1 pixel

THE NEAREST STARS

Diagram shows major stars closest to Earth.



Star classifications: Spectral types

Dwarfs



Colors do not represent the actual visual color of the star.

	Star system	Distance in light-years	Stellar type (s)	Observed planets
1	Alpha Centauri	4.24-4.37	M, G, K	1
2	Barnard's Star	5.96	M	
3	Wolf 359	7.78	M	
4	Lalande 21185	8.29	M	
5	Sirius	8.58	A, D	
6	Luyten 726-8	8.73	M, M	
7	Ross 154	9.68	M	
8	Ross 248	10.32	M	
9	Epsilon Eridani	10.52	K	2

Najbliższe gwiazdy

Układ 3 gwiazd: alfa Centaura

Najbliższa z nich to proxima Centaura.

Odległość: 4.24 ly = 874563 AU = 315 mln LD

Odległości a rozmiary obiektów:

Ziemia-Księżyc / Ziemia 60

Ziemia-Słońce / Ziemia $2.3 \cdot 10^4$

Jowisz-Słońce / Jowisz $1.1 \cdot 10^4$

Słońce-proxima Cen / Słońce $1.3 \cdot 10^7$

Galaktyka



Rozmiar ok. 200 kly (60 kpc)

Masa ok. $10^{12} M_{\text{słońca}}$ (~90% ciemna materia)

Liczba gwiazd ok. 100-400 mld

W najgęstszych miejscach gwiazdy są odległe od siebie o miesiące świetlne.

Wizja artystyczna Drogi Mlecznej widzianej z zewnątrz.

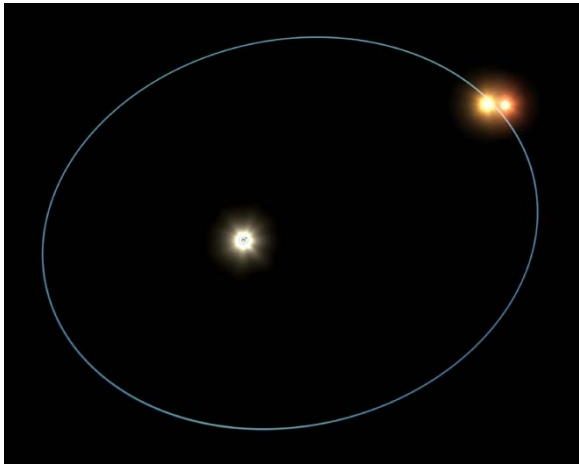
Różne obiekty w Galaktyce

Gwiazdy pojedyncze – gwiazdy nie powiązane grawitacją z innymi

Rozmiary gwiazd aktywnych: od ok. $0.1 R_{\text{Słońca}}$ do ok $1000 R_{\text{Słońca}}$

Masy gwiazd aktywnych: od ok. $0.08 M_{\text{Słońca}}$ do ok $100 M_{\text{Słońca}}$

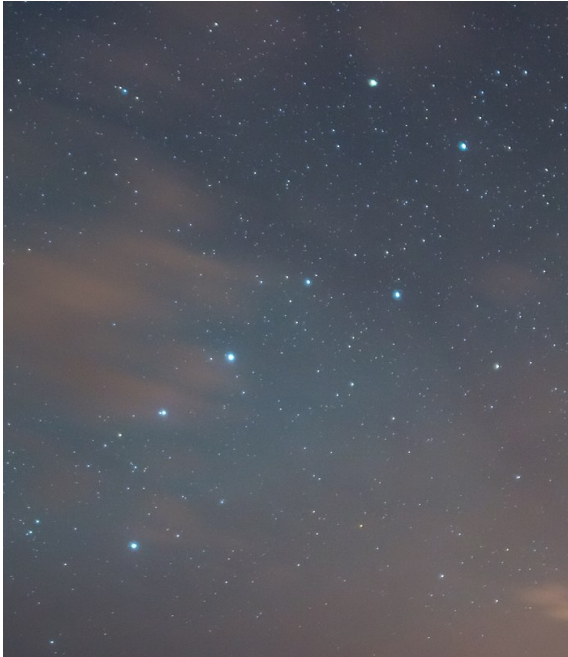
Układy gwiazd – gwiazdy trwale związane grawitacyjnie z innymi



Odległości gwiazd w układach - od układów kontaktowych do tysięcy AU.

Różne obiekty w Galaktyce

Gromady gwiazd – asocjacje, gromady otwarte, gromady kuliste



Asocjacja
Wielkiej Niedźwiedzicy:
gwiazdy w odległości kilka-
kilkanaście ly od siebie

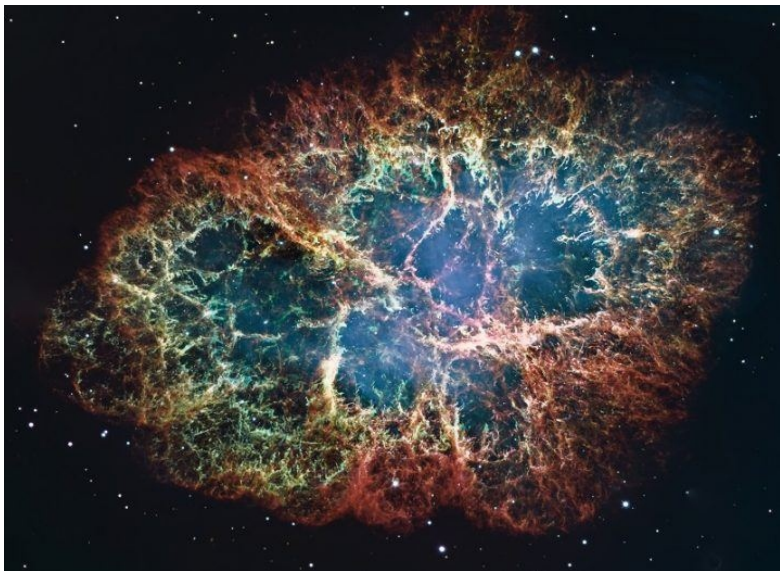


Gromada otwarta Plejady:
kilkaset młodych gwiazd
gwiazdy w odległości
kilku ly od siebie



Gromada kulista w Herkulesie:
ok. 0.5 mln gwiazd w odległości
kilku miesięcy świetlnych od siebie

Najbliższe okolice w Galaktyce
Mgławice – skupiska gęstej materii międzygwiazdowej



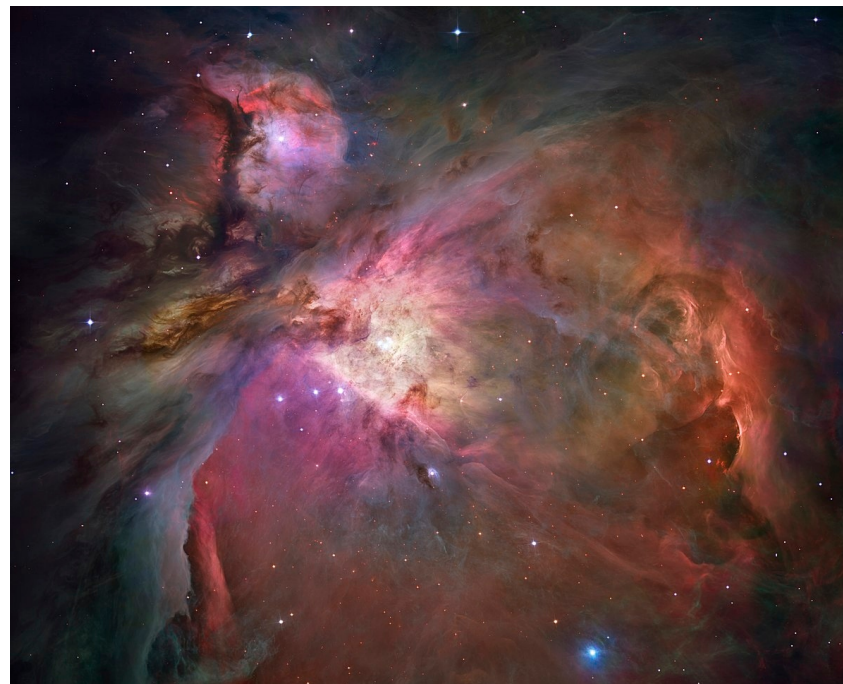
Mgławica Krab

Rozmiar: 5.5 ly (1.7 pc)

Masa: 4.6 $M_{\text{Słońca}}$

Średnia gęstość: 1000 cz. / cm^3

Powietrze: 10^{19} cz. / cm^3



Mgławica w Orionie

Rozmiar: 12 ly

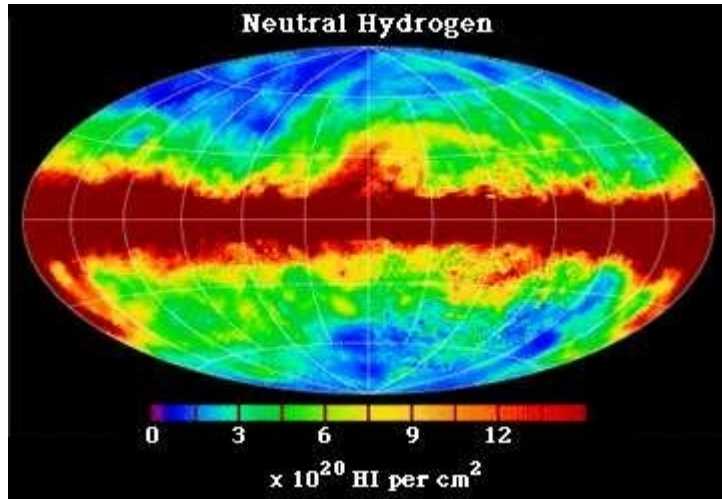
Masa: 2000 $M_{\text{Słońca}}$

Średnia gęstość: 10000 cz. / cm^3

Najbliższe okolice w Galaktyce

Materia międzygwiazdowa

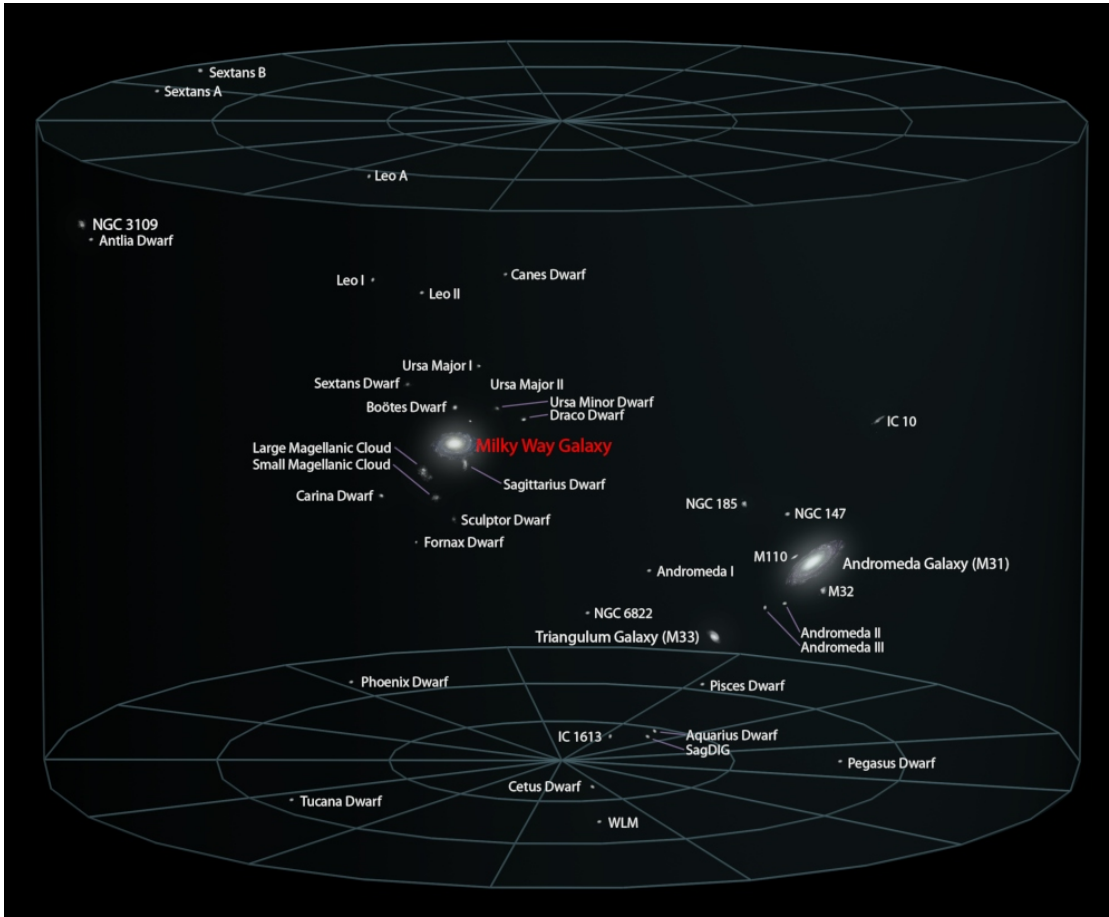
Cała Galaktyka jest wypełniona gazem o typowej gęstości ok 0.1 cz. /cm^3 .
Około połowa tej masy przypada na mgławice, reszta jest rozproszona.



Radiowe pomiary rozkładu wodoru neutralnego na niebie (u góry) i w Galaktyce (z prawej).



Grupa lokalna galaktyk



Galaktyka w Andromedzie

Odległość: ~2.5 Mly (778 kpc)

Rozmiar: ~220 kly

Masa: ~ 10^{12} $M_{\text{Słońca}}$

Liczba gwiazd: ~1 bln

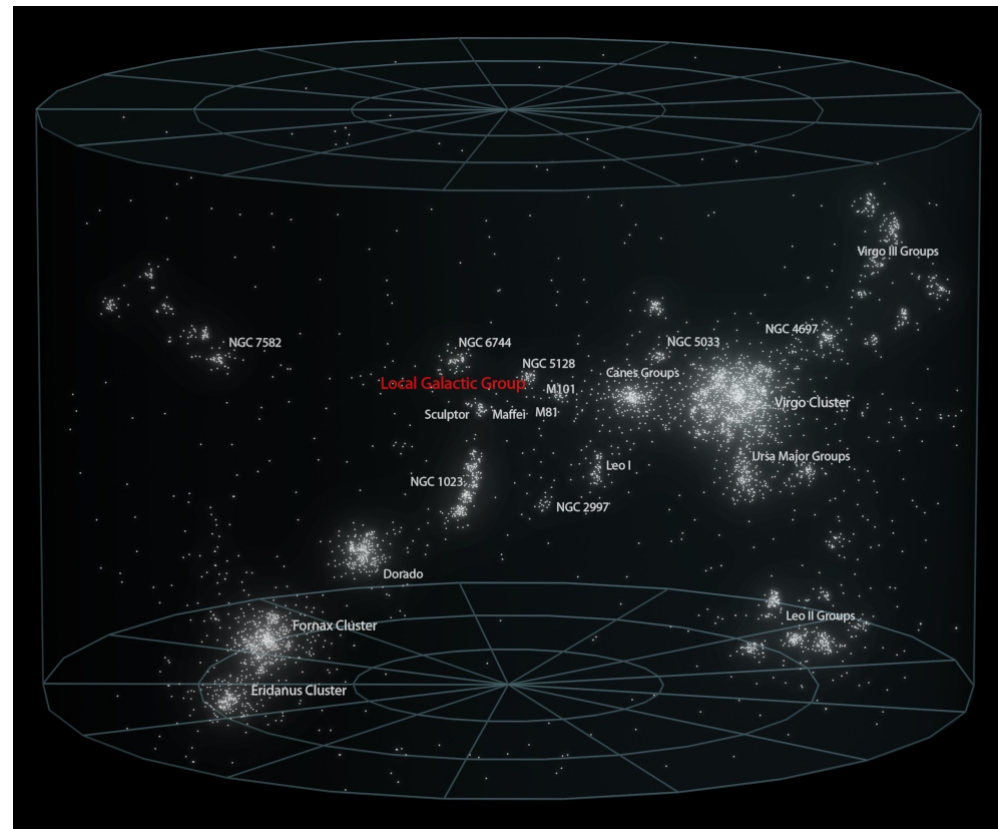
Lokalna grupa galaktyk (rysunek w skali!)

Rozmiar: 10 Mly (3 Mpc) Liczba galaktyk: ok. 40

Gromady i supergromady galaktyk

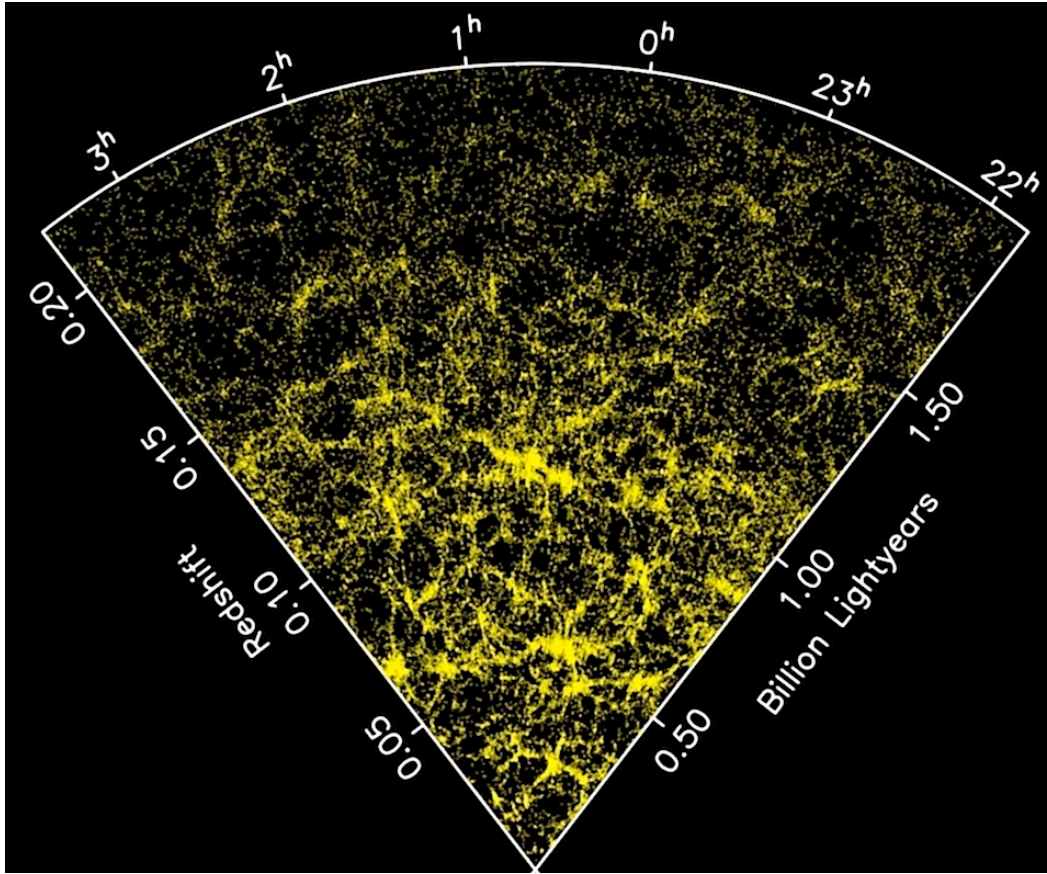


Gromada galaktyk w Pannie
Rozmiar: 8.2 Mly (2.2 Mpc)
Odległość: 53.8 Mly (16.5 Mpc)
Liczba galaktyk: ~1500

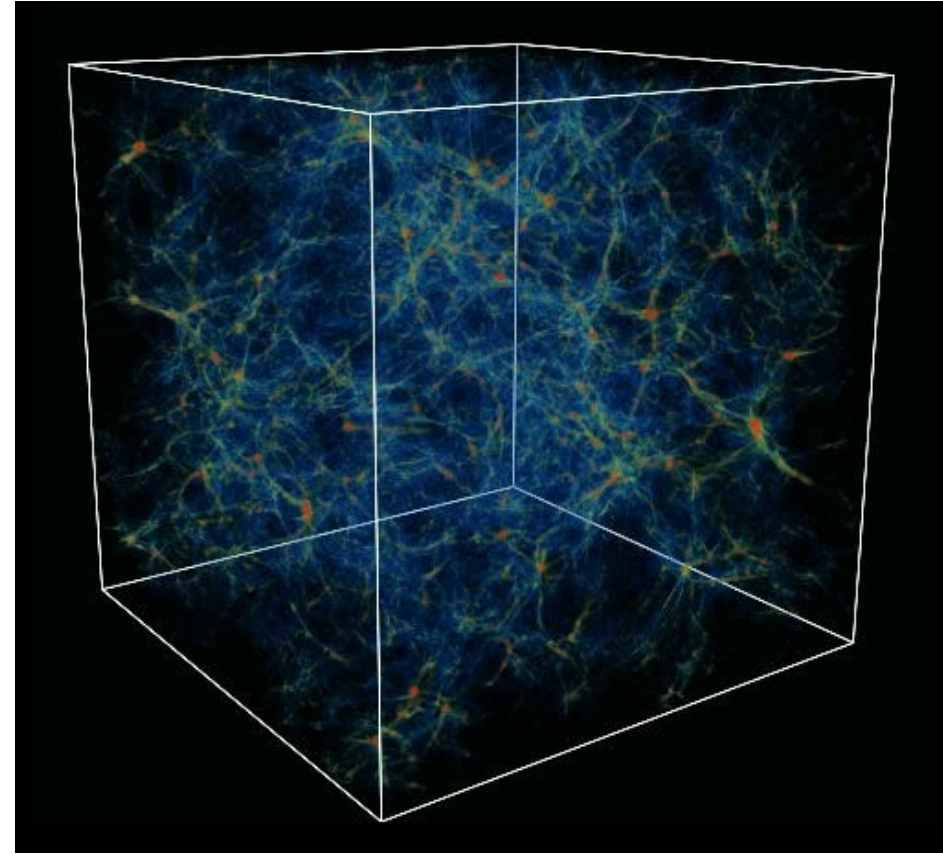


Gromada w Pannie i jej otoczenie (supergromada)
Rozmiar: ~110 Mly (33 Mpc)
Liczba galaktyk: ~10k

Struktury wielkoskalowe



Mapa odległości kilkadziesiąt tys. galaktyk. Każde większe zgęszczenie to supergromada galaktyk!

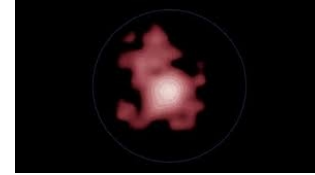


Symulacja rozkładu galaktyk w przestrzeni.

