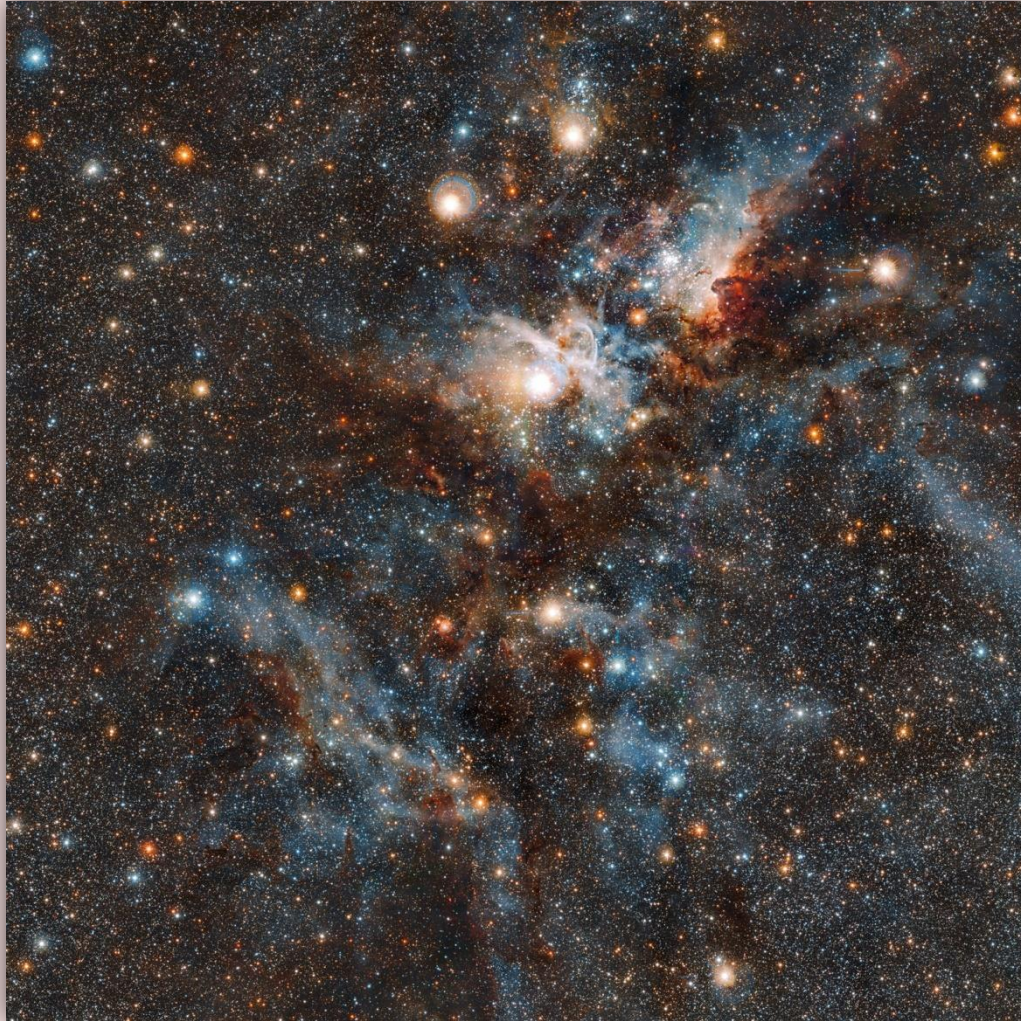




Podstawy Astronomii 1
fotometria

fotometria



Techniki używane w astronomii do pomiarów wielkości charakteryzujących obiekty i zjawiska astronomiczne (teledetekcja za pomocą promieniowania elektromagnetycznego):

- **Fotometria** – pomiar ilości promieniowania
- **Spektrometria** – pomiar rozkładu ilości promieniowania po długościach fali
- **Obrazowanie** – pomiar rozkładu przestrzennego źródeł promieniowania
- **Astrometria** – pomiar położenia źródeł promieniowania
- **Polarymetria** – pomiar polaryzacji promieniowania

fotometria



Hipparch, II w. p.n.e.
pierwszy katalog gwiazd

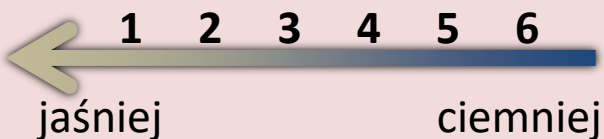
?



Ptolemeusz, 140 n.e.
Almagest

podział gwiazd widocznych gołym okiem na **6 klas** jasności:

- gwiazdy **najjaśniejsze** to gwiazdy **pierwszej wielkości** (gwiazdowej)
- gwiazdy **najśłabsze**, ledwo widoczne gołym okiem – **szóstej wielkości**



skala jest odwrócona

nazwa wielkości: *jasność*

jednostka: *magnitudo (mag., m), wielkość gwiazdowa*

zapis, np.: *3 mag., 3^m, 3 wielkości gwiazdowej*

fotometria

Galileusz, 1610

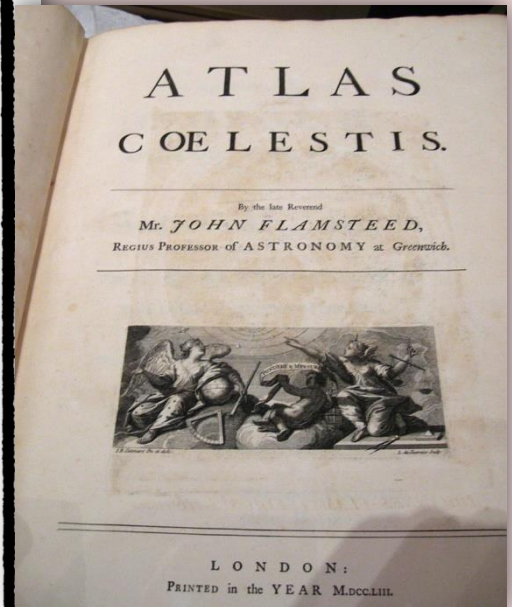
pierwsze obserwacje teleskopowe

Skala magnitudo zostaje rozszerzona na obiekty o jasnościach mniejszych niż możliwe do dostrzeżenia gołym okiem, np.:

7 wielkości gwiazdowej, 8 wielkości..., ...



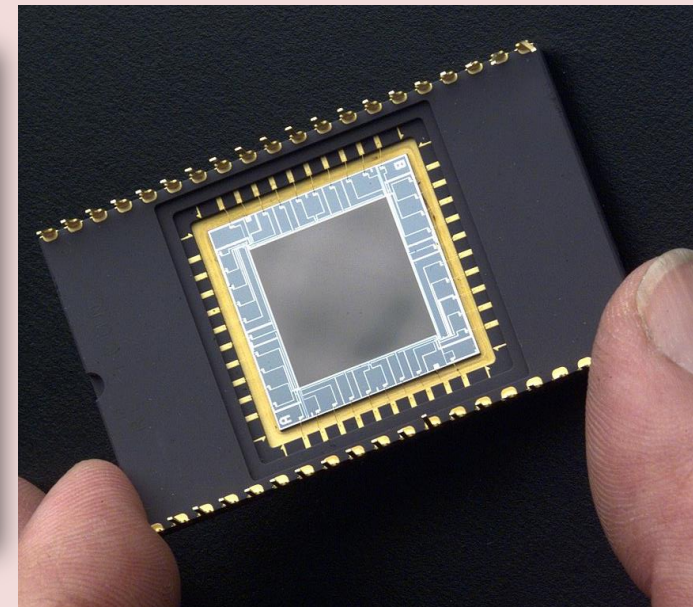
FLAMSTEED.	Ordo		Ascensio recta. 1690.	Distantia à Polo Boreo.	Longitudo. 1690.	Latitudo.	Varia Asc. R. pro 60' longit.		Varia D. à P. pro 60' longit.		Magnitudo.				
	Tych.	Ptol.					STELLARUM DENOMINATIO.		Si. G. M. S.			G. M. S.		M. S.	
							G. M. S.	G. M. S.	G. M. S.	G. M. S.		M. S.	M. S.		
1			20 46 0	69 17 15	O. 26 58 25	11 4 58 B	58	7	22	25	7.6				
2			21 25 45	71 15 25	26 48 15	9 1 26 B	57	52	22	19	7.6				
3			22 26 15	74 10 55	26 36 18	5 57 3 B	57	31	22	12	6				
4			22 51 15	74 36 55	26 49 4	5 23 59 B	57	28	22	07	7.6				
5	1	1	24 8 30	72 14 45	28 51 0	7 8 58 B	58	02	21	55	4				
6	2	2	24 23 30	70 43 55	29 37 59	8 28 16 B	58	22	21	50	3				
7			24 39 45	67 57 45	I. 0 54 20	10 57 12 B	58	57	21	49	tel.				
8	5	6	25 7 0	73 43 15	O. 29 10 57	5 26 12 B	57	54	21	44	6				
9			25 11 0	67 56 25	I. 1 22 15	10 47 47 B	59	00	21	44	5				
10			26 32 30	65 35 5	3 26 14	12 31 52 B	59	45	21	28	6.7				
11			27 19 30	65 48 15	4 2 12	12 4 2 B	59	48	21	20	6				
12		17	27 19 30	68 51 5	2 55 8	9 13 29 B	59	10	21	21	6.5				
13	inf. 1	3	27 26 30	68 1 45	3 19 18	9 57 12 B	59	22	21	20	2				
14			27 57 30	65 33 15	4 40 46	12 5 32 B	59	56	21	12	6				
15			28 22 30	71 58 45	2 43 49	5 56 58 B	58	36	21	08	6				
16			28 24 45	65 32 40	5 4 35	11 57 0 B	60	4	21	06	8				
17	3	4	28 52 30	70 16 25	3 46 50	7 22 45 B	59	2	21	02	6				
18			28 58 45	71 33 15	3 25 14	6 8 45 B	58	46	21	00	7				
19			29 1 30	76 12 15	1 49 50	1 46 25 B	57	47	21	00	6.7				
20			29 31 30	65 41 5	5 59 38	11 27 44 B	60	13	20	54	6				
21			29 31 30	66 25 20	5 43 40	10 46 20 B	60	1	20	53	7				
22	4	5	30 14 0	71 33 30	4 32 25	5 43 39 B	58	56	20	45	6.5				
23			30 29 30	71 45 25	4 41 59	5 27 23 B	58	58	20	43	7				
24			32 1 30	80 48 15	3 0 49	3 33 31 A	57	1	20	23	6				
25			32 42 30	81 12 25	3 30 53	4 9 43 A	57	00	20	16	7				
26			33 20 0	71 33 0	7 19 13	4 44 7 B	59	18	20	5	6.7				
27			33 26 0	73 41 55	6 41 33	2 40 42 B	58	46	20	4	6.7				