Najodleglejsze obiekty



Ultra głębokie pole Hubble'a



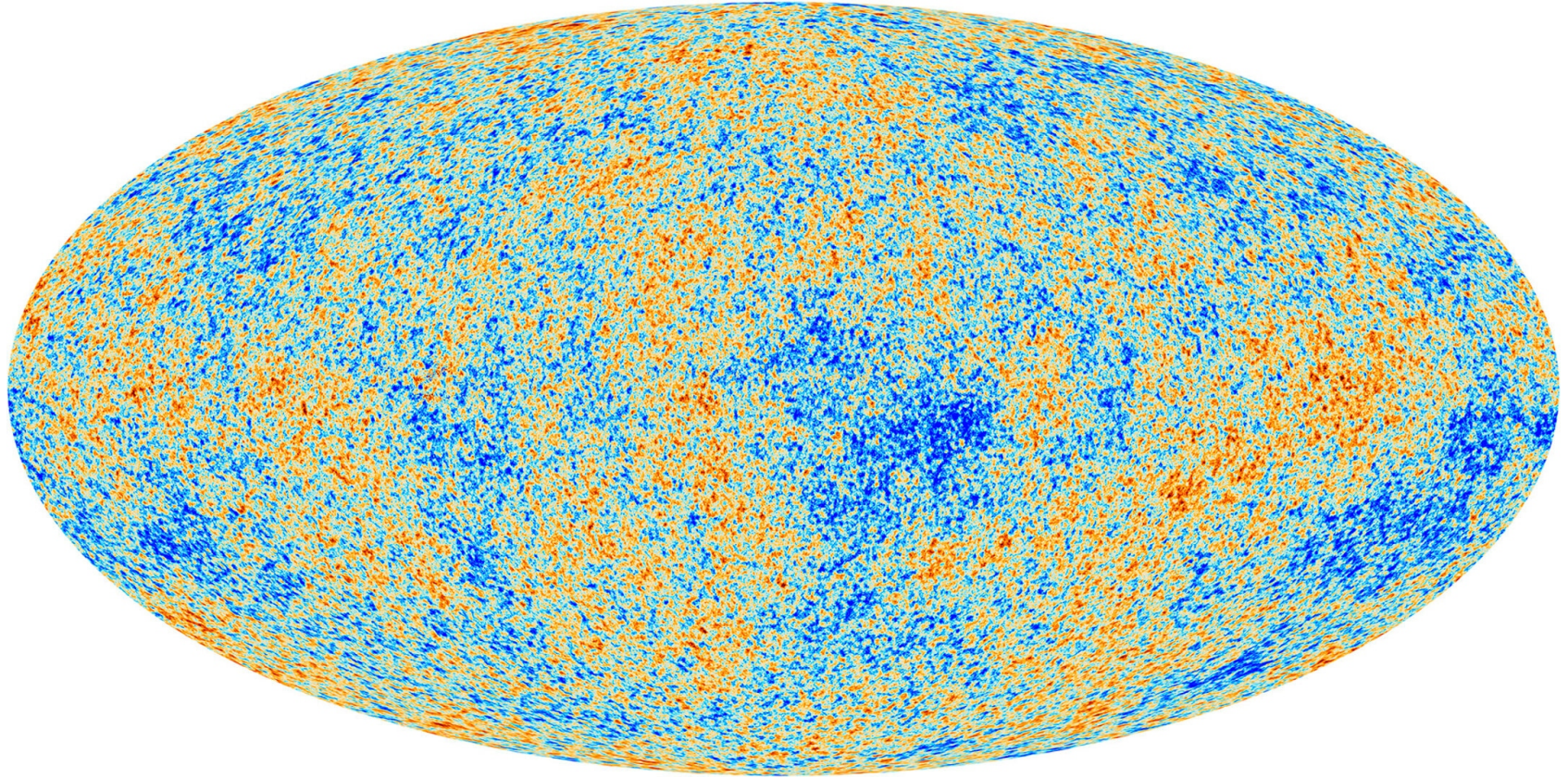
Najodleglejsza znana galaktyka (2016)

GN-z11

ok. 13.4 Gly (4.1 Gpc)

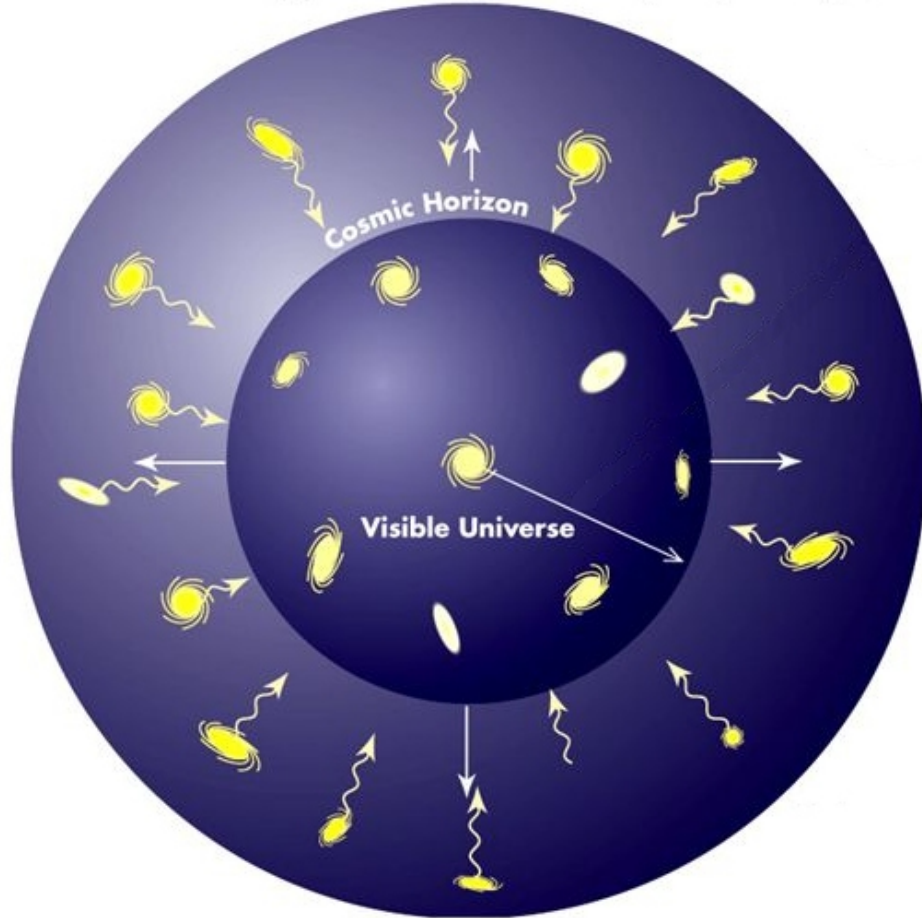
Światło pochodzi z czasów
gdy Wszechświat miał ok. 400 mln lat
(obecnie ma ok. 13.8 mld lat).

Najodległejsze obiekty



Mikrofalowe promieniowanie tła – całe niebo – zdjęcie Wszechświata ok. 380 tys. lat po Wielkim Wybuchu, gdy nie było jeszcze żadnych obiektów, tylko niemal równomiernie rozłożona materia złożona z wodoru, helu i litu. (odległość ok. 13.8 Gly)

Horyzont kosmologiczny



Odległość ok. 13.8 Gly
i stale rośnie (z prędkością światła).

Wszechświat na jednym slajdzie

skala odległości [R_{Ziemi}]	nowe obiekty w zasięgu
1	Ziemia
10	(sztuczne satelity)
10^2	Księżyc
10^3	
10^4	Wenus, Mars
10^5	Słońce, Jowisz
10^6	Neptun

↑
↓
planetoidy

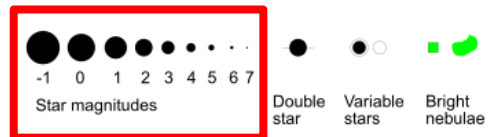
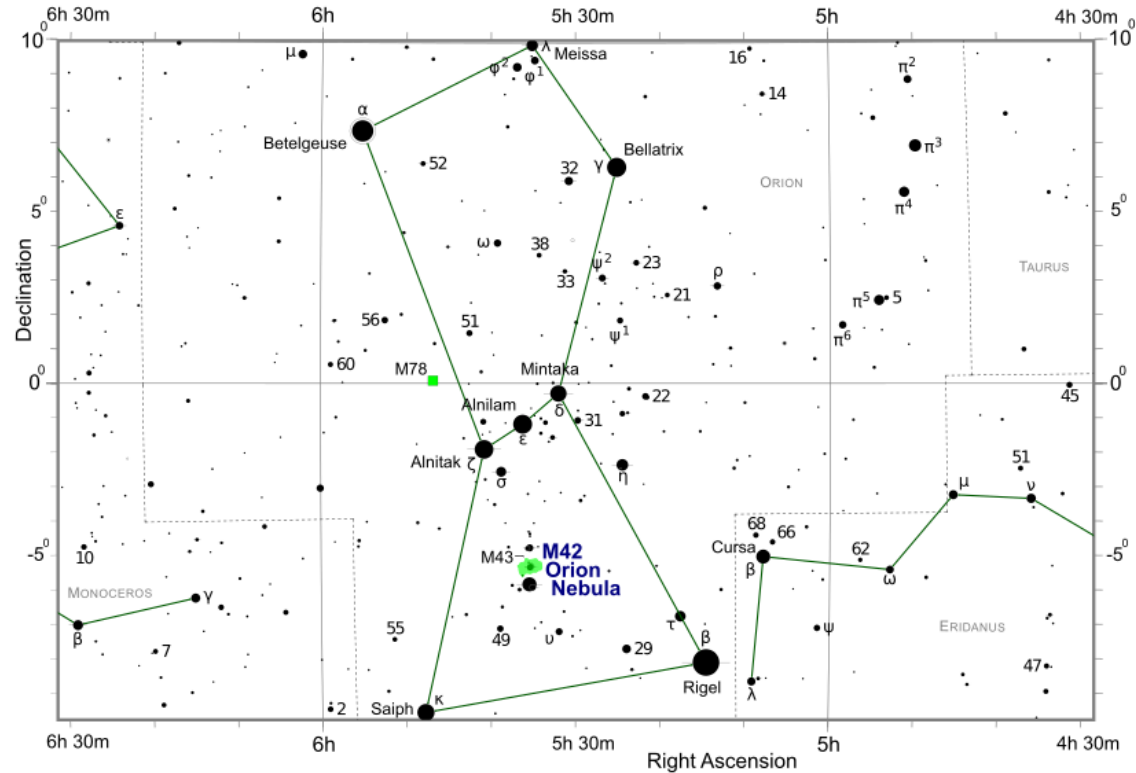
↑
↓
kometry

↑
↓
całe mnóstwo
różnorodnych obiektów:
układy i gromady gwiazd
mgławic itd.

SKALA JASNOŚCI

Jasności obiektów na niebie

Messier 42 - M42 - Orion Nebula



Jasności obiektów na niebie







Najstarszym zachowanym opisem systemu podziału jasności podobnym do współczesnego jest fragment poematu edukacyjnego "Astronomica" w którym rzymski poeta Manilius dzieli gwizdy na kategorie od 1 do 6 (1 najjaśniejsze, 6 najśłabsze).

Konstruuje również obrazową metaforę porównując gwiazdy pierwszej jasności do rzymskich senatorów a gwiazdy jasności szóstej do „bezimiennego tłumu”.

System ten używał (i rozpropagował) grecki/rzymski filozof Ptolemeusz w swoim wiekopomnym dziele „Almagest”.

Skala jasności obiektów na niebie

Jasność obserwowaną m podaje się w **wielkościach gwiazdowych** inaczej **magnitudo**. Jest to skala logarytmiczna, gdyż taką skalę ma ludzki zmysł wzroku.

MAGNITUDE			BRIGHTNESS
1	<i>x 2.5 dimmer</i>		
2	<i>x 2.5 dimmer</i>		x 2.5
3	<i>x 2.5 dimmer</i>		x 6.25
4	<i>x 2.5 dimmer</i>		x 16
5	<i>x 2.5 dimmer</i>		x 40
6	<i>x 2.5 dimmer</i>		x 100

Różnicę jasności w wielkościach gwiazdowych opisuje wzór Pogsona:

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

m – jasność w wielkościach gwiazdowych
 I – natężenie oświetlenia w dowolnych jedn.

Punktem zerowym tradycyjnie była gwiazda Vega (w gwiazdozbiornie Lwów), której arbitralnie przypisano jasność 0.0^m .

Jasność obserwowana

Odpowiednikiem wielkości gwiazdowej w fizyce jest strumień promieniowania padający na jednostkę powierzchni:

Natężenie oświetlenia – dla ludzkiego oka i światła widzialnego (luxy)

Natężenie promieniowania – dla całego zakresu fal e-m (W/m^2)

Słońce	-27^m	100000 lux	1300 W/m^2
Księżyc w pełni	-12.5^m	0.2 lux	0.001 W/m^2
Syriusz	-1.5^m	10^{-5} lux	10^{-8} W/m^2

Jasności obiektów na niebie - przykłady



Słońce	-27 ^m
Super jasny bolid	-17 ^m
Księżyc w pełni	-12 ^m
Stacja kosmiczna	-5 ^m
Wenus (najjaśniejsza planeta)	-4 ^m
Syriusz (najjaśniejsza gwiazda)	-1.5 ^m
Gwiazda polarna	2 ^m
Limit ludzkiego oka	6 ^m
Limit lornetki	9 ^m
Teleskop 1m z kamerą	20 ^m
Teleskop Hubble'a	30 ^m
Największe tele.	30 ^m

Jaka jest różnica natężenia światła między najjaśniejszym i najśłabszym obiektem?

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

$$m_1 = 30^m \quad m_2 = -27^m$$

$$\frac{I_2}{I_1} = 6.3 \cdot 10^{22}$$

Jasność obiektu na niebie

Od czego zależy obserwowana jasność obiektu?

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

m – jasność obserwowana obiektu (w wielkościach gwiazdowych)

M – jasność absolutna obiektu (= jasność z odległości 10pc) = moc promieniowania

d – odległość od obiektu (w pc)

A – pochłanianie światła pomiędzy obiektem a obserwatorem = absorpcja światła

Jasności obiektów na niebie

Przykład

Jasność absolutna M Słońca = $+5^m$

Najsłabsze obiekty widoczne gołym okiem mają jasność ok. 6^m .

A przez największe teleskopyajsłabsze obiekty mają jasność ok. 30^m .

1. Czy Słońce byłoby widoczne z odległości 100pc?

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

$$m = 5 + 5 \log_{10}(100) - 5 = 10^m$$

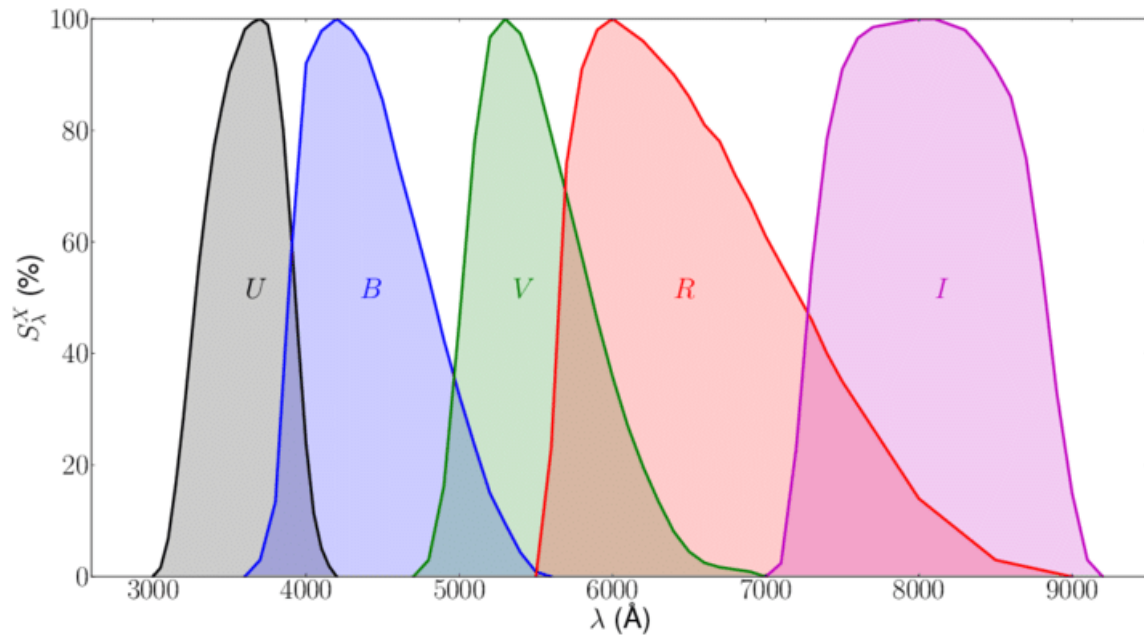
2. Czy Słońce byłoby widoczne z sąsiedniej galaktyki w Andromedzie?

$$m = 5 + 5 \log_{10}(778000) - 5 = 29.5^m$$

Jasność obiektu na niebie

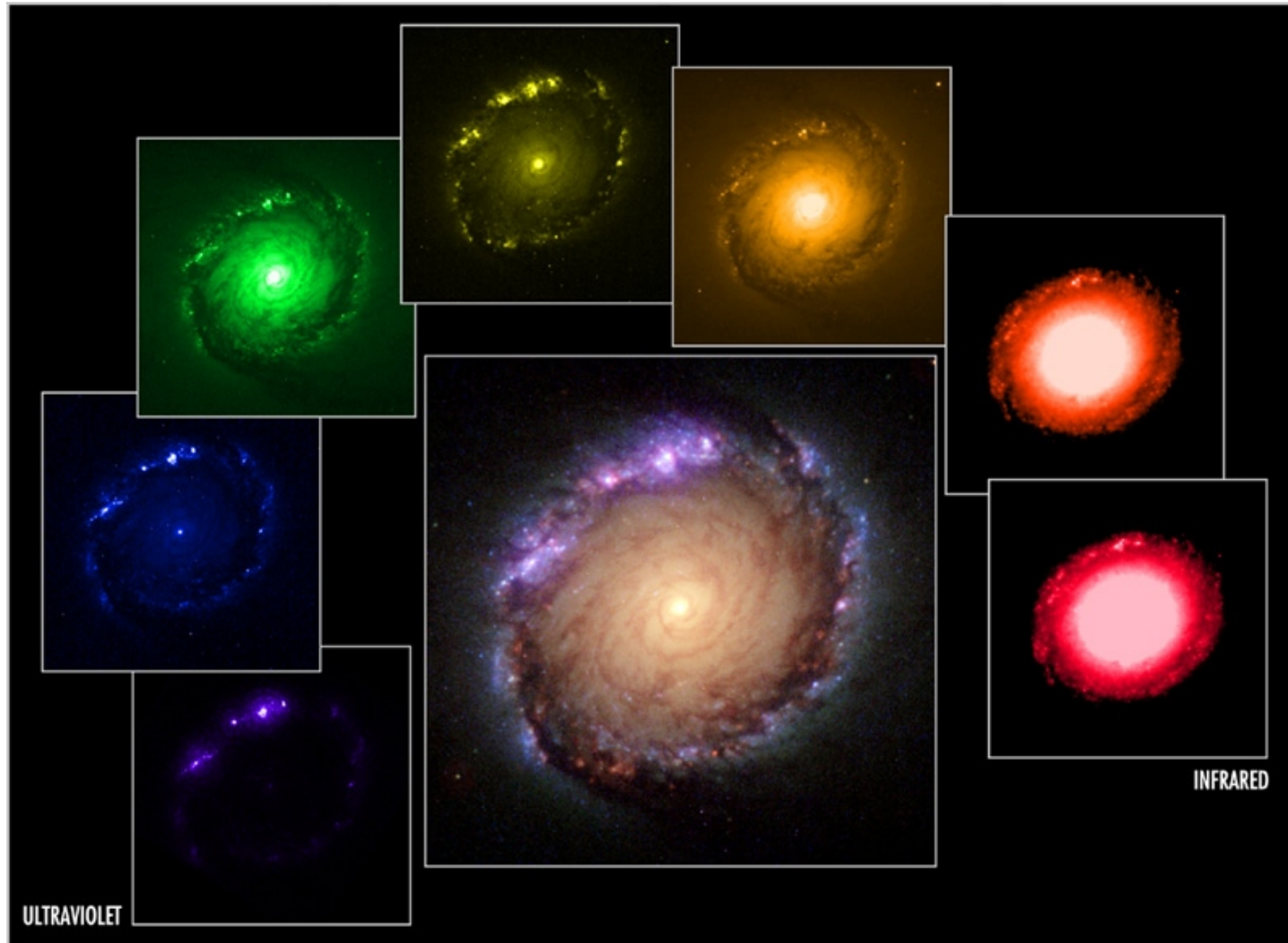
Od czego jeszcze zależy obserwowana jasność obiektu?

Od długości fali światła na której obserwujemy.



System fotometryczny Johnson-Cousin, filtry oznaczone literami: U, B, V, R oraz I.

Jasność obiektu na niebie

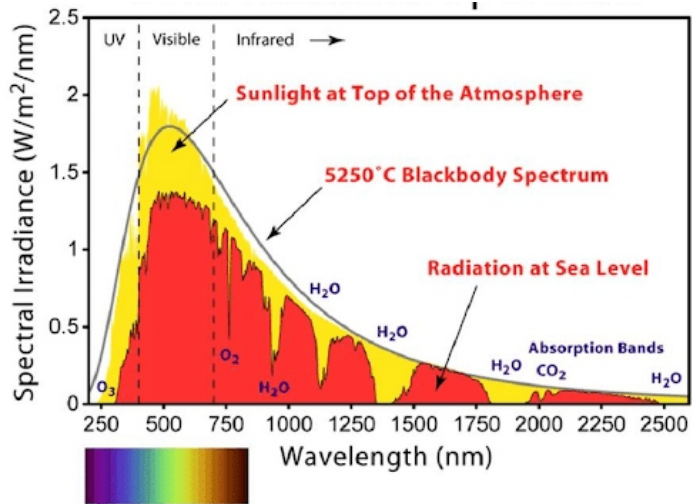


Jasność obiektu na niebie

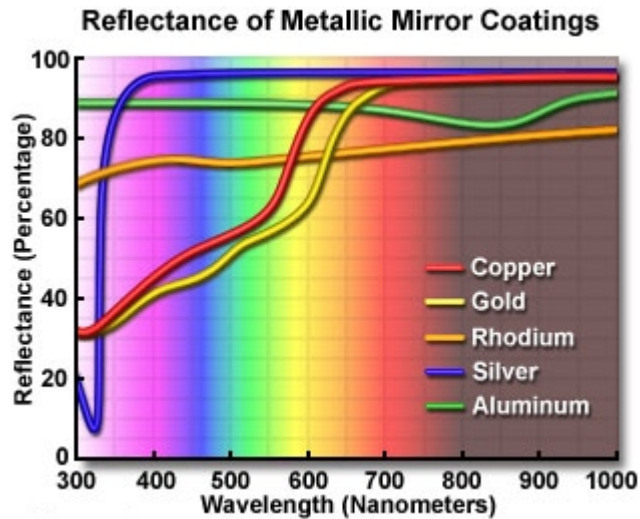
Od czego jeszcze zależy obserwowana jasność obiektu?

Od widma obiektu, atmosfery ziemi, transmisji optyki, czułości kamery itp.

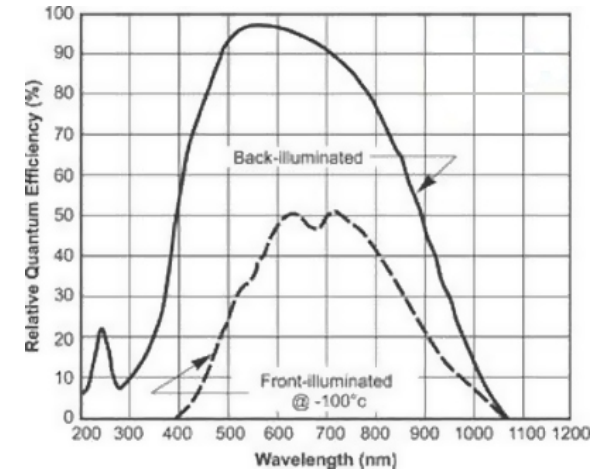
Gwiazda + atmosfera Ziemi



Optyka teleskopu



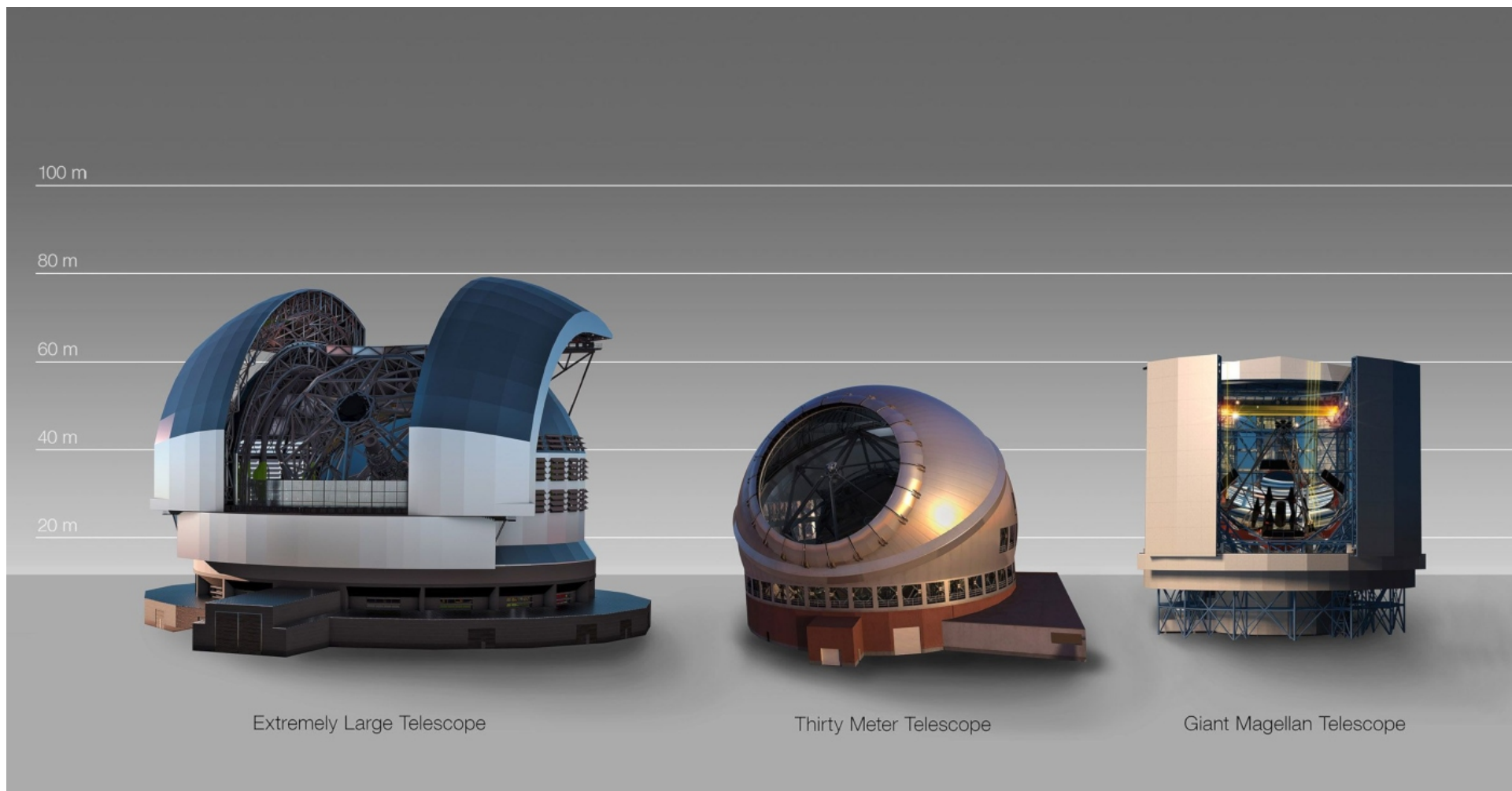
Kamera



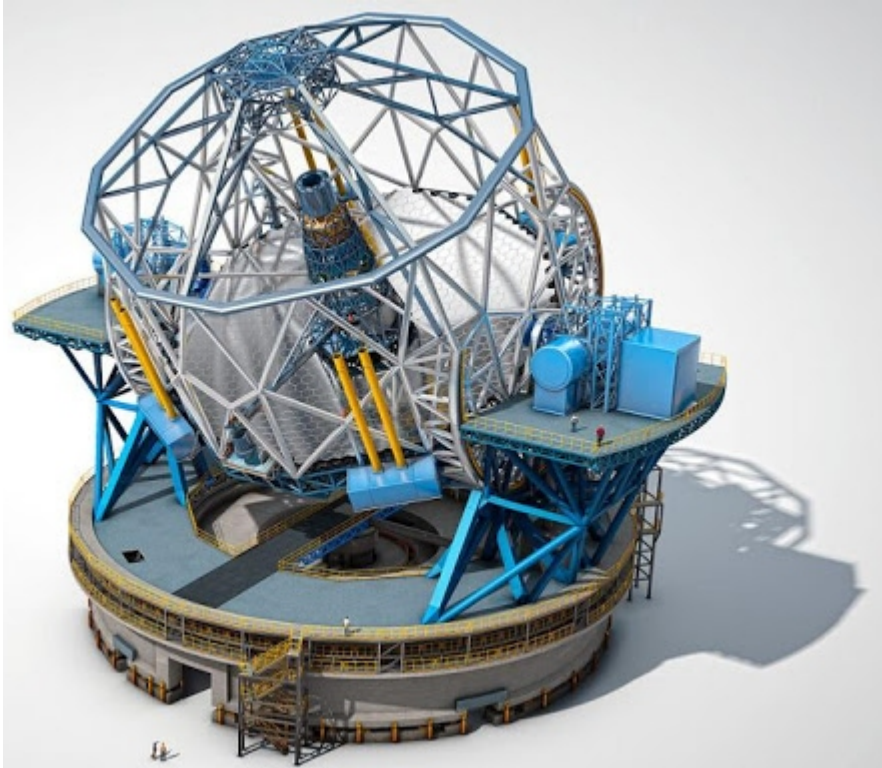
Przy dokładnych pomiarach jasności konieczność kalibracji teleskopów astronomicznych.

TELESKOPY OPTYCZNE

Wielkie teleskopy nowej generacji



Ekstremalnie Wielki Teleskop



Średnica głównego lustra: 39.3m

Liczba segmentów lustra gł: 798

Powierzchnia czynna lustra: 978 m²

Powierzchnia czynna lustra:

~100 mln razy większa niż ludzkiego oka

~256 razy większa niż Hubble'a

~13 razy większa niż obecne teleskopy

~1.5 razy większa niż projektowany TMT

Masa teleskopu: 3700 ton

Masa kopuły: 5000 ton

Start: 2025???

Po co nam teleskop?

Aby zebrać jak największą ilość światła.

Aby zobrazować szczegóły o zbyt małych rozmiarach kątowych.

Aby umożliwić zarejestrowanie obrazu.



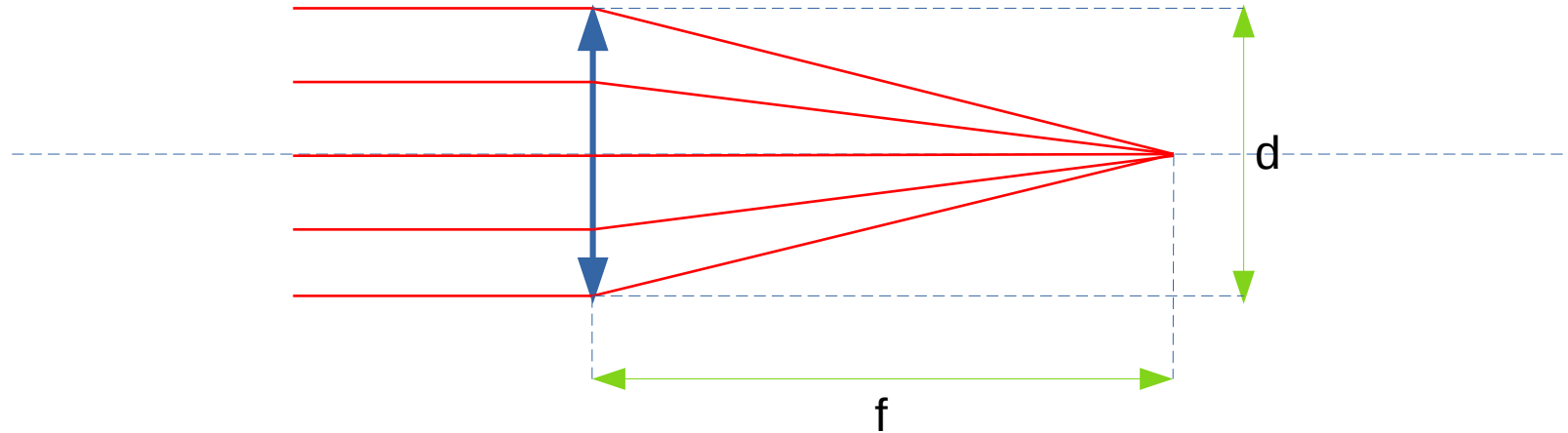
Amatorska luneta Sky Watcher



Obiektyw Canon 1200/5.6

Podstawowe parametry techniczne

Każdy teleskop astronomiczny lub obiektyw fotograficzny da się przybliżyć pojedynczą soczewką, gdyż spełnia dokładnie tą samą funkcję.



d – średnica obiektywu d

f – ogniskowa

s – światłosiła

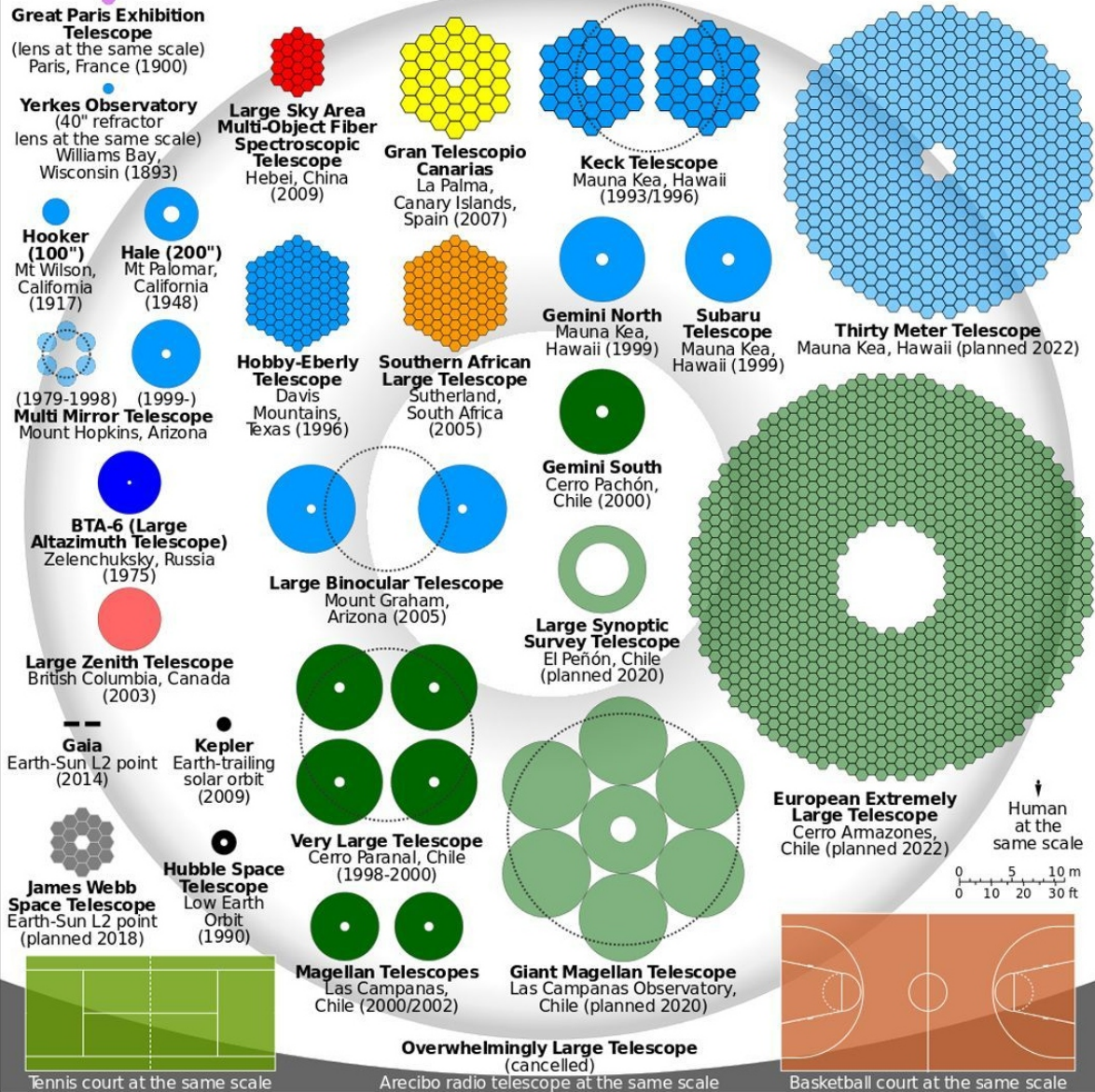
$$s = \frac{f}{d}$$

Podstawowe parametry techniczne

Średnica obiektywu (inaczej apertura)

Średnica efektywna – średnica koła o powierzchni takiej jak powierzchnia czynna – zbierająca światło w teleskopie, zawsze mniejsza lub równa średnicy geometrycznej lustra głównego.

1. średnica efektywna decyduje o maksymalnym **zasięgu teleskopu**, jakie najśłabsze (najciemniejsze) obiekty można zarejestrować, o ile inne czynniki tego nie ograniczą (np. wady optyczne itd)
2. średnica geometryczna decyduje o maksymalnej **zdolności rozdzielczej**, jakie najdrobniejsze pod względem rozmiarów kątowych detale można będzie zarejestrować, o ile inne czynniki tego nie ograniczą (np. źle dobrany rozmiar piksela kamery, atmosfera ziemi itd)



Porównanie rozmiarów i kształtów największych istniejących i planowanych teleskopów na świecie z zachowaniem skali.

Aktualnie największym pojedynczym teleskopem świata jest:

Gran Telescopio Canarias na Kanarach

Największą grupą teleskopów mogącą obserwować wspólnie jest:

Very Large Telescope w Chile

Podstawowe parametry funkcjonalne

Zasięg teleskopu – jakie najśłabsze obiekty jesteśmy w stanie zarejestrować, czyli jaka jest wielkość gwiazdowa najśłabszych możliwych do detekcji obiektów.

Co to znaczy zarejestrować? Dokładnie omówimy przy kamerach.

Dla obserwacji wizualnych zasięg można oszacować porównując powierzchnię maksymalnie otwartej źrenicy i powierzchnię czynną teleskopu (obiektywu).

$$m_{\text{teleskop}} - m_{\text{oko}} = 2.5 \log_{10} \left(\frac{\pi R^2}{\pi 3^2} \right)$$

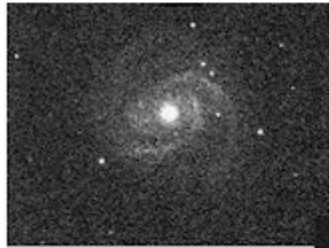
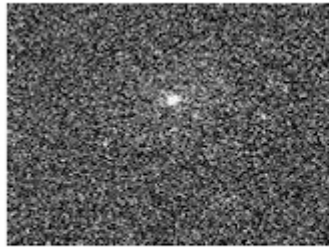
Zasięg ludzkiego oka wynosi ok. 6 mag.

Zasięg oka z teleskopem o średnicy 10m wynosi ok. 22 mag.

Podstawowe parametry funkcjonalne

Zasięg teleskopu

Dla kamer zależy od wielu czynników,
przede wszystkim od czasu naświetlania zdjęcia – teoretycznie bez limitu!

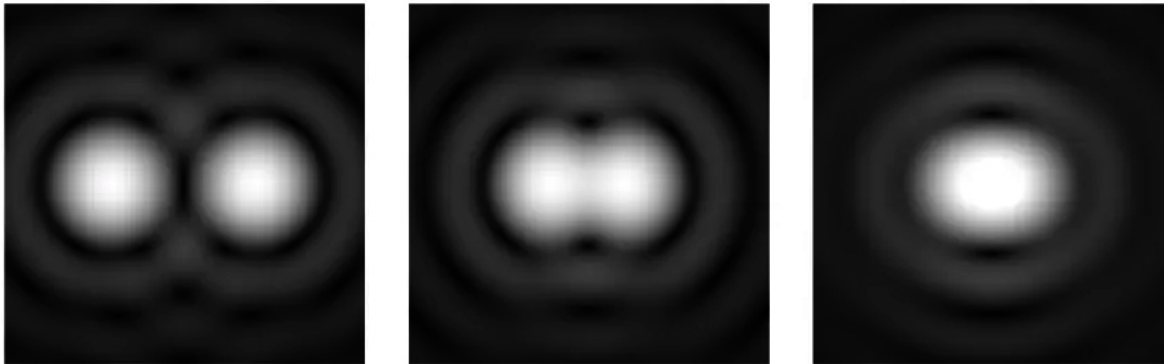


Zdjęcia z czasem naświetlania:
1, 10, 100 i 1000s

Podstawowe parametry funkcjonalne

Kątowa **zdolność rozdzielcza** teleskopu – minimalna odległość kątowa θ przy której obrazy dwóch identycznych gwiazdy na niebie będą jeszcze rozdzielone, czyli nie zleją się w jeden obiekt.

Ostateczny limit zdolności rozdzielczej wynika z dyfrakcji światła (lub kwantowej natury światła).



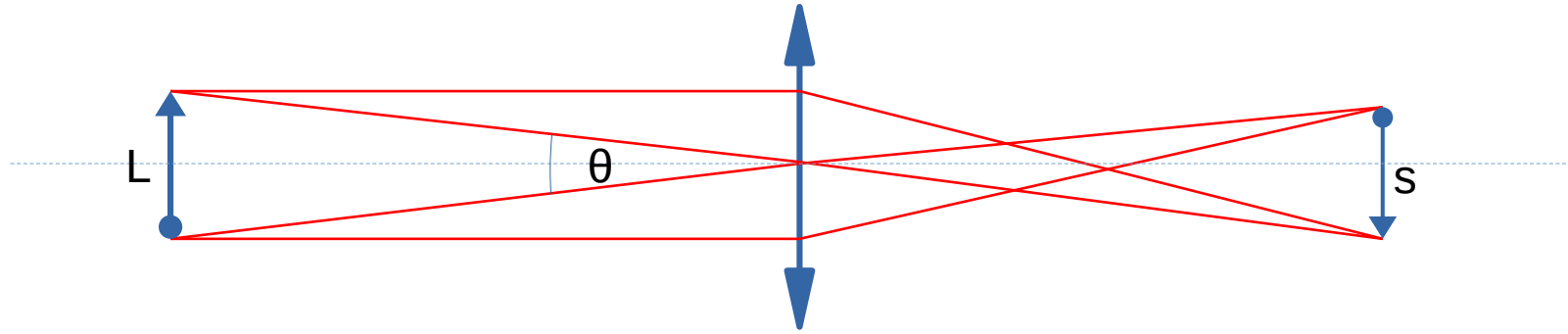
$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

Przykładowo ($\lambda=550\text{nm}$):

- dla oka ($D=6\text{mm}$) 23"
- dla teleskopu $D=10\text{m}$ 0.01"

Od lewej: gwiazdy rozdzielone, na granicy i nierozdzielone.

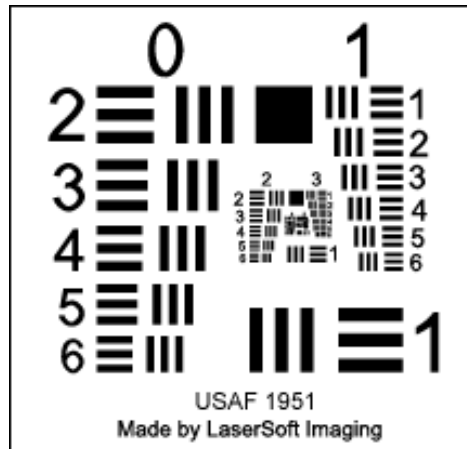
Rozdzielczość optyki bywa różnie opisywana w różnych zagadnieniach



Rozdzielczość kątowna – astronomia (minimalny kąt θ)

Rozdzielczość liniowa na obrazie – fotografia – (minimalny rozmiar s)

Rozdzielczość liniowa na obiekcie – badania satelitarne – (min. rozmiar L)



a. Landsat ETM+



b. ATLAS



c. QuickBird

Podstawowe parametry funkcjonalne

Podstawowym czynnikiem zmniejszającym zdolność rozdzielczą teleskopu są drgania obrazu wywołane ruchem powietrza w atmosferze Ziemi – **seeing**.



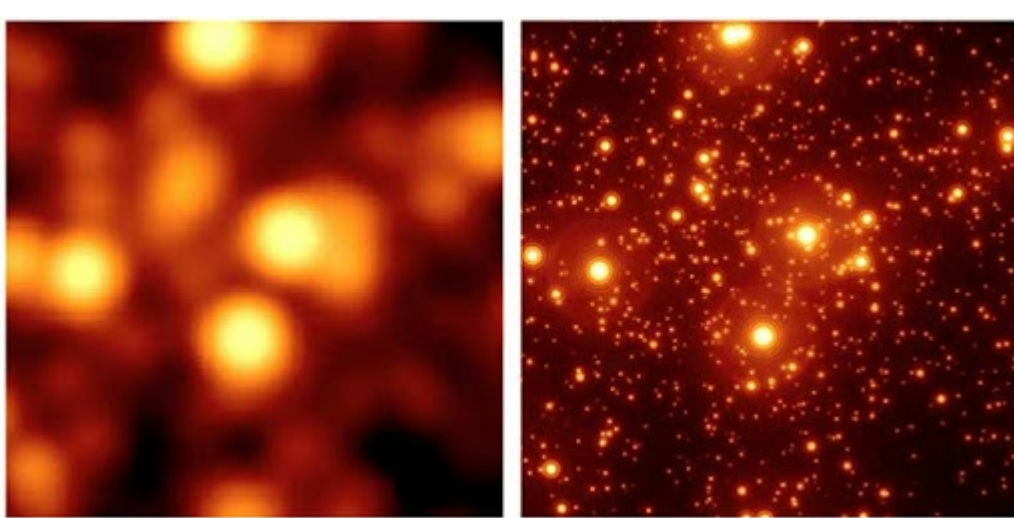
Seeing ogranicza zdolność rozdzielczą wszystkich teleskopów na Ziemi do ok 2" – 0.5" (w zależności od miejsca).

Są dwie podstawowe metody by sobie z nim poradzić:

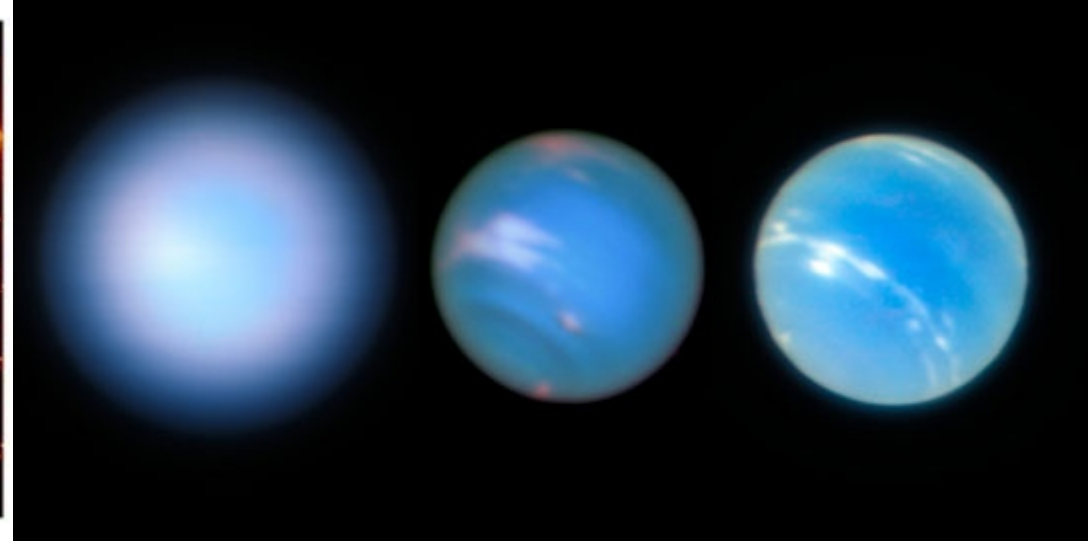
1. teleskop kosmiczny
2. optyka adaptacyjna

Optyka adaptacyjna

Optyka adaptacyjna polega na korygowaniu na żywo toru lotu promieni światła, (setki razy na sekundę) tak by zniwelować zaburzenia wprowadzone przez atmosferę ziemską.

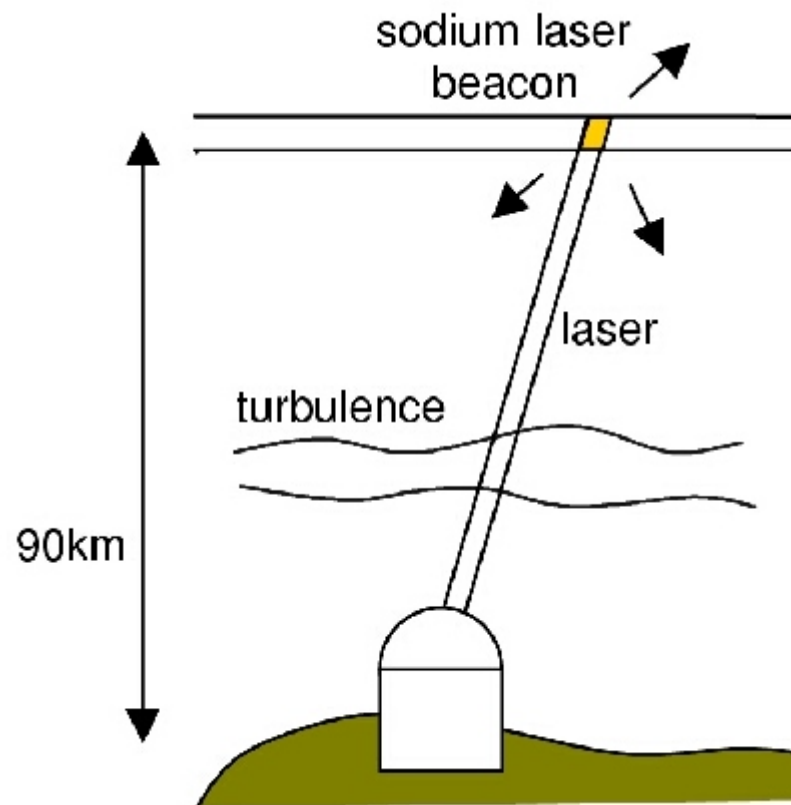
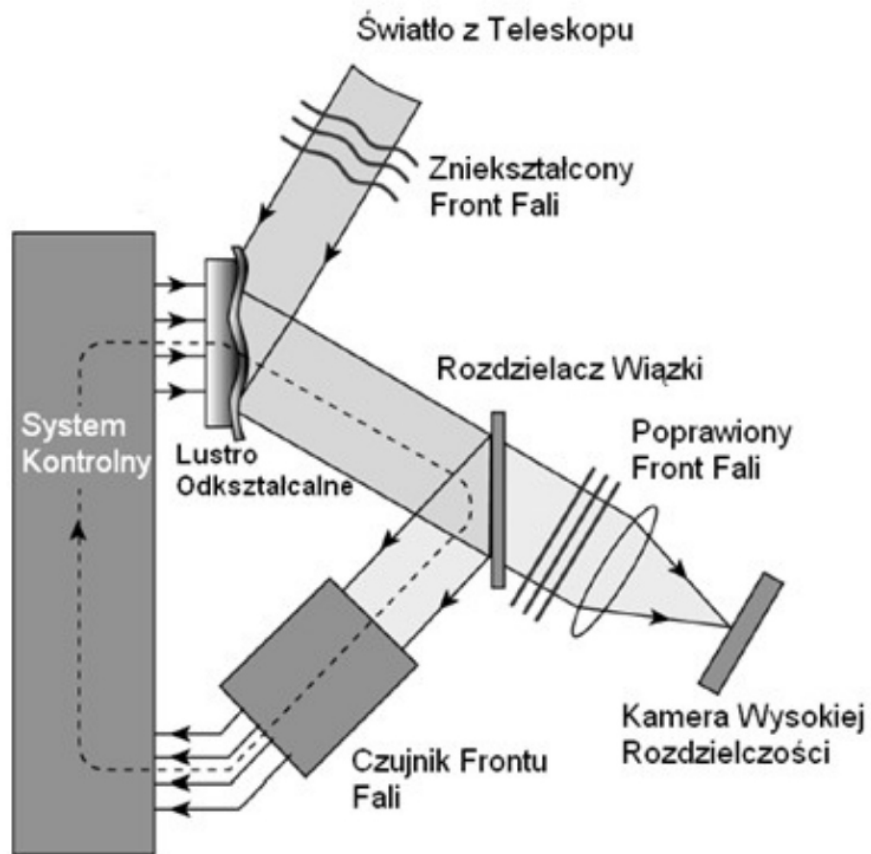


Z lewej zdjęcie z dużego naziemnego teleskopu z prawej to samo z użyciem optyki adaptacyjnej.



Z lewej zdjęcie z dużego naziemnego teleskopu, na środku z teleskopu kosmicznego Hubble'a z prawej z Ziemi z użyciem optyki adaptacyjnej.

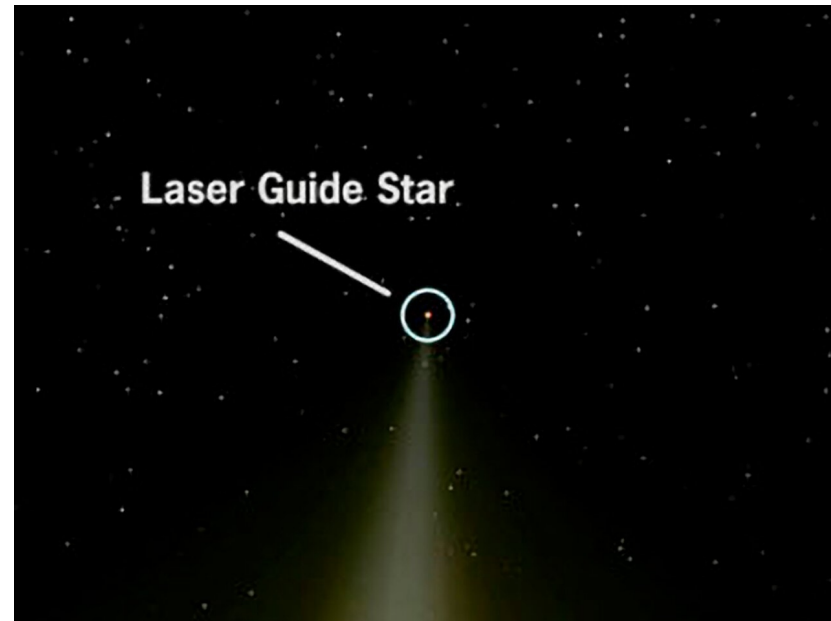
Optyka adaptacyjna



Optyka adaptacyjna



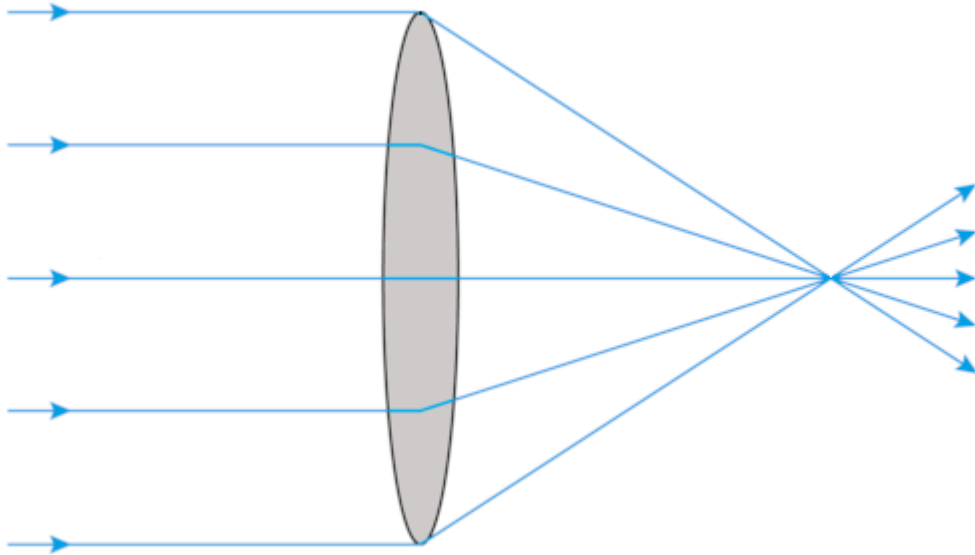
Laser optyki adaptacyjnej (ESO)



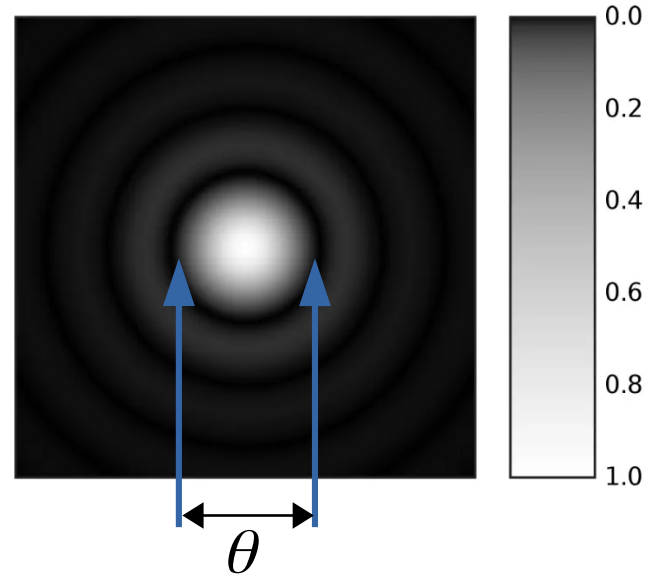
„Sztuczna gwiazda”

Limit dyfrakcyjny

Jaki obraz powstanie w idealnym teleskopie który jest skierowany na punktowe źródło światła znajdujące się nieskończenie daleko?



Dysk Airy'ego



Rozmiar kątowy dysku Airy (obrazu punktu światła) w idealnym teleskopie zależy od średnicy teleskopu.

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

Podstawowe parametry funkcjonalne

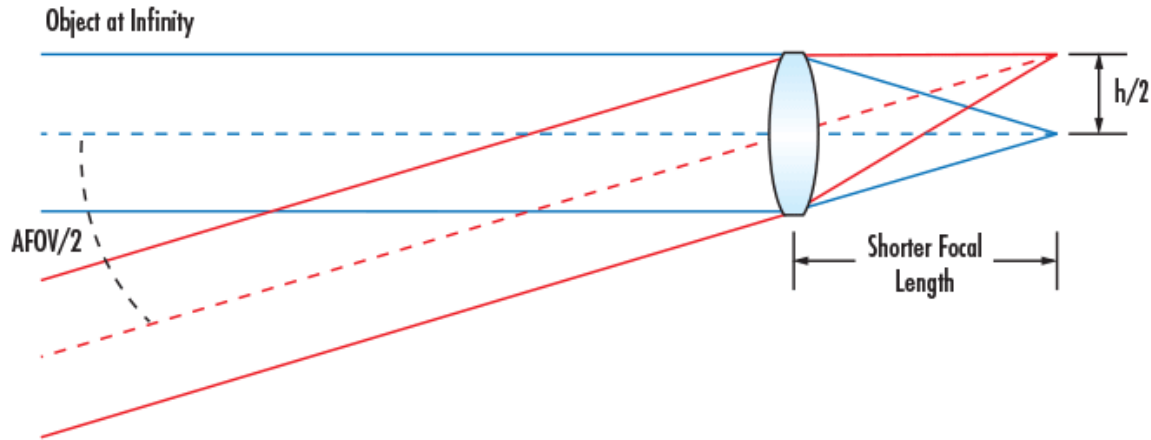


Symulacja zmiany zdolności rozdzielczej wraz z rozmiarem teleskopu (2.4m, 10m, 100m)

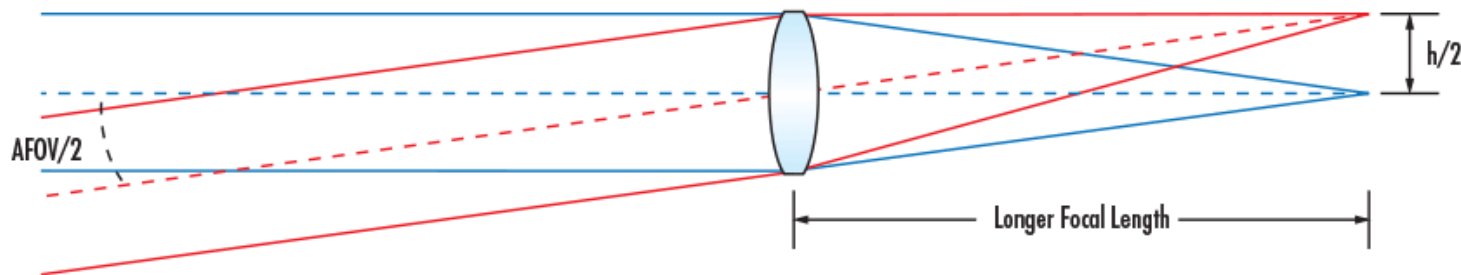
Podstawowe parametry techniczne

Ogniskowa teleskopu

Decyduje o polu widzenia (odległości kątowej pomiędzy skrajnymi punktami widocznymi na obrazie) z daną kamerą.

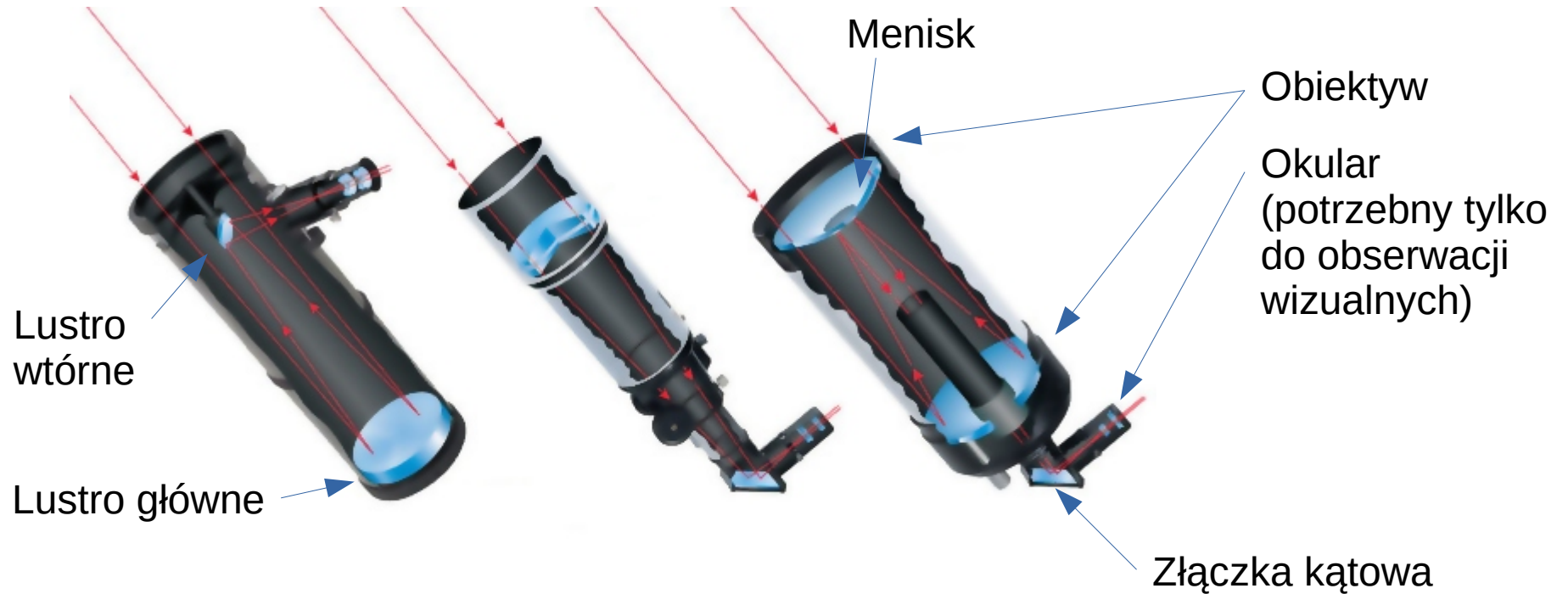


$$AFOV = 2 \operatorname{atan} \left(\frac{h}{2f} \right)$$



„zoom optyczny”
w aparatach cyfrowych,
to właśnie zmiana
pola widzenia
za pomocą zmiany
długości ogniskowej.

Podstawowe typy optyczne teleskopów astronomicznych

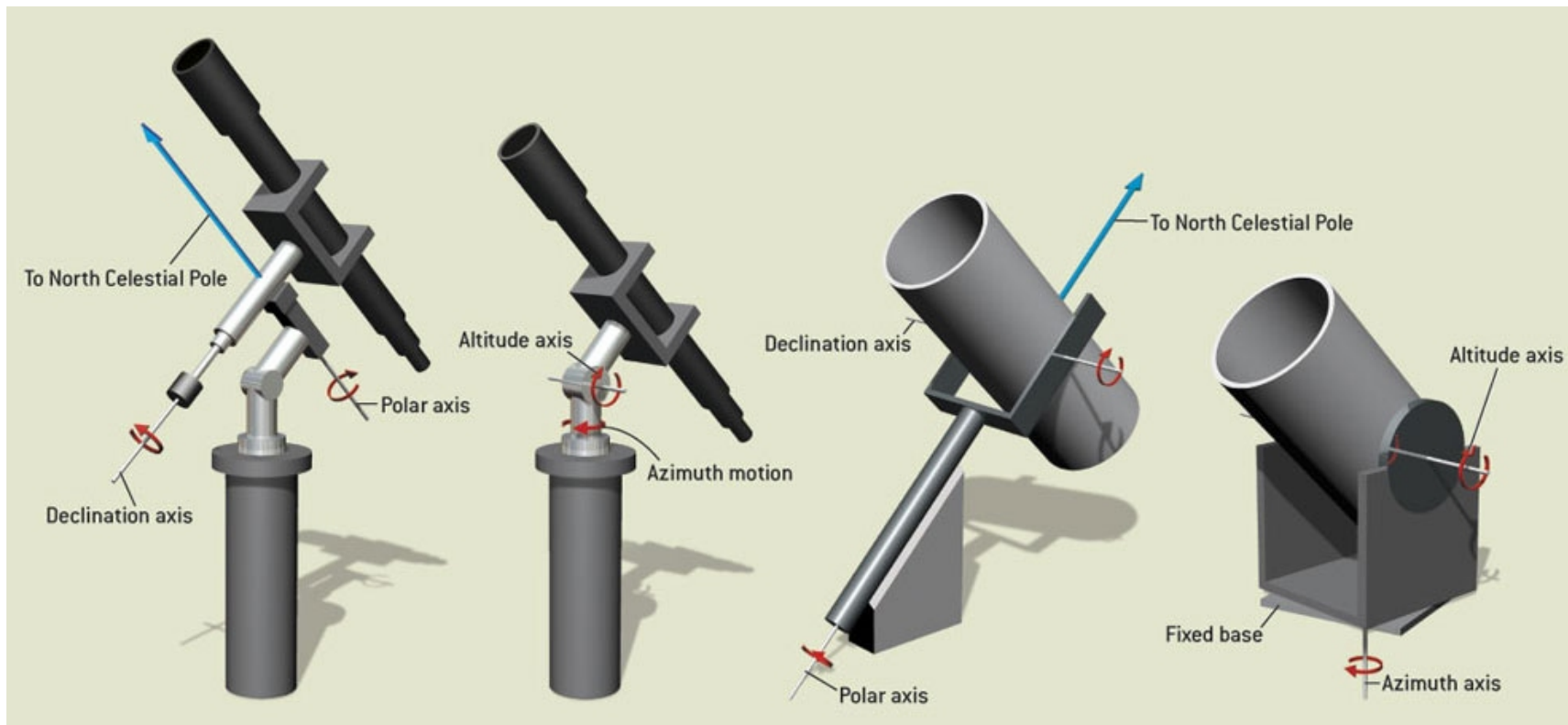


Reflektor – teleskop zwierciadlany

Refraktor – teleskop soczewkowy (luneta)

Katadioptryk – teleskop soczewkowo-zwierciadlany

Podstawowe typy montaży teleskopów astronomicznych



Równikowy
(paralaktyczny)

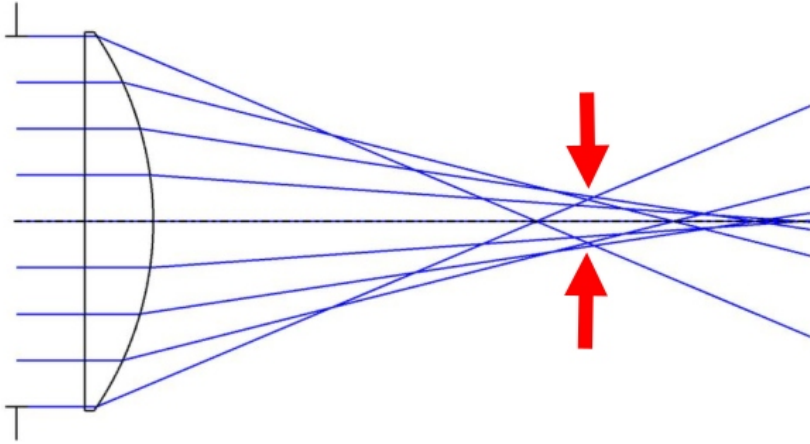
Azymutalny

Równikowy
widłowy

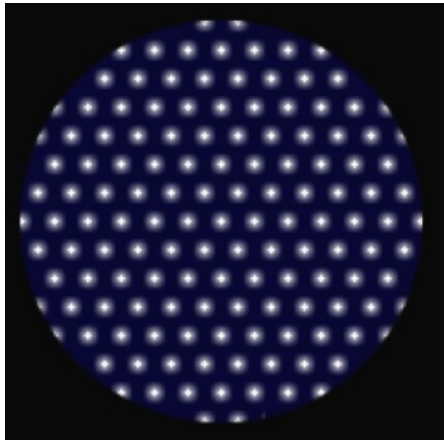
Azymutalny
Dobsona

Wady optyczne

Aberracja sferyczna



Spowodowana sferycznym kształtem lustra lub soczewki.
Promienie z różnych obszarów optyki ogniskują się w różnych miejscach nawet w osi optycznej.
Wpływa na obraz w całym polu widzenia teleskopu.



Symulacja z pominięciem dyfrakcji.

Unaberrated image

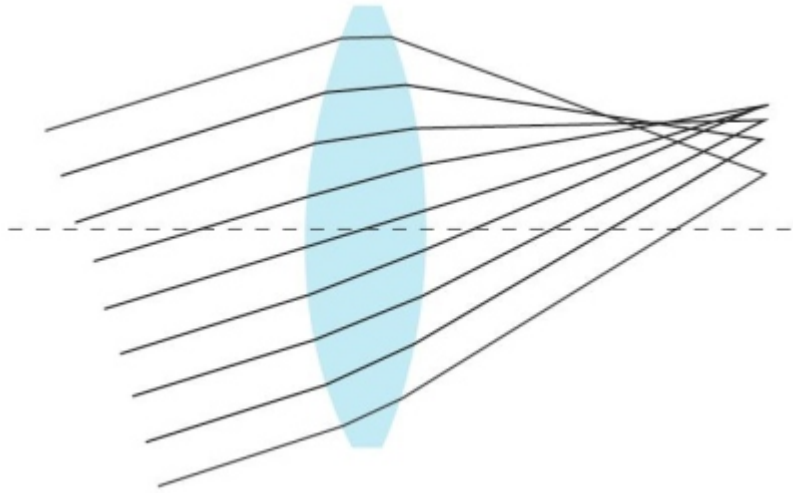


Image with Spherical Aberration

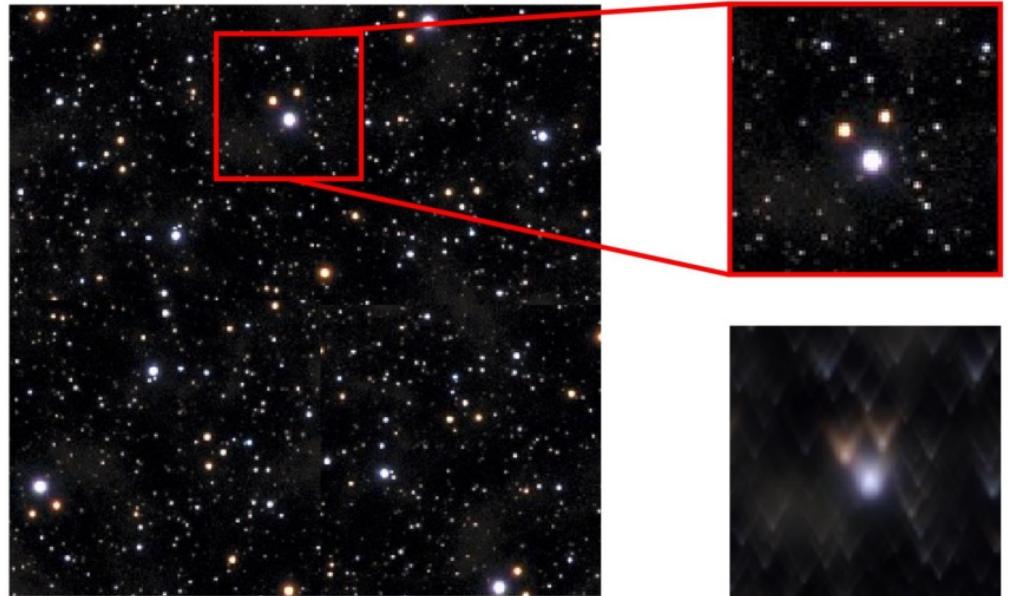
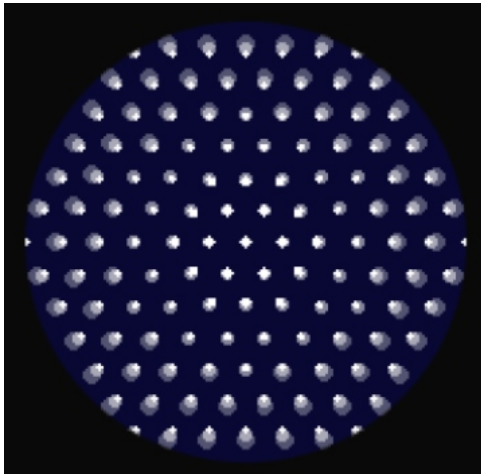


Wady optyczne

Koma

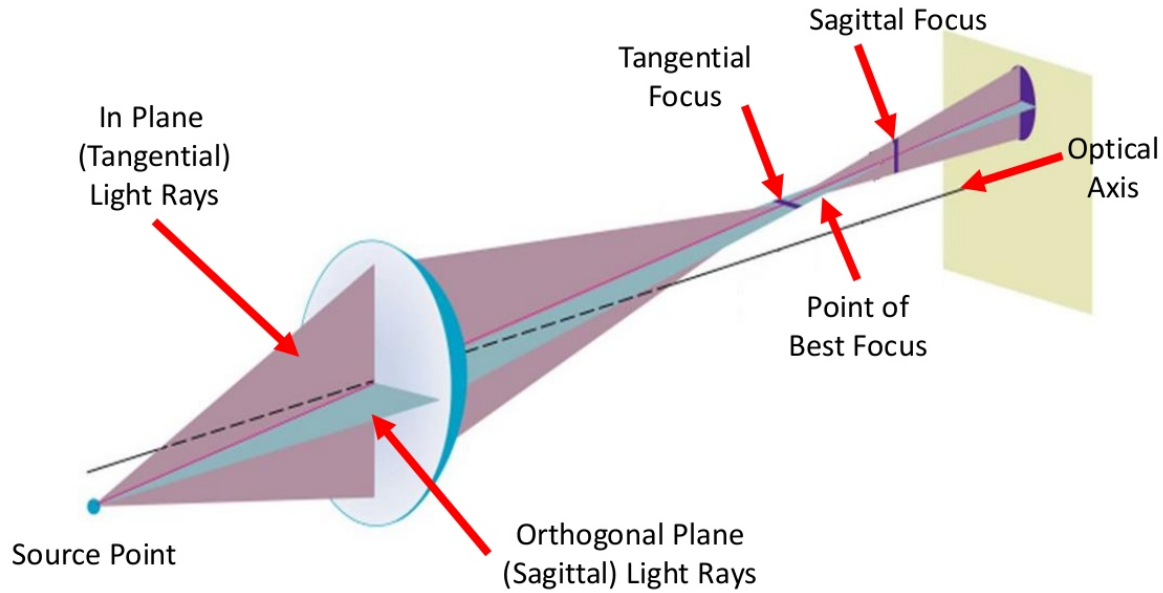


Występuje tylko dla promieni poza osią optyczną a więc poza centrum pola widzenia teleskopu. Wynika z różnych powiększeń obrazu powstałego z promieni przechodzących przez różne fragmenty soczewki / lustra.



Wady optyczne

Astygmatyzm



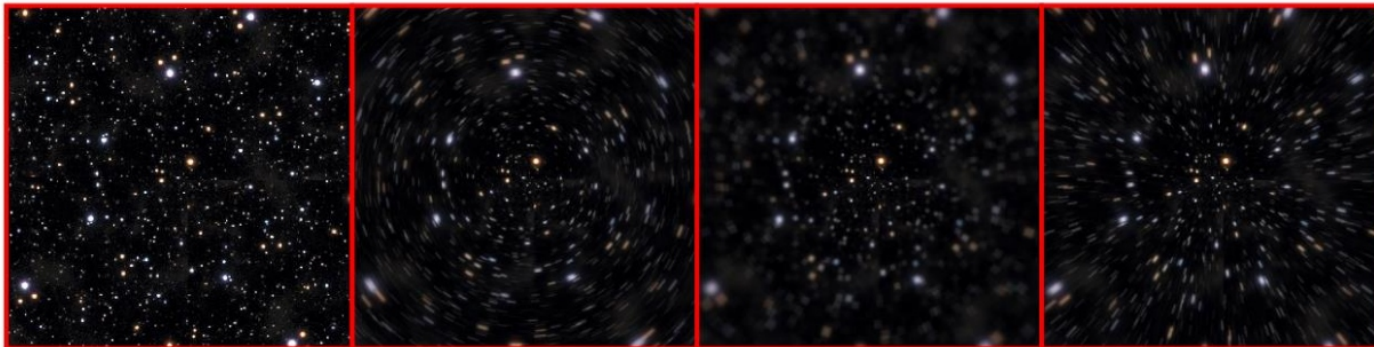
Promienie pozaosiowe przechodząc przez różne części soczewki / lustra mają różne ogniskowe.

Un-aberrated Image

Tangential Focus

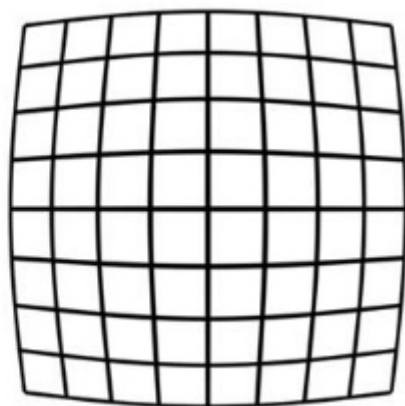
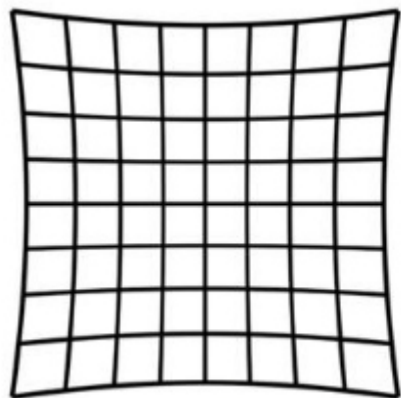
Medial Focus

Sagittal Focus



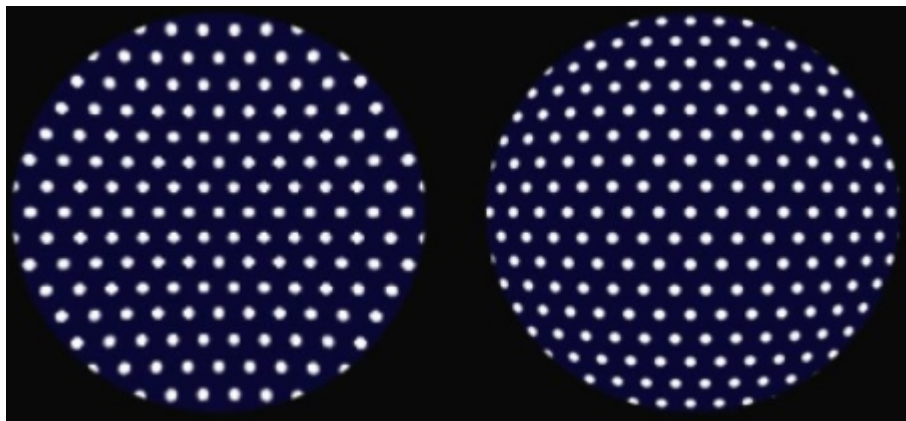
Wady optyczne

Dystorsja



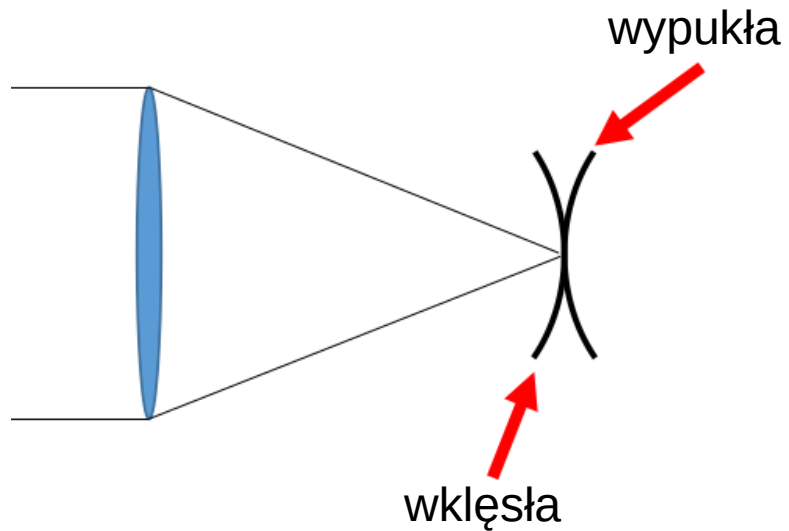
Zmiana powiększenia w zależności od kąta odchylenia promieni od osi optycznej teleskopu.

Dotyczy głównie optyki szerokokątnej.



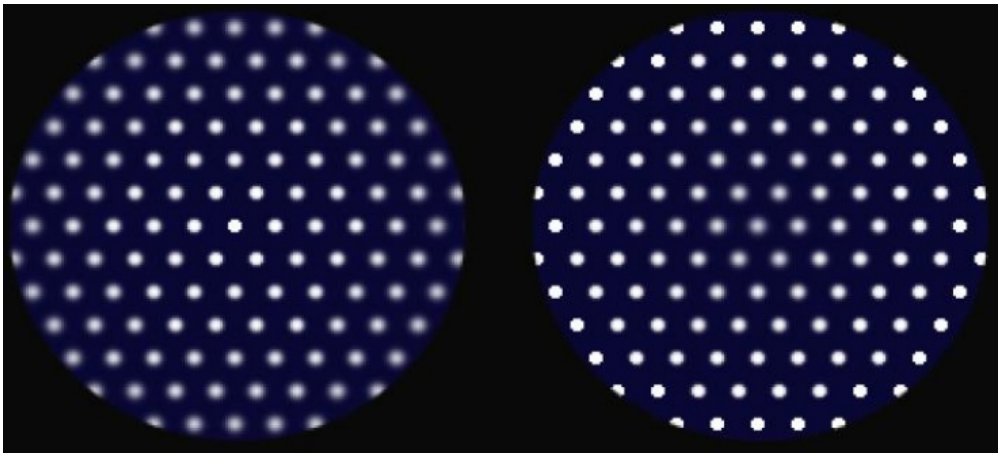
Wady optyczne

Krzywizna pola



Zmiana powiększenia w zależności od kąta odchylenia promieni od osi optycznej teleskopu.

Dotyczy głównie optyki szerokokątnej.



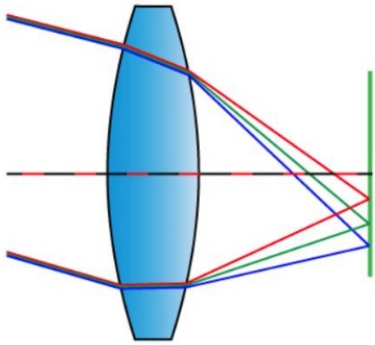
Wady optyczne

Aby zniwelować krzywiznę pola stosuje się wygięte detektory w kamerach.

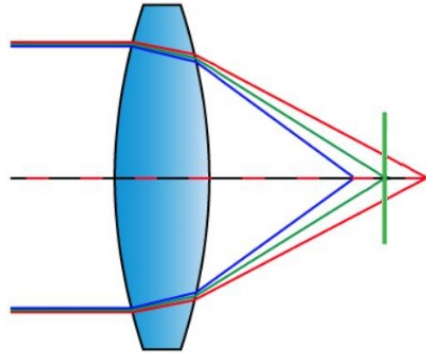


Wady optyczne

Aberracja chromatyczna

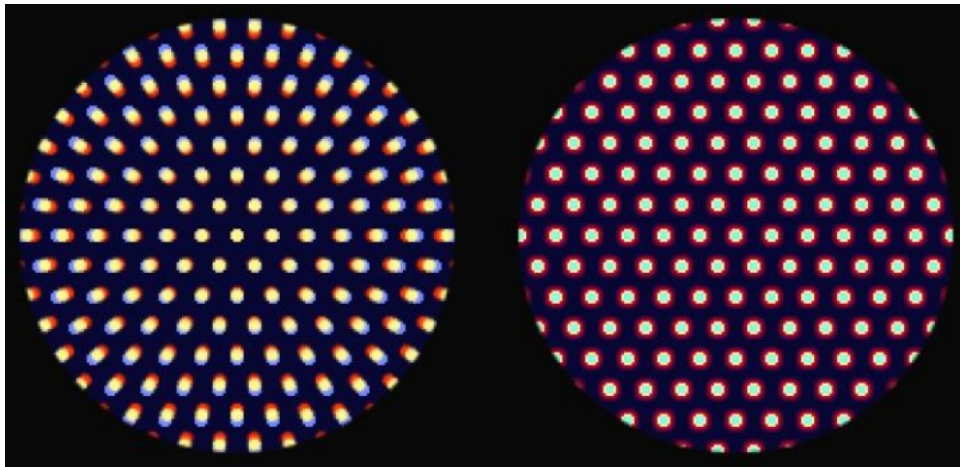


Aberracja poprzeczna



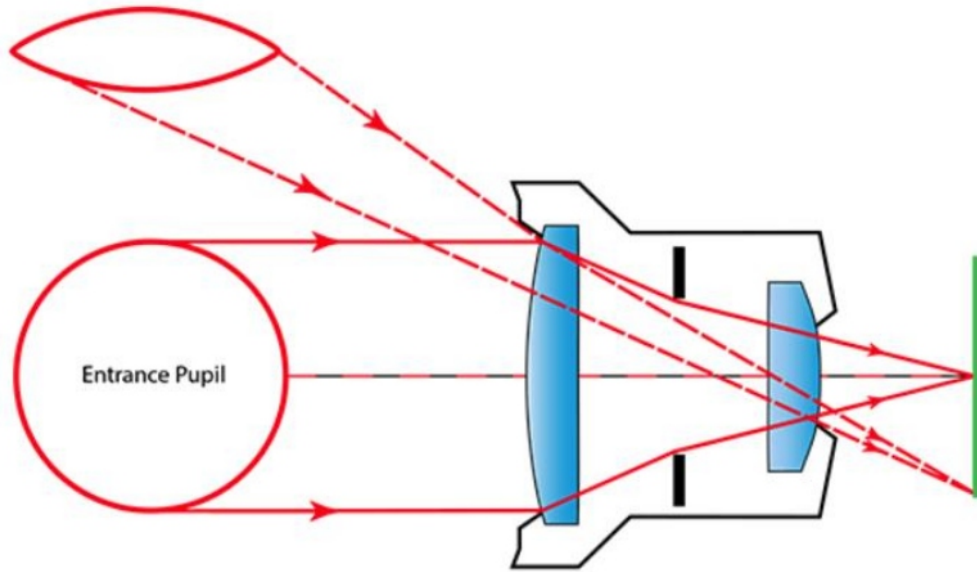
Aberracja podłużna

Dotyczy tylko soczewek, powstaje w wyniku dyspersji światła w szkle. Może być zredukowana przez zastosowanie układów wielu soczewek.



Inne wady teleskopów

Winietowanie



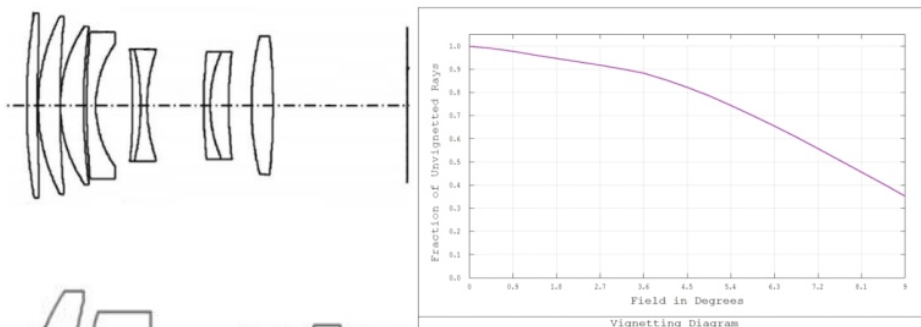
Efekt pociemnienia brzegów zdjęcia.
Wynika z ograniczenia efektywnej powierzchni obiektywu dla promieni pozaosiowych.



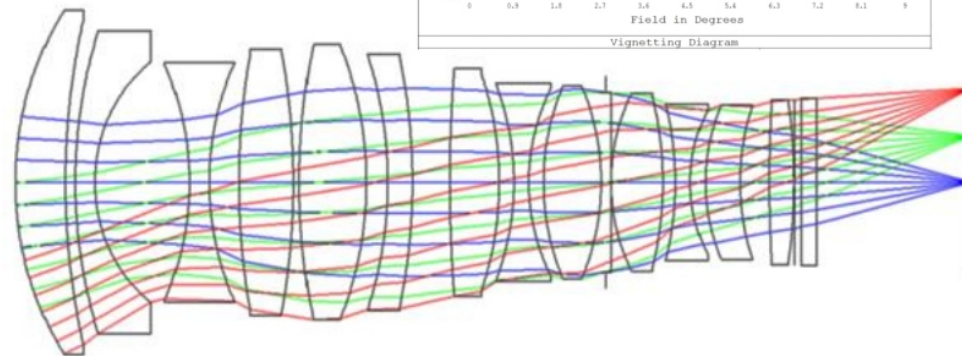
Inne wady teleskopów

Winietowanie

Winietowanie niekiedy wprowadza się celowo dla obniżenia kosztów, masy i poziomu komplikacji układu optycznego.



Commercial, 50mm aperture, 100mm focal length, f/2 lens, 125mm end to end, 0.42kg total, 9 elements w/ internal focus. Exhibits vignetting towards edge.

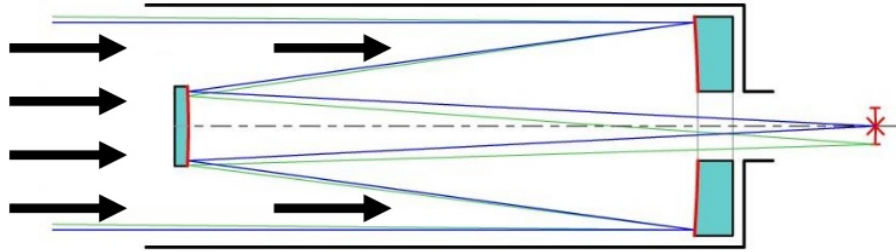


Custom, 50mm aperture, 100mm focal length, f/2 lens, 385mm end to end, > 4kg for just the glass, 13 elements w/ external focus. Exhibits **no vignetting**.

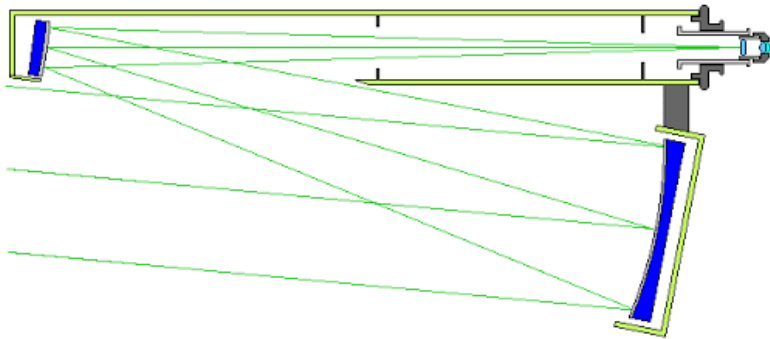
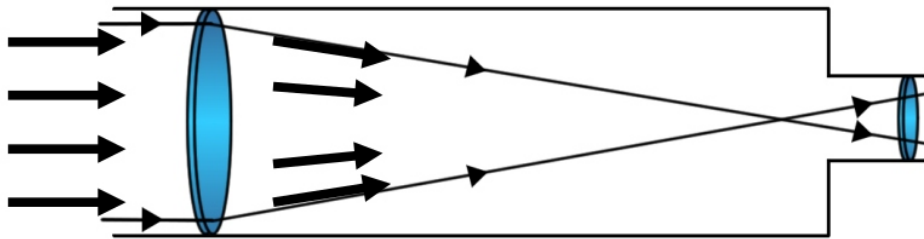
Image Credit: Дмитрий Андреевич

Inne wady teleskopów

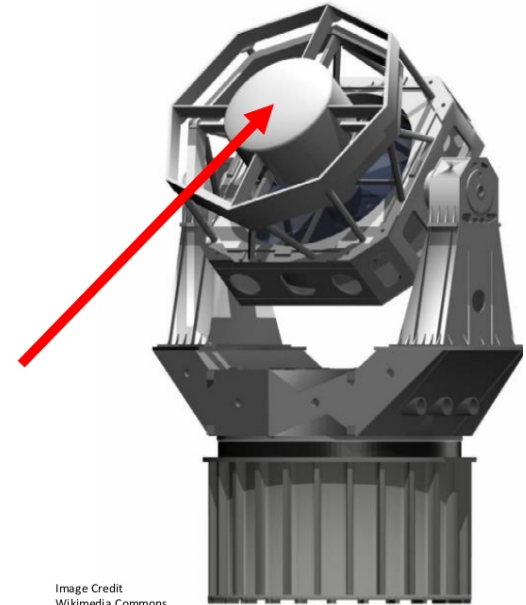
Obstrukcja / przesłanianie



Zatrzymanie części światła wpadającego w teleskop na elementach mocujących optykę (głównie lustro wtórne). Nie dotyczy refraktorów.



Lustro wtórne może zasłaniać nawet 50% powierzchni lustra głównego.



Inne wady teleskopów

Rozszerzalność cieplna

Rozszerzalność cieplna optyki – wady optyczne podczas zmian temperatury

Stosowane w astronomii szkła o niskiej rozszerzalności cieplnej:

Szkło kwarcowe, Zerodur (Schott), AstroSital (LZOS), ULE (Corning) itp

$3 \cdot 10^{-7}$

$7 \cdot 10^{-9}$

$1.5 \cdot 10^{-7}$

$3 \cdot 10^{-9}$

Zwykłe szkło borowo-krzemowe: $3 \cdot 10^{-6}$

Rozszerzalność cieplna mechaniki – rozogniskowanie / rozkolimowanie teleskopu

Stosowane w astronomii materiały o niskiej rozszerzalności cieplnej:

Invar, włókno węglowe

$1 \cdot 10^{-6}$

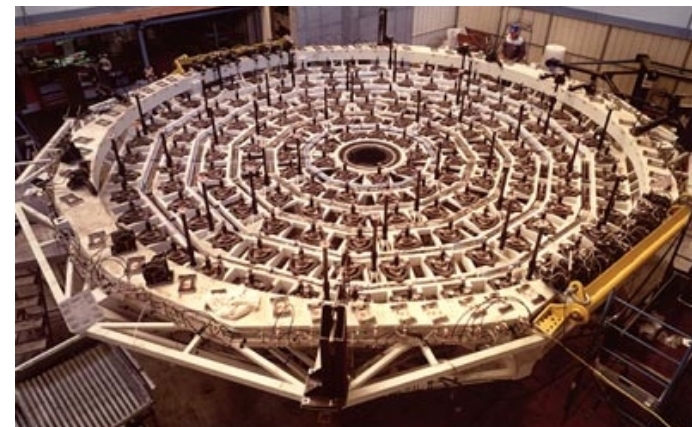
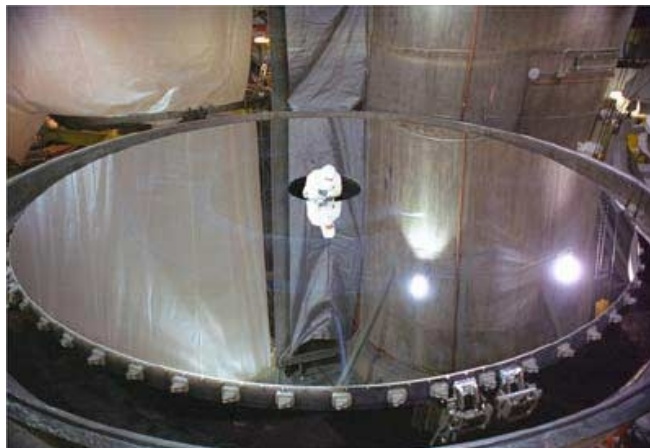
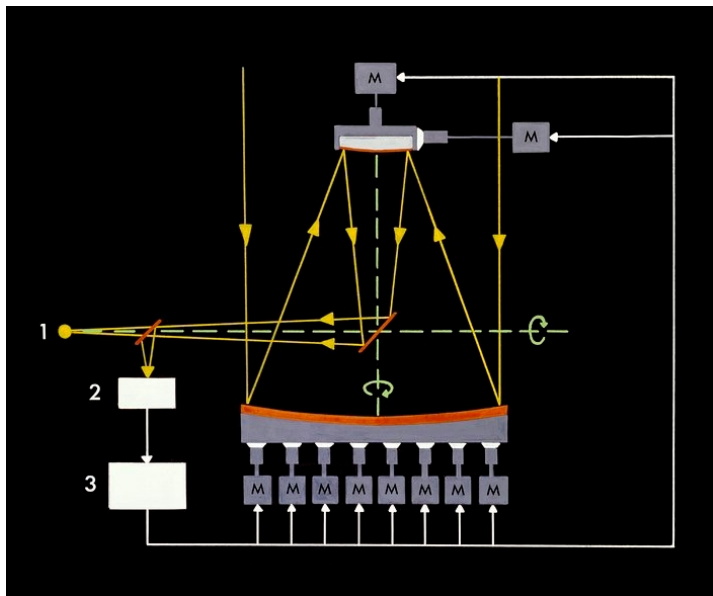
$1 \cdot 10^{-6}$

Stopy aluminium: $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ stal: $\sim 1 \cdot 10^{-5}$

Inne wady teleskopów

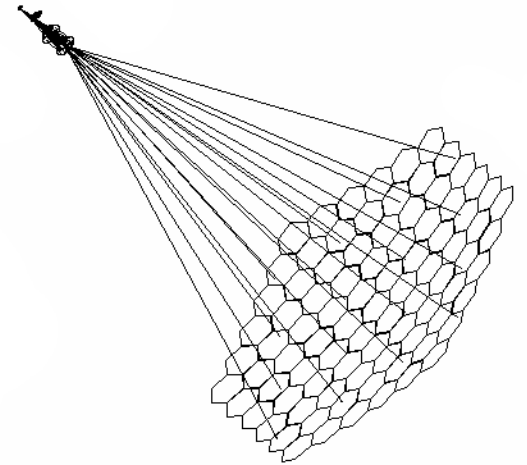
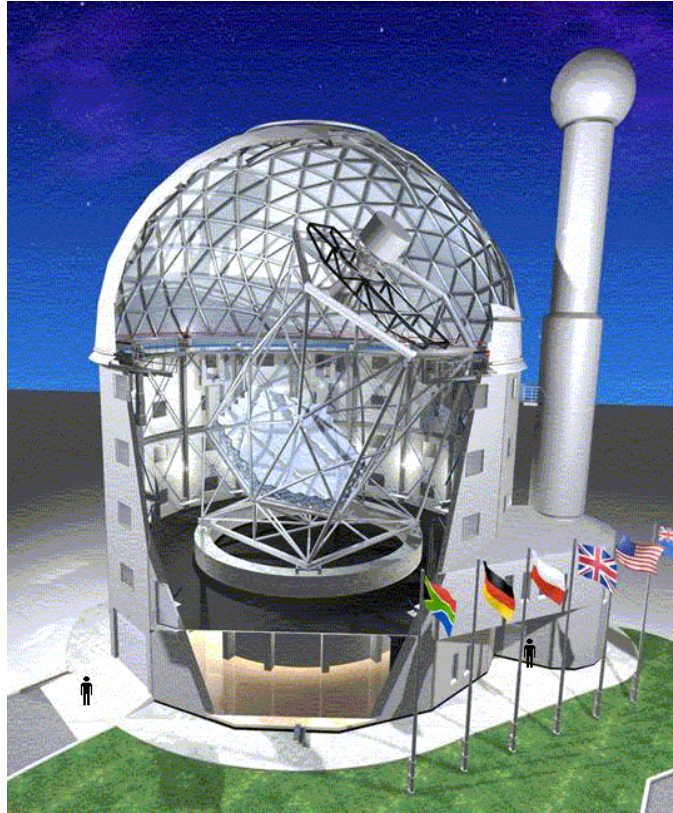
Gięcia mechaniczne

Zamocowanie lustra które waży wiele ton i nie może się wygiąć nawet o $1/10$ długości fali światła (55 nm) mimo, że będzie obracane nawet o 90 stopni (razem z teleskopem) nie jest łatwe.



Optyka aktywna – ciągła kontrola i korekta kształtu i orientacji luster

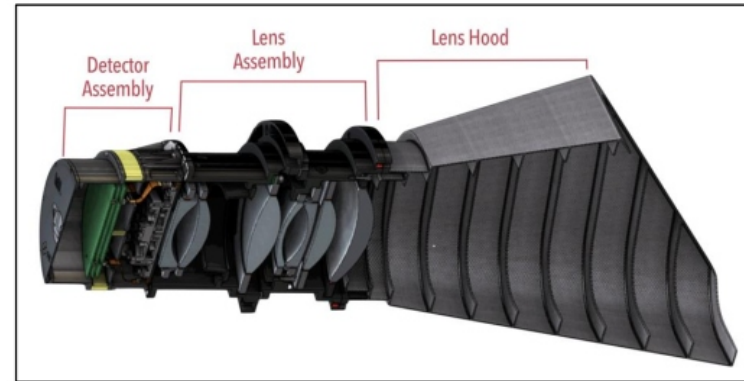
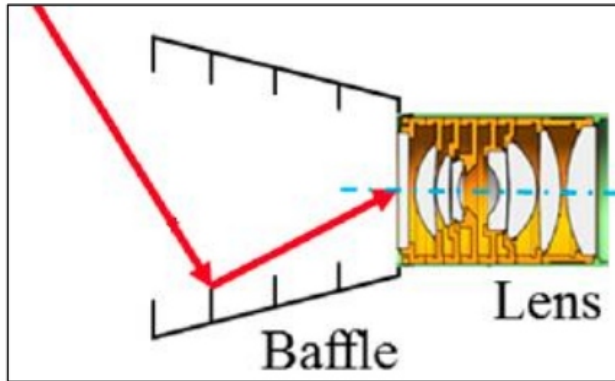
Inne wady teleskopów Gięcia mechaniczne



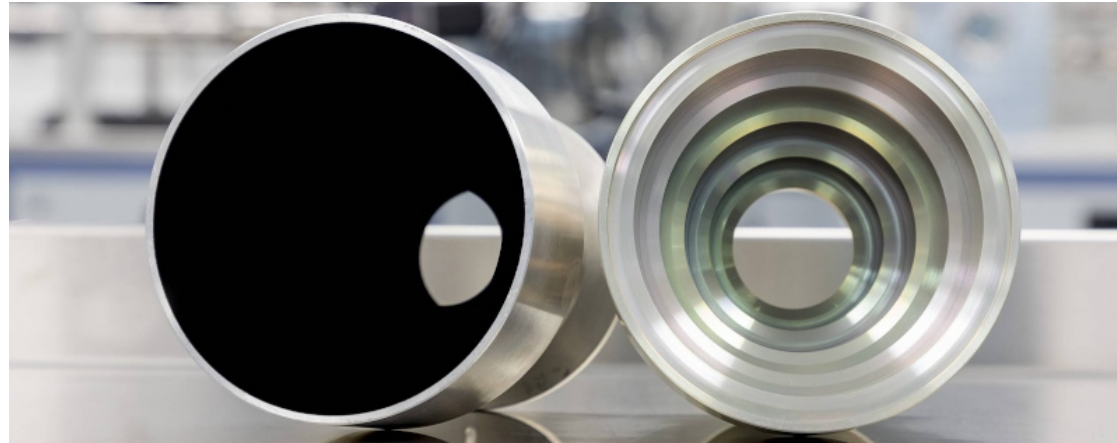
Teleskop SALT kalibruje ustawienie segmentów lustra głównego co godzinę.

Inne wady teleskopów

Rozpraszanie światła



Przesłony optyczne



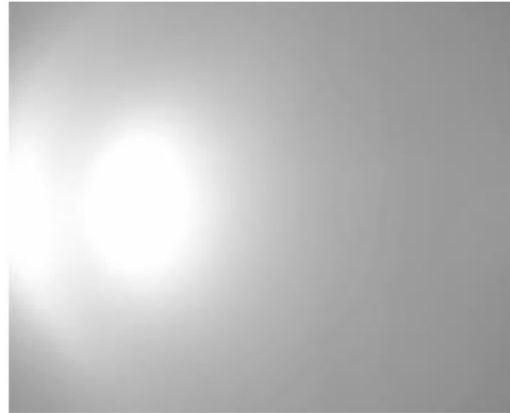
Wyczernienie wewnątrz obiektywu / teleskopu (Vantablack)

Inne wady teleskopów

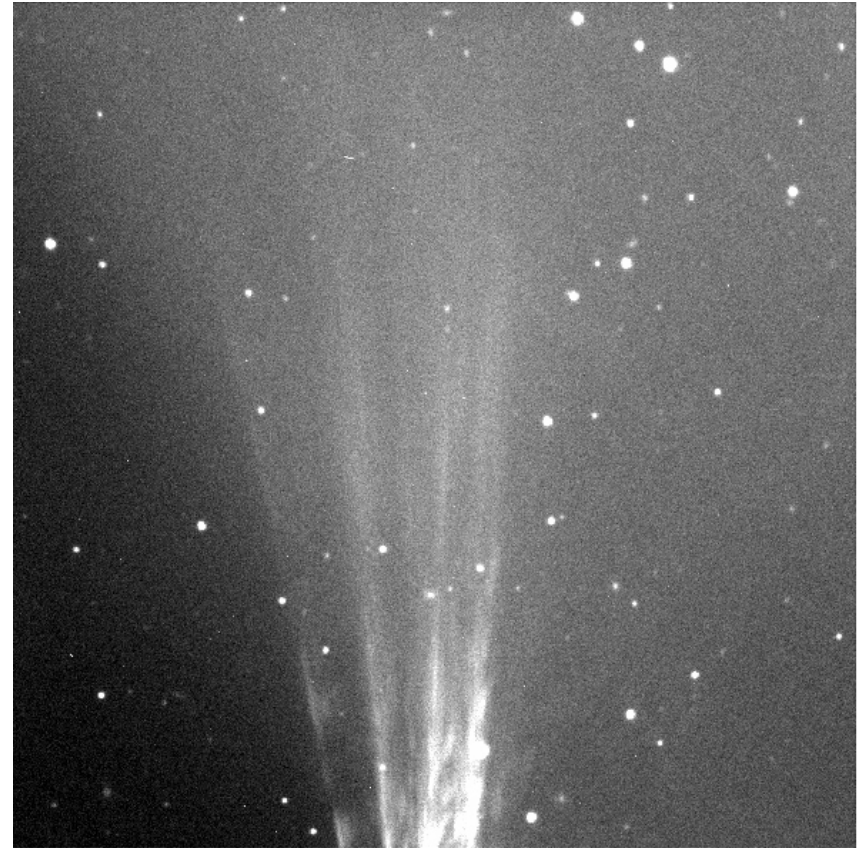
Rozpraszanie światła



10⁻⁷ stray light rejection



10⁻⁵ stray light rejection



Rozproszone światło gwiazdy spoza pola widzenia teleskopu.

Najważniejsze teleskopy optyczne świata

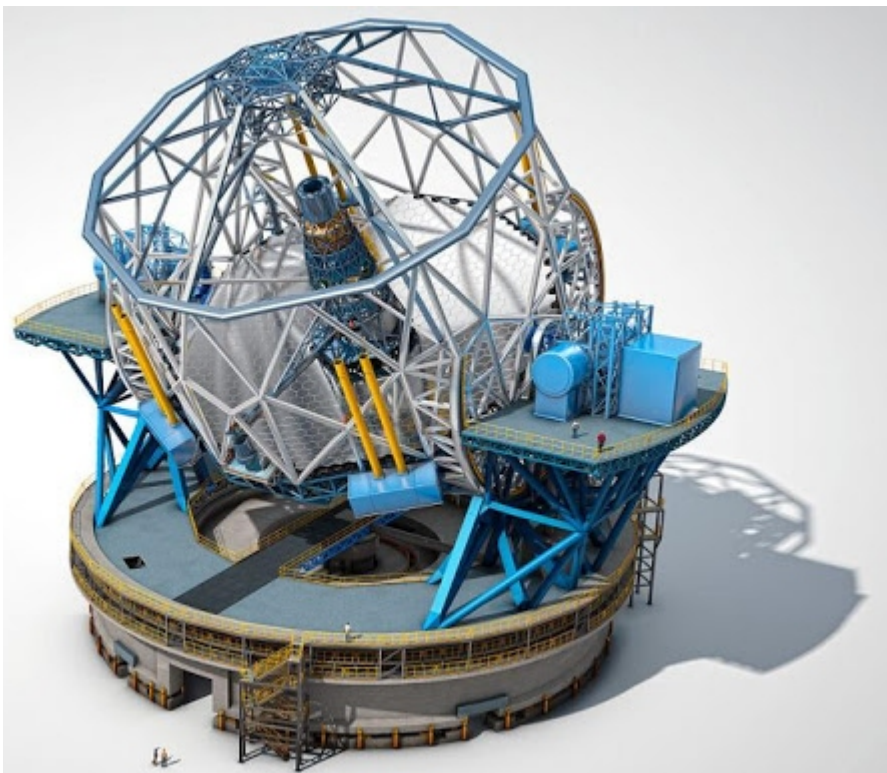


ESO Very Large Telescope (Chile)
4x teleskop 8.2m + 4x teleskop 1.5m



Teleskopy Keck (Hawaje)
2x teleskop 10m

Ekstremalnie Wielki Teleskop



Średnica głównego lustra: 39.3m

Powierzchnia czynna lustra:

~256 razy większa niż Hubble'a

~13 razy większa niż obecne teleskopy

Zasięg: 30^m

Hubble 2.4m: 24^m

teleskop 10m: 27^m

(zakładając czas ekspozycji zdjęcia 1h)

Zdolność rozdzielcza: 0.004"

Hubble 2.4m: 0.06"

teleskop 10m: 0.01"

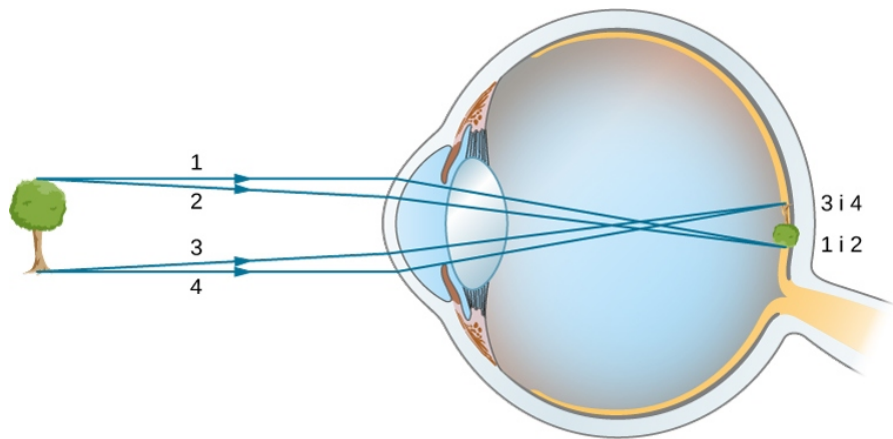
(zakładając idealną optykę adaptacyjną)

[video](#)

KAMERY ASTRONOMICZNE

Przed epoką detektorów cyfrowych

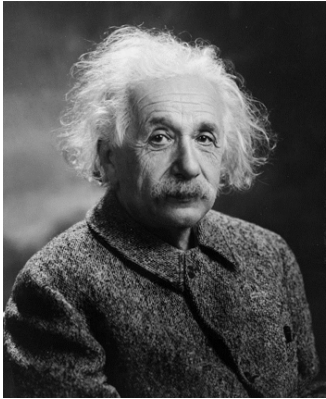
Oko



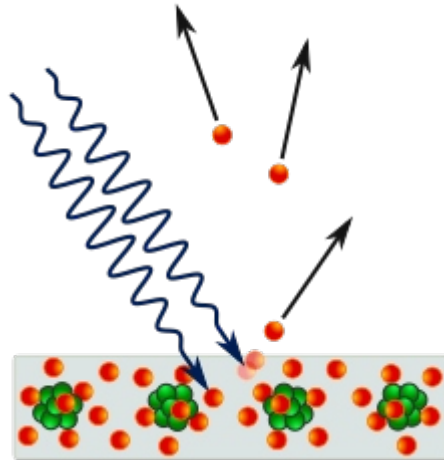
Płyta (klisza) fotograficzna



Efekt fotoelektryczny i CCD



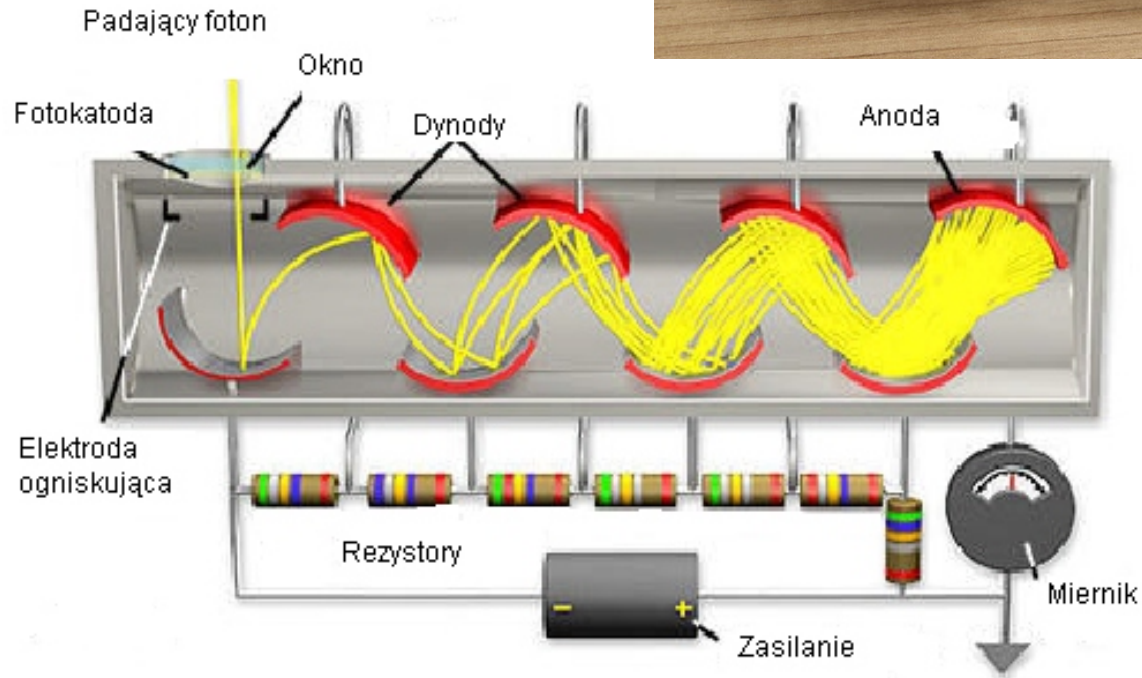
Albert Einstein
(Nagroda Nobla 1921
za teorię efektu
fotoelektrycznego)



Willard Boyle i George Smith
(Nagroda Nobla 2009
za wynalezienie CCD w 1969)

CCD = charge-coupled device (urządzenie zbudowane z połączonych kondensatorów)

Fotopowielacz



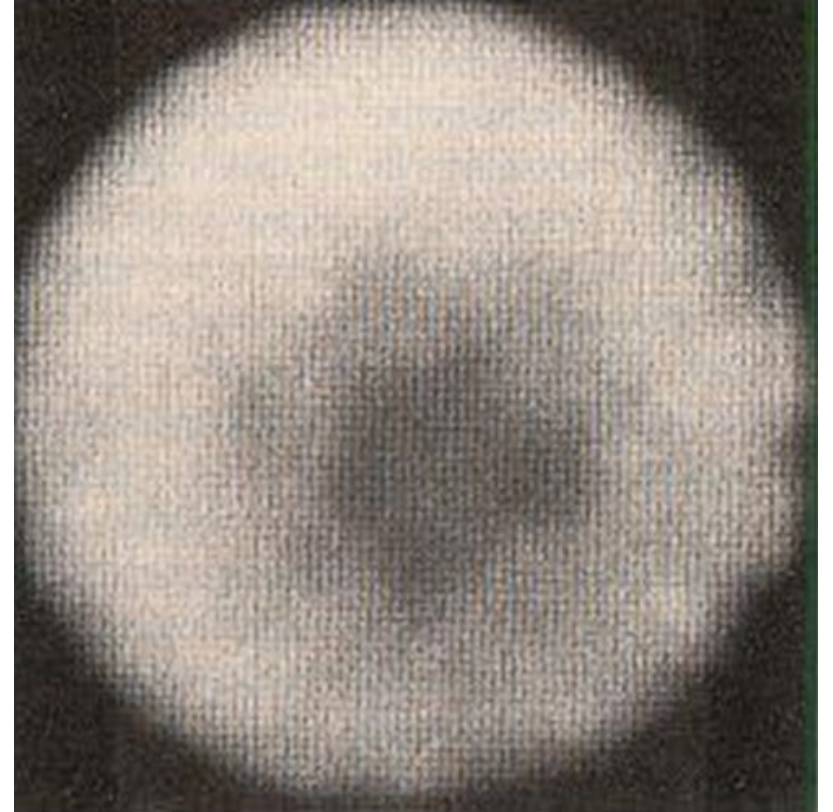
Lampa próżniowa z elektrodami pod wysokim napięciem pozwalająca rejestrować pojedyncze fotony dzięki ich konwersji na ładunek elektryczny.

Efektywnie 1 piksel – brak obrazów!

Pierwsze astronomiczne zdjęcia CCD

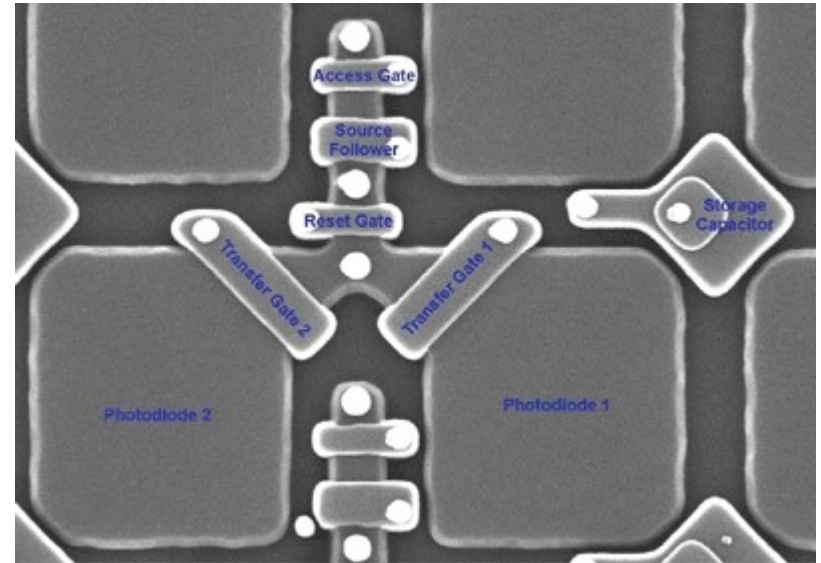
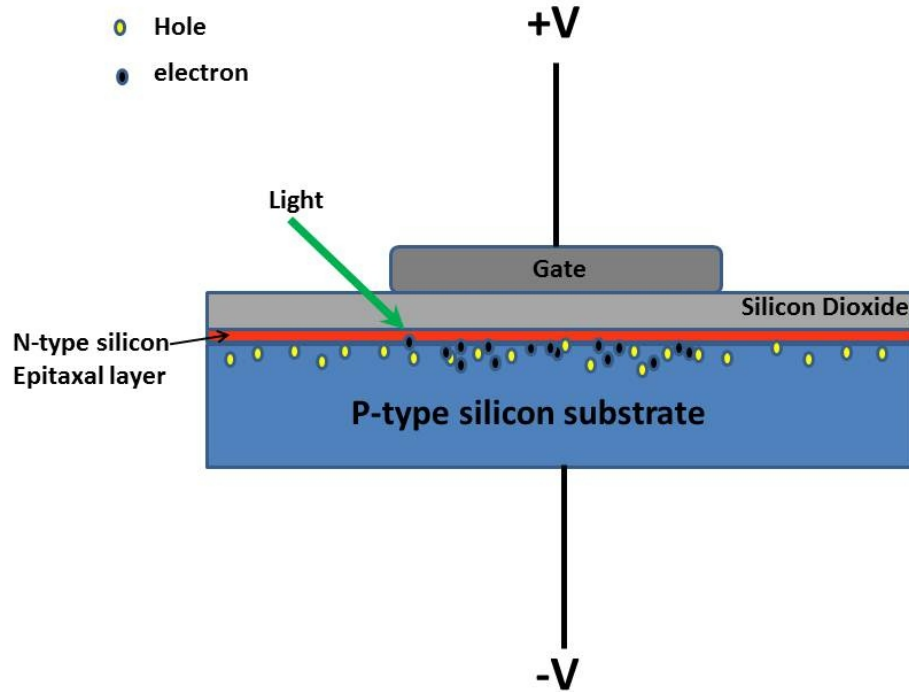


Fragment powierzchni Księżyca,
kamera 100x100 pikseli (1974)



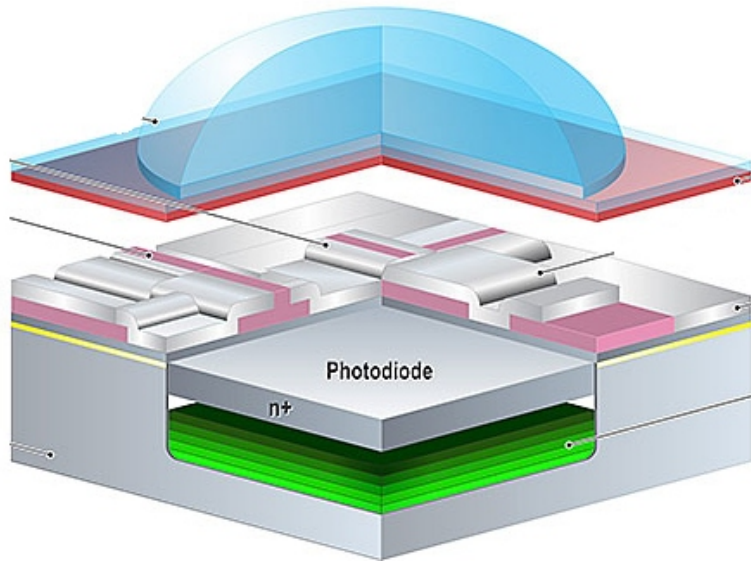
Zdjęcie planety Uran (1975)

Kondensator MOS (metal-oxide-semiconductor)

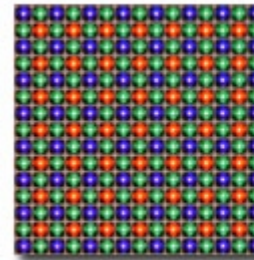
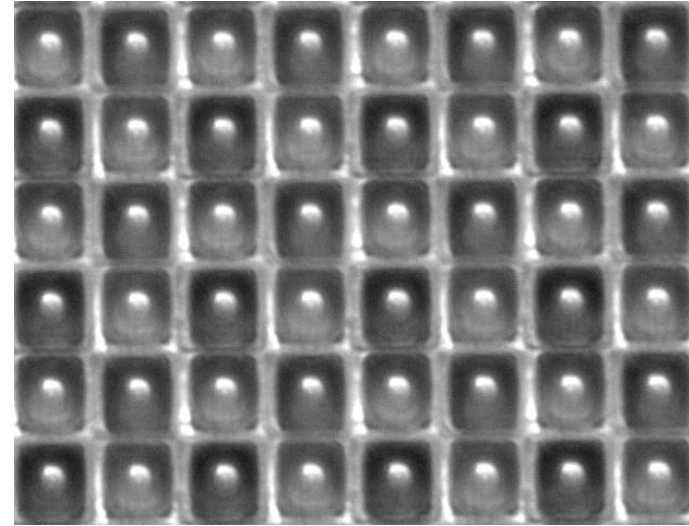


Piksel kamery CCD zbudowany jest z elementów światłoczułych oraz elementów gromadzących i sterujących elektronami, przede wszystkim kondensatorów MOS.

Mikrosoczewki



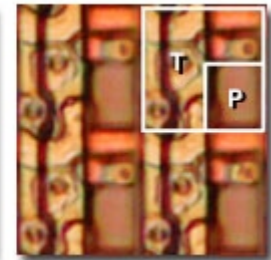
Mikrosoczewka i filtr nad
pojedynczym pikselem CMOS



(a)

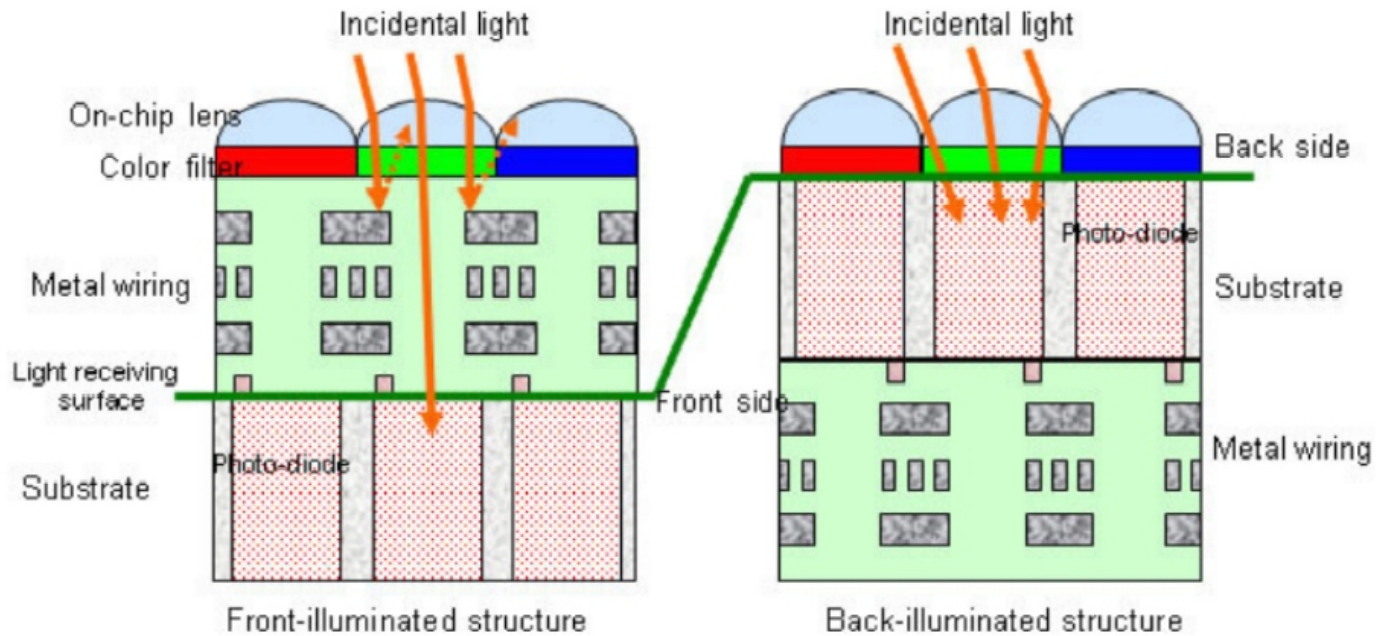


(b)



(c)

Oświetlenie od przodu i od tyłu



Efektywność kwantowa (czułość)

Procent fotonów padających na obszar zajmowany przez jeden piksel, który jest przekształcany na elektrony. Inaczej: ułamek rejestrowanych fotonów.

Kliska / płyta fotograficzna: kilka %

Konwencjonalny fotopowielacz: do 20%

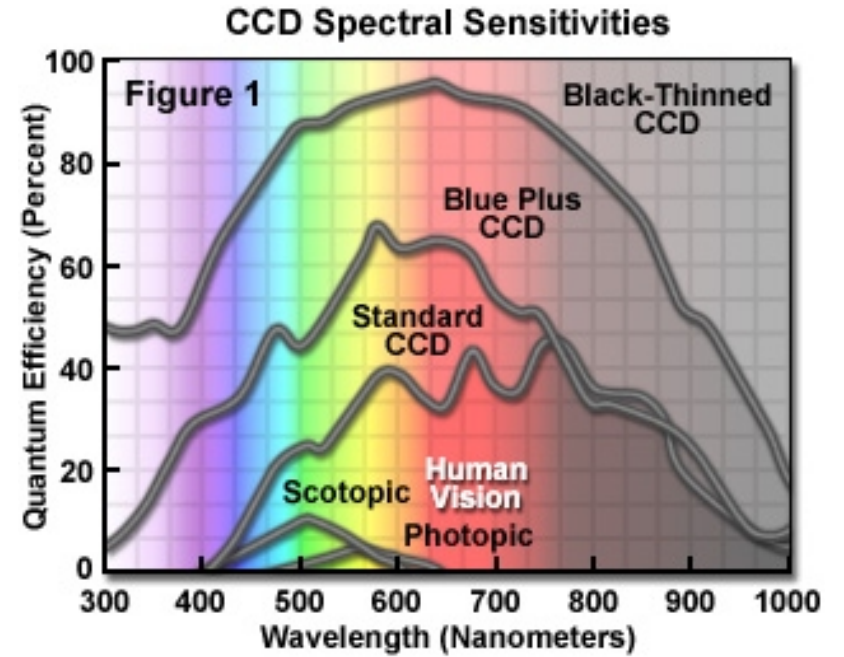
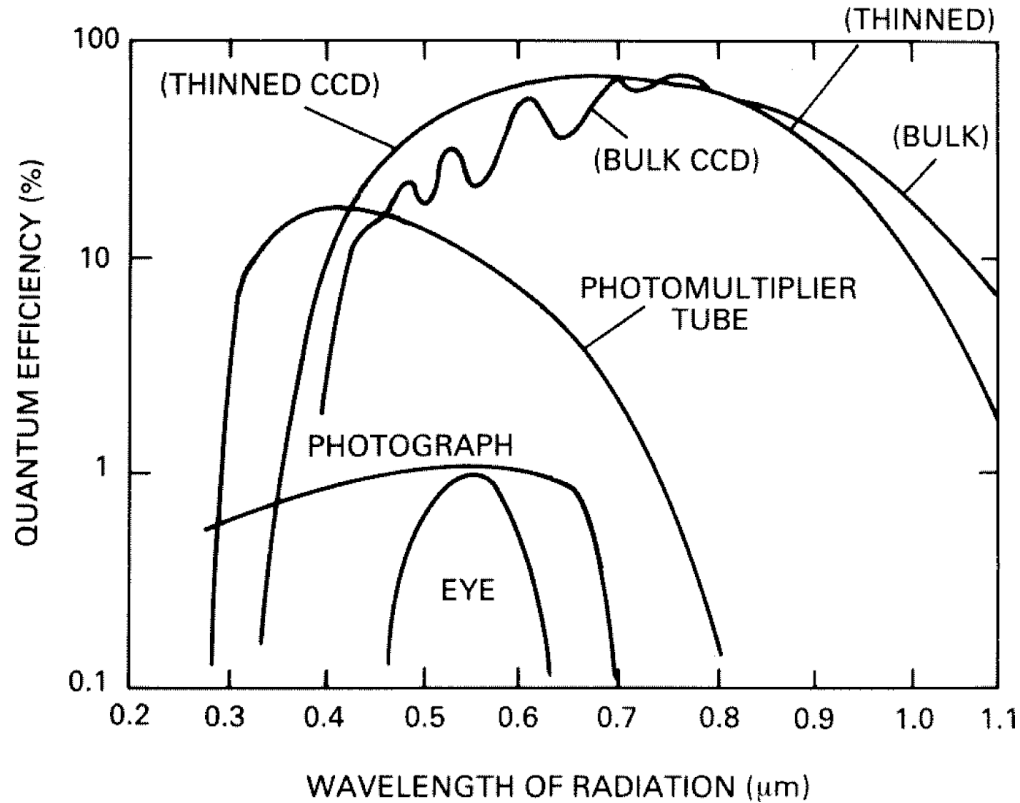
Pierwsze CCD: do 30%

CCD oświetlone od przodu z mikrosoczewkami: do 70%

CCD oświetlone od tyłu: do 95%

Po angielsku **QE** – quantum efficiency

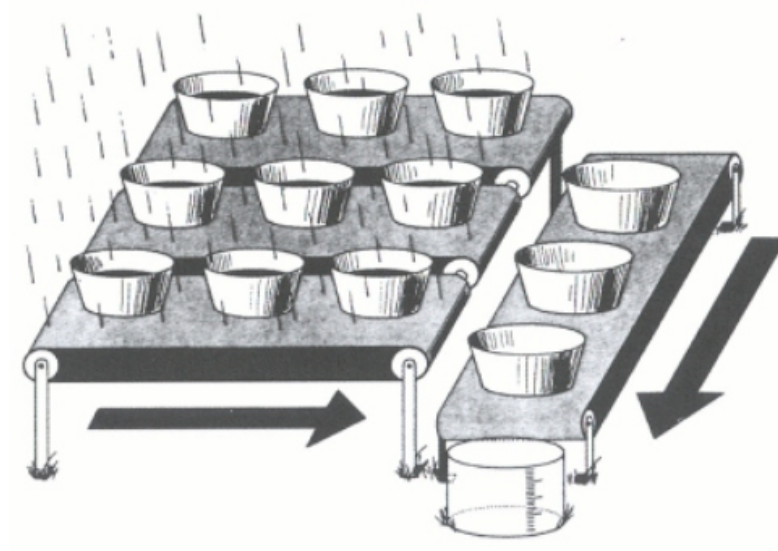
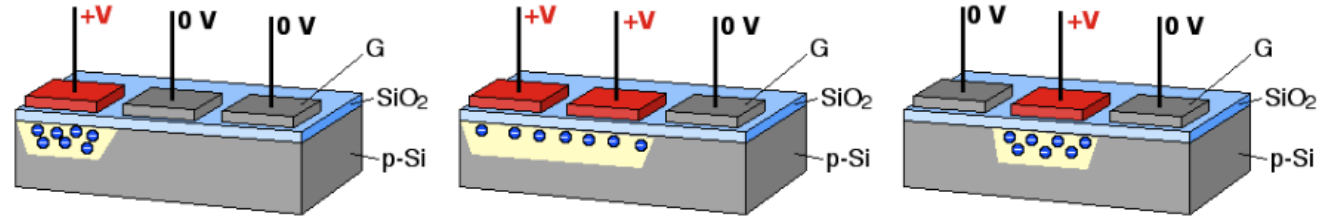
Efektywność kwantowa



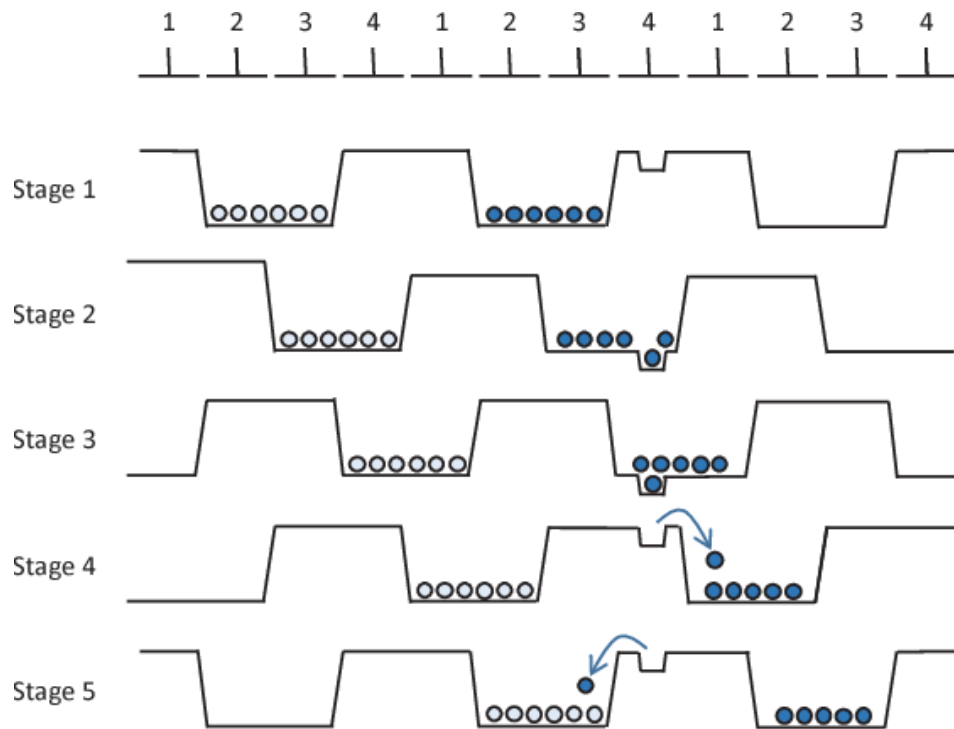
QE dla kamer Hamamatsu

Efektywność kwantowa silnie zależy od długości fali światła.

Transport elektronów za pomocą macierzy kondensatorów typu MOS



Charge Transfer Efficiency (CTE)

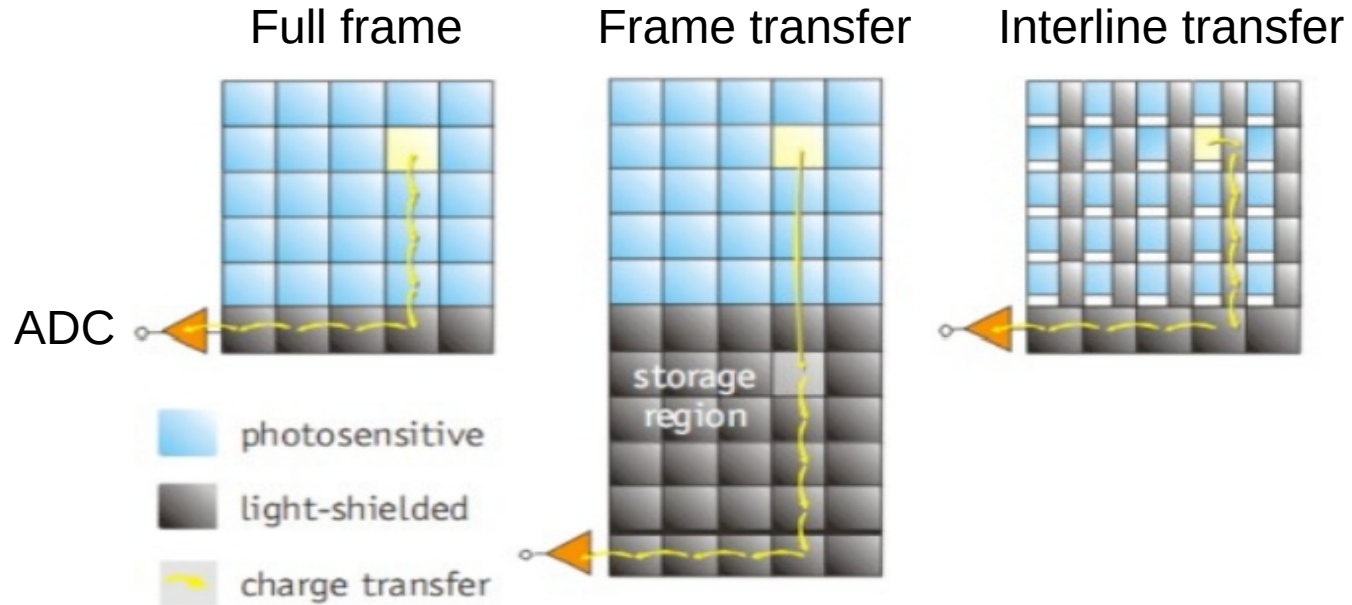


Schemat transportu elektronów z „pułapką”.

CTE dla pojedynczego przesunięcia elektronów z piksela na piksel wynosi typowo: 0.99999

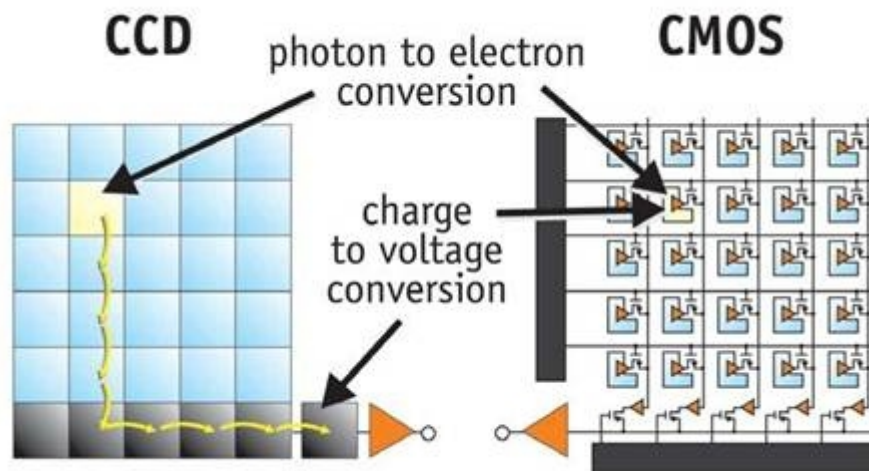
Zdarzają się jednak wady, uszkodzenia pikseli, które powodują stały problem transferu.

Transport elektronów za pomocą macierzy kondensatorów typu MOS



Podstawowe rodzaje kamer CCD

CCD (charge coupled device) vs CMOS (complementary metal oxide semiconductor)

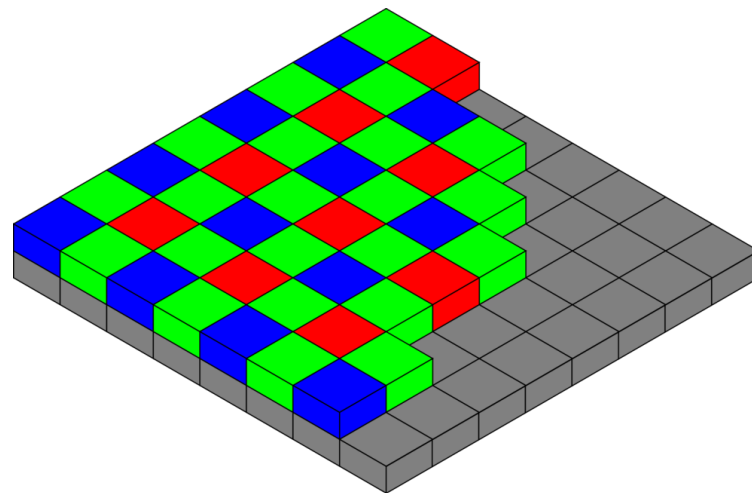
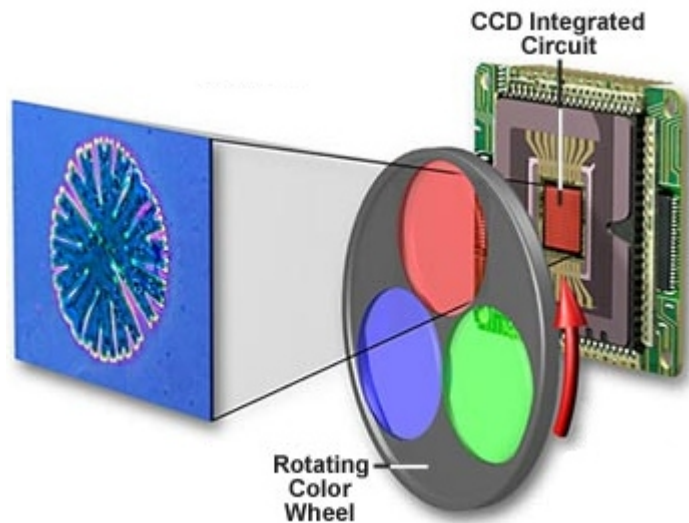


Różnice funkcjonalne:

CCD ma prostszą budowę piksela i przez to większą powierzchnię światłoczułą. CMOS odczytuje elektrony (obraz) bez ich przesuwania, znacznie szybciej (równoległe całe kolumny lub cała matryca) i jest bardziej energooszczędny.

(Niemał) wszystkie matryce CCD lub CMOS są „czarno białe”.

W pikselu gromadzą się elektrony wybite przez światło o różnej barwie.



Większość kamer jednak nie podaje liczby zgromadzonych elektronów. Zamiast tego dla każdego piksela podawana jest wartość ADU.

ADU – Analog-Digital Unit

ADU jest to jednostka sygnału zarejestrowanego przez piksel kamery optycznej. Sygnał ten jest bezpośrednio związany z liczbą zgromadzonych elektronów, a pośrednio z natężeniem światła padającego na piksel.

Większość kamer podaje liczbę elektronów przeskalowaną, czasem wzmacnioną, zgodnie z ustawionym w przetworniku analogowo-cyfrowym przelicznikiem nazywanym **gain**.

Przykładowo idealna kamera, która ma gain $1.5 \text{ e}^- / \text{ADU}$ jeśli w pikselu wykryje 15 elektronów to po sczytaniu poda, że dany piksel ma wartość 10 ADU.

Gain jest więc przelicznikiem analogowej liczby elektronów na cyfrową liczbę oznaczającą sygnał w ADU.

Ograniczenia kamer CCD i CMOS

W idealnej kamerze jedyne co degradowe obraz to szum fotonowy.

Szum fotonowy to naturalna zmienność liczby fotonów w stałym strumieniu światła.



Szum fotonowy **relatywnie** słabnie im więcej fotonów zarejestrujemy.

Ograniczenia kamer CCD i CMOS

Źródła szumów w kamerze CCD / CMOS:

Szum fotonowy – proporcjonalny do pierwiastka z natężenia światła

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{S}{\sqrt{S}}$$

Szum odczytu – niepewność (błędy losowe) pomiaru liczby elektronów w pikselu kamery CCD/CMOS – typowo między 1 a 10 e⁻ podczas pojedynczego odczytu.

Rośnie im szybciej odczytujemy piksele.

Dla danej prędkości odczytywania jest zasadniczo stały.

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{S}{const}$$

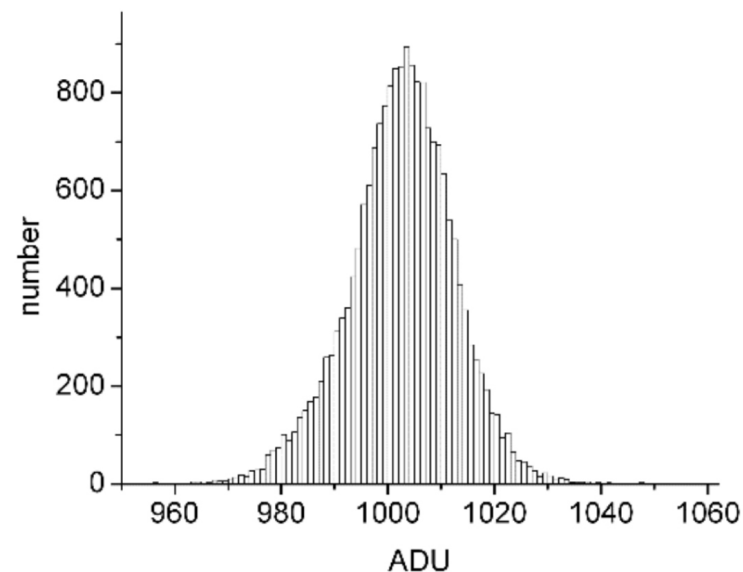
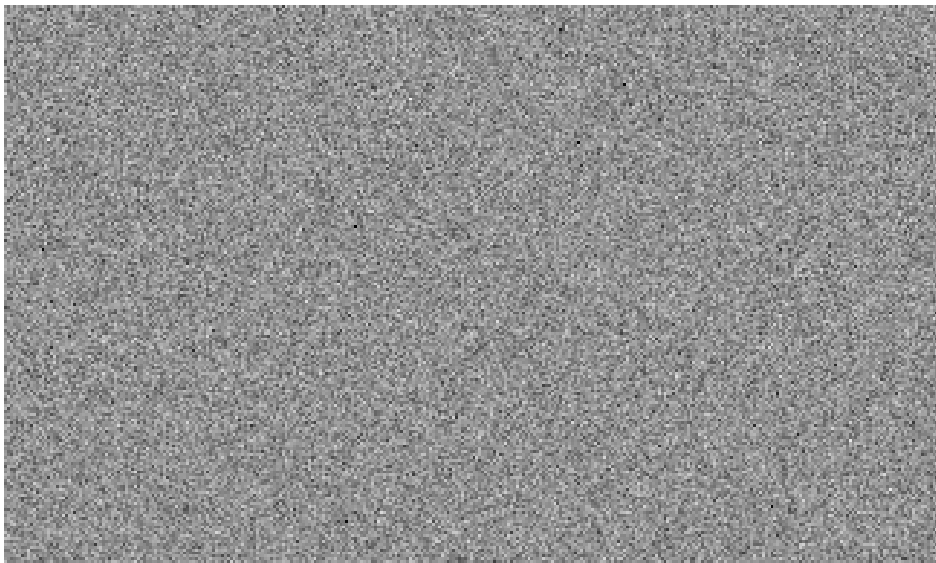
Wniosek: dłużej naświetlać zdjęcia, wielokrotnie lub powoli czytać każdy piksel !!!



Porównanie zdjęć z krótkim i 35x dłuższym czasem naświetlania.
W tym przypadku głównym źródłem szumu był szum fotonowy.

Źródła dodatkowego (niechcianego) sygnału w kamerze CCD / CMOS

Bias – ładunek startowy w pikselach, który jest zawsze na początku ekspozycji.



Zdjęcie z najkrótszym możliwym czasem z zamkniętą migawką.

Uwaga! Każdy dodatkowy sygnał zawsze dodaje również szum do obrazu!

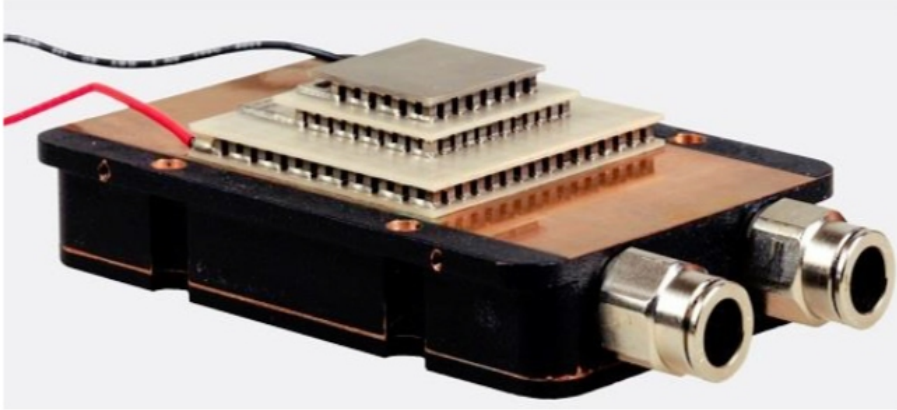
Źródła dodatkowego (niechcianego) sygnału w kamerze CCD / CMOS

Prąd ciemny – ładunek wytwarzany w pikselach niezależnie od światła.
Rośnie liniowo z czasem naświetlania.
Maleje im jest zimniej – chłodzenie kamer!



Z lewej chip kamery nie chłodzony, z prawej chłodzony do ujemnych temperatur.

Chłodzenie astronomicznych kamer CCD/CMOS



Wielostopniowe chłodzenie ogniwami Peltiera.



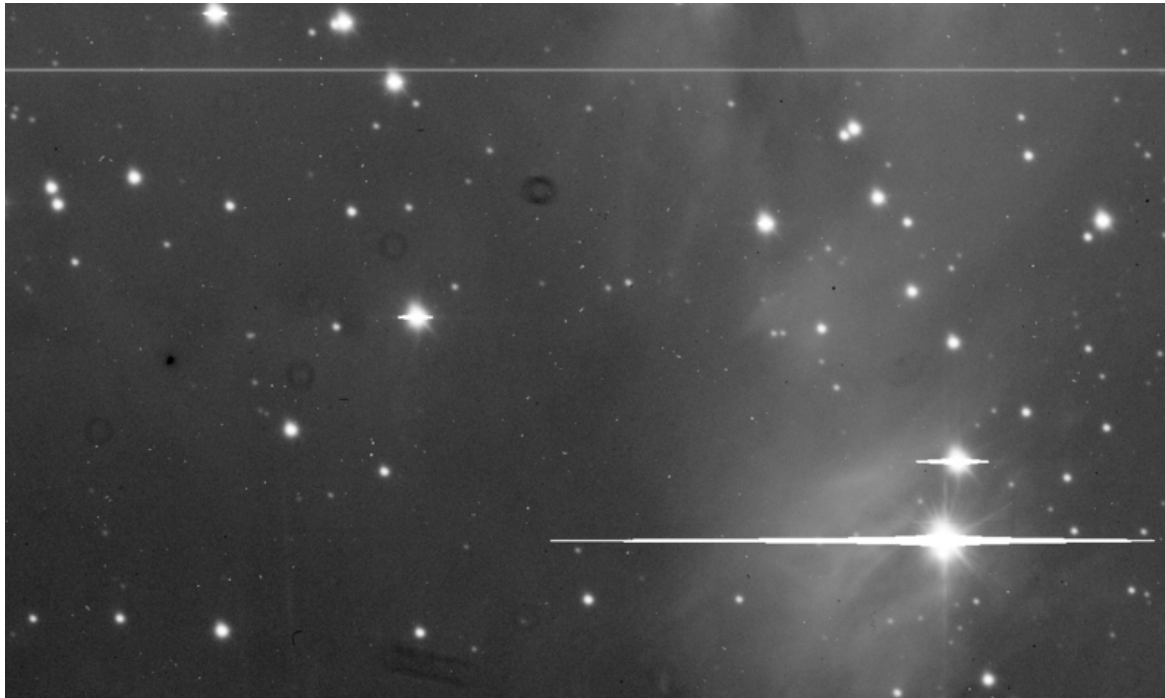
Chłodzenie ciekłym azotem.

Źródła dodatkowego (niechcianego) sygnału w kamerze CCD / CMOS

Popsute piksele i/lub kolumny pikseli.

Mogą to być gorące/zimne piksele lub całe kolumny/wiersze,

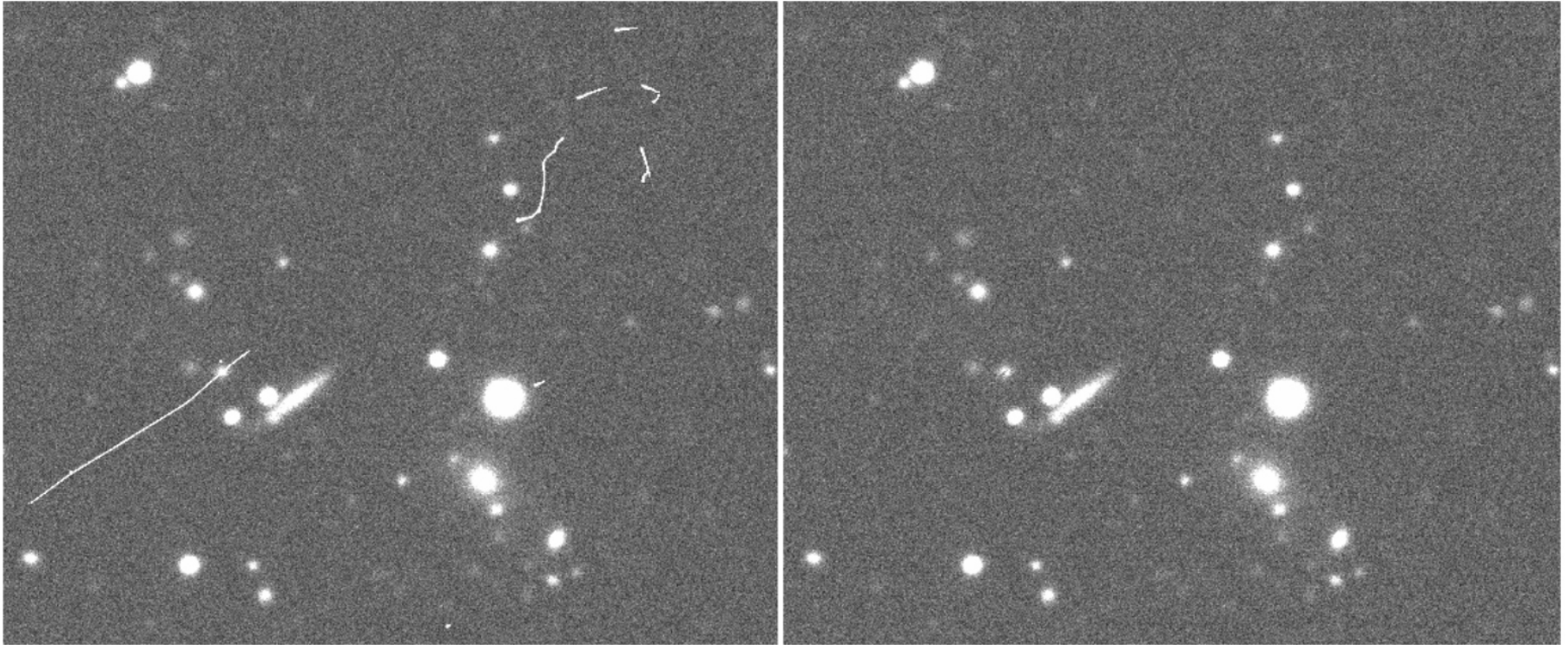
czyli piksele o bardzo dużym/małym biasie lub prądzie ciemnym w stosunku do innych.



Na tym zdjęciu widocznych jest wiele niedoskonałości:)

Źródła dodatkowego (niechcianego) sygnału w kamerze CCD / CMOS

Promienie kosmiczne – losowo pojawiające się na zdjęciach „kropki i kreski”.



Oryginalne zdjęcie astronomiczne z długim czasem naświetlania (z lewej) oraz po usunięciu promieni kosmicznych (z prawej).

Promienie kosmiczne



Kaskada wtórnych cząstek po zderzeniu wysokoenergetycznej cząstki promieniowania kosmicznego z cząsteczką w atmosferze ziemskiej.

Promienie kosmiczne



Cząstki promieniowania kosmicznego można zobaczyć m.in. za pomocą komory pęcherzykowej.

Źródła dodatkowego (niechcianego) sygnału w kamerze CCD / CMOS

Tło nocnego nieba nigdy nie jest całkowicie ciemne!

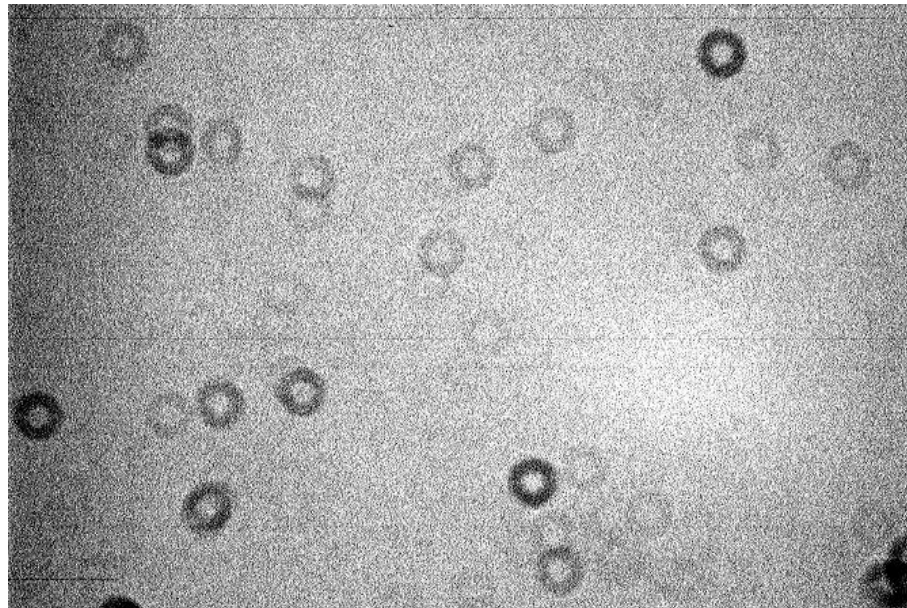
Źródła światła: rozproszone światło Słońca i Księżyca, oświetlenie siedlisk ludzkich, świecenie atmosfery Ziemi – airglow



Z lewej zdjęcie z ciemnym tłem nieba, z dala od cywilizacji,
z prawej z rozjaśnionym przez lampy uliczne.

Źródła degradacji obrazu w kamerze CCD / CMOS

Niejednorodna efektywna czułość pikseli może wynikać z wad produkcji (efektywność kwantowa) ale również z zabrudzenia, wad optycznych, etaloningu itd.



Zdjęcie typu płaskie pole (flat field) – idealnie równomiernie świecący ekran.

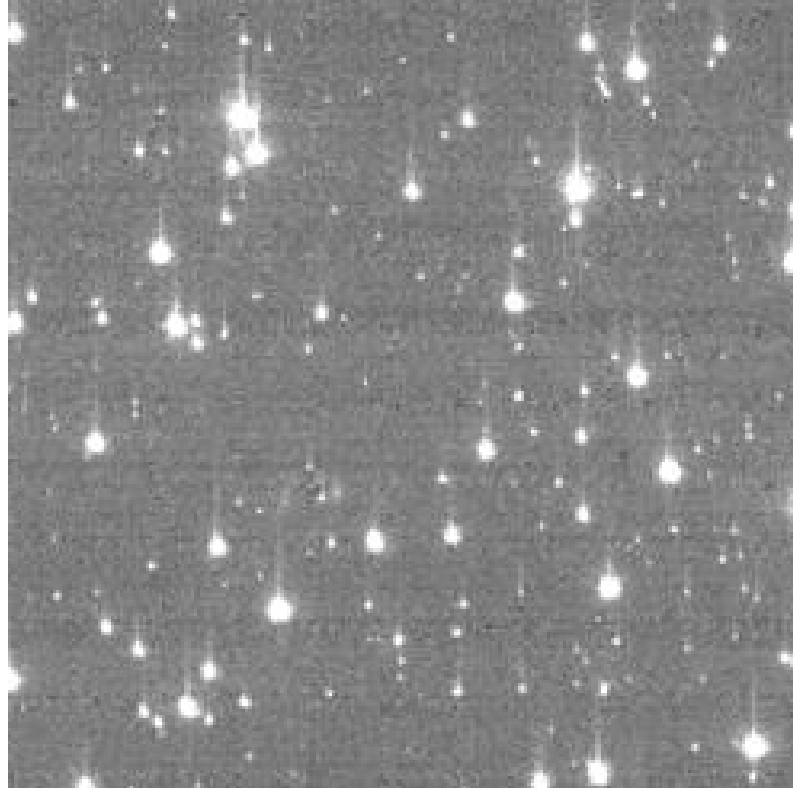
Źródła degradacji obrazu w kamerze CCD / CMOS

Prześwietlenie piksela/i może powodować niekontrolowane przelewanie się elektronów do sąsiednich pikseli podczas naświetlania.
Niektóre kamery są wyposażone w zabezpieczenie sprzętowe – antyblooming.



Źródła degradacji obrazu w kamerze CCD / CMOS

Problemy z transferem elektronów podczas odczytu (tylko CCD).

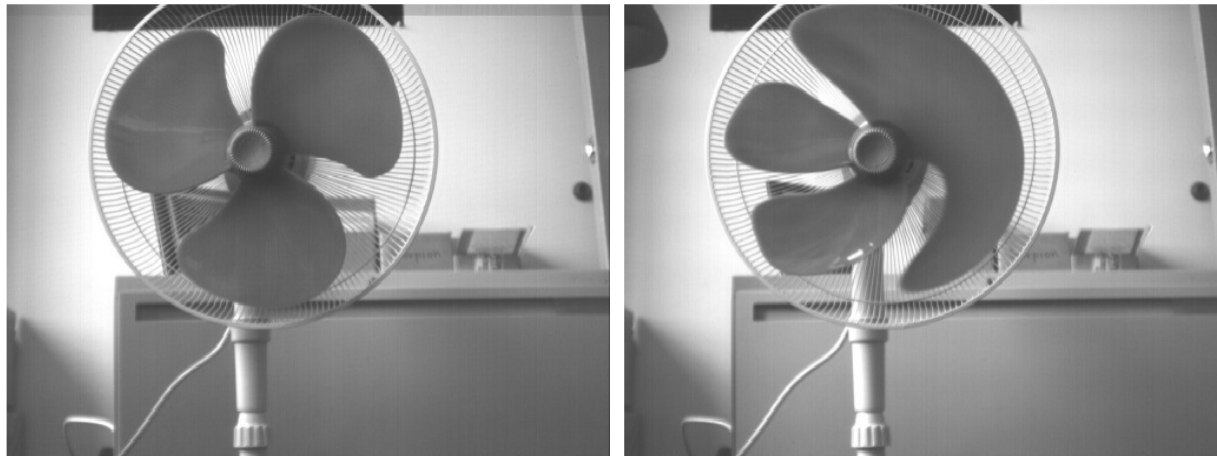


Źródła degradacji obrazu w kamerze CCD / CMOS

Nierównoczesne naświetlanie pikseli – zależy głównie migawki.

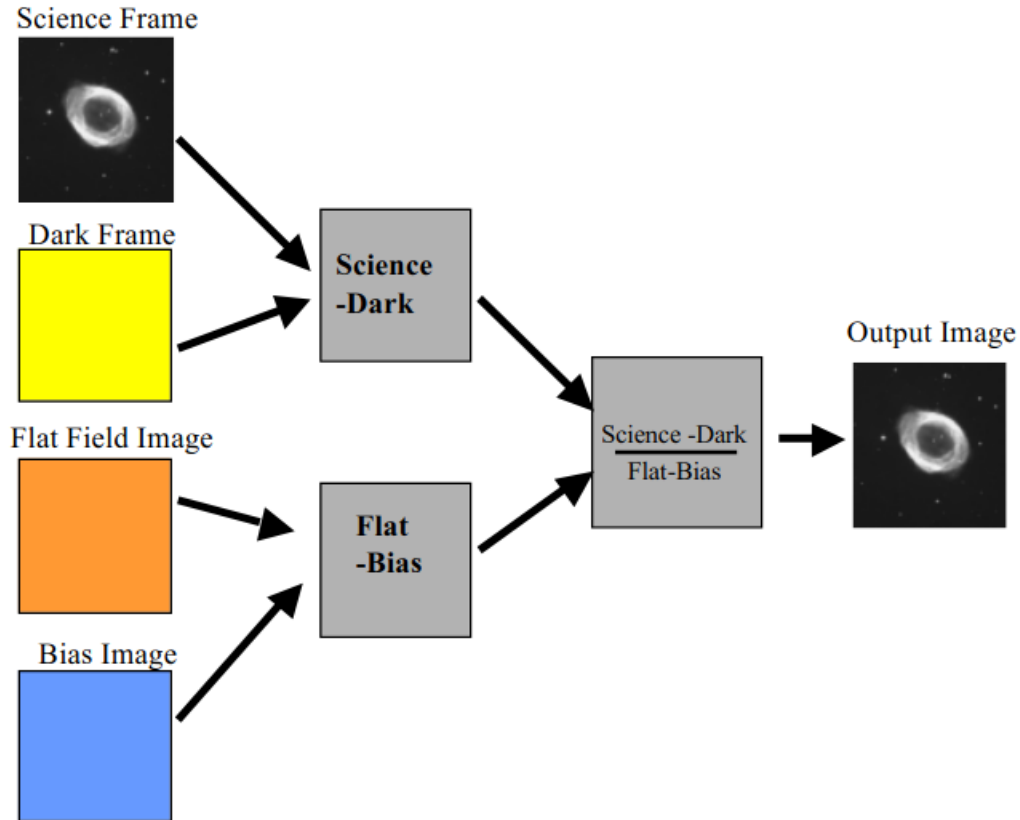
Rodzaje migawek:

- mechaniczna (szczelinowa, centralna itd)
- elektroniczna skanująca (rolling) – czytanie linia po linii
- elektroniczna globalna (global) – czytanie wszystkich pikseli na raz



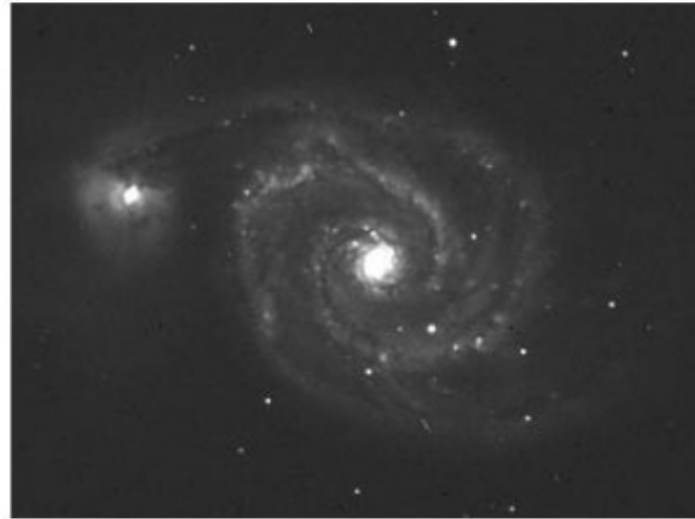
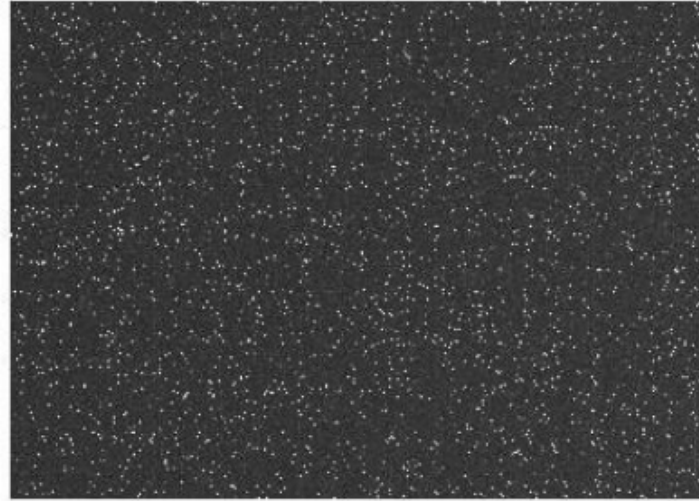
<https://www.youtube.com/watch?v=dNVtMmLInoE>

Redukcja zdjęć



Procedura wykorzystująca zdjęcia kalibracyjne mająca na celu zredukowanie do minimum niepożądanych efektów i sygnałów na zdjęciu naukowym.

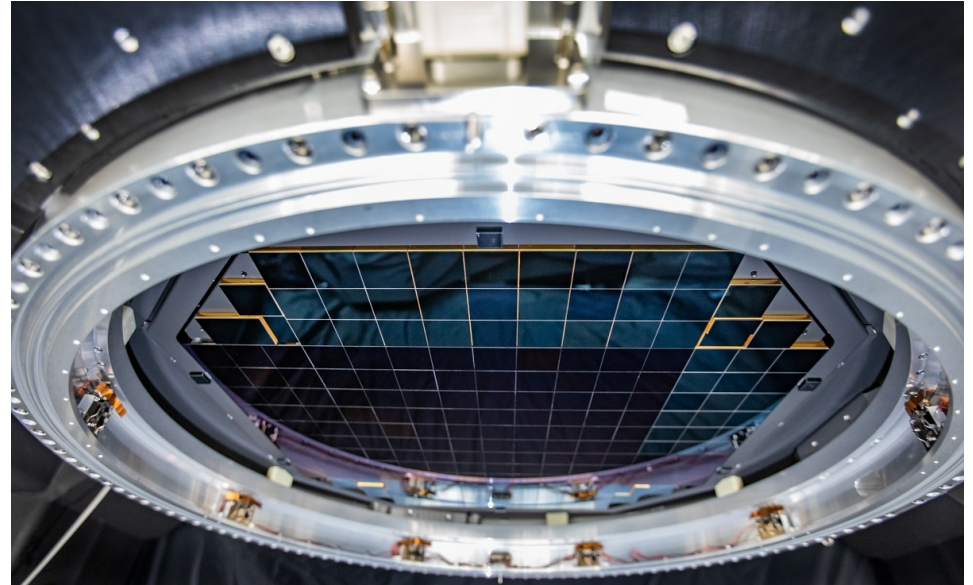
Redukcja zdjęć – przykład odjęcia prądu ciemnego i biasu



Przykłady współczesnych kamer CCD



Jeden z największych chipów CMOS firmy Canon,
0.25mld pikseli, 20cm x 20cm.

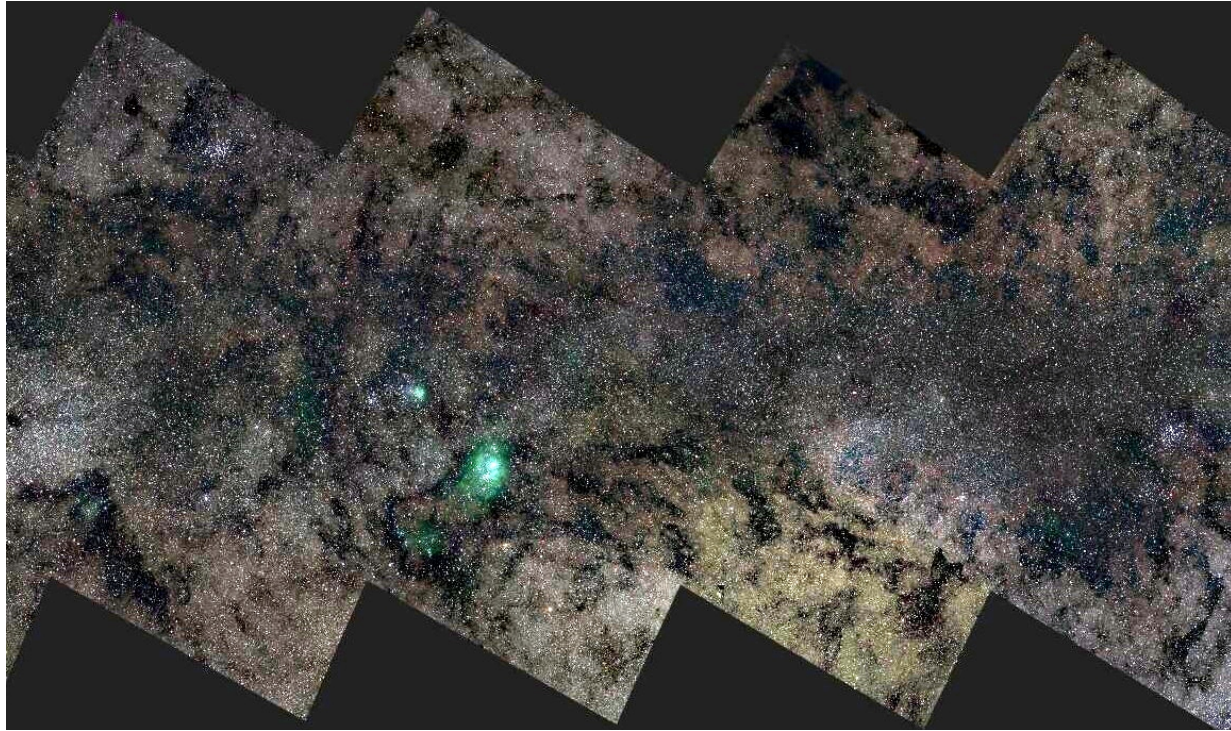


Kamera teleskopu LSST
złożona z 189 x 16 Mpix matryc CCD
ma łącznie 3.2 mld pikseli (10 μm).

$$QE_{\text{max}} > 95\%$$

Chłodzona do -100 °C,
robi cz./b. zdjęcia o rozmiarze ok. 6.5 GB,
maksymalnie raz na 2 sekundy.

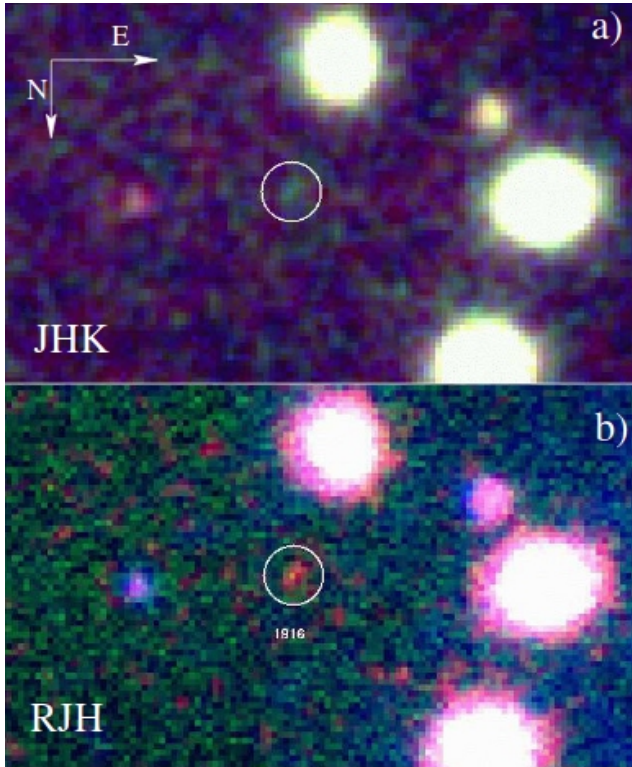
Przykłady współczesnych zdjęć z CCD



Największym kompozytowym zdjęciem jest najprawdopodobniej fragment Drogi Mlecznej, złożony z 268 zdjęć zbieranych przez 5 lat, zawierający 46 mld pikseli. Każdy fragment był wielokrotnie powtarzany, aby wykryć zmiany w czasie, Ruhr-Universität Bochum (2015).

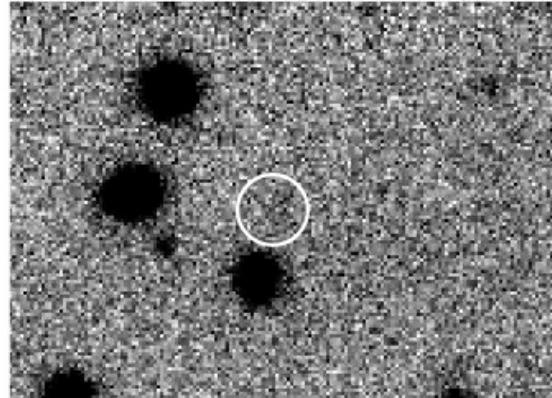
Nieważne jak duże będą teleskopy i jak doskonałe kamery,
astronomowie zawsze będą badać te obiekty,
które są na granicy możliwości detekcji.

Abell 1835 IR1916

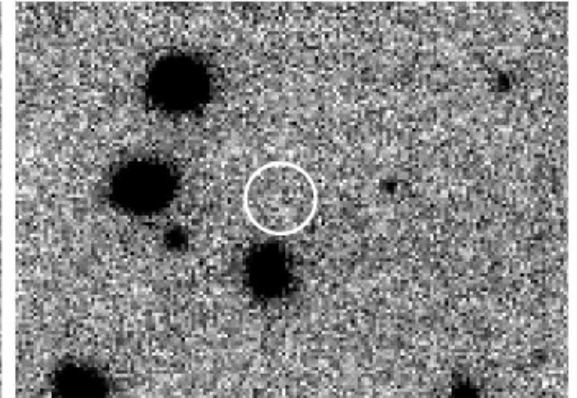


Publikacja o odkryciu
najodleglejszej galaktyki
(01.2018). Niski SNR.

H (1.6um)



K (2.2um)



Publikacja o nie-odkryciu
najodleglejszej galaktyki (10.2018).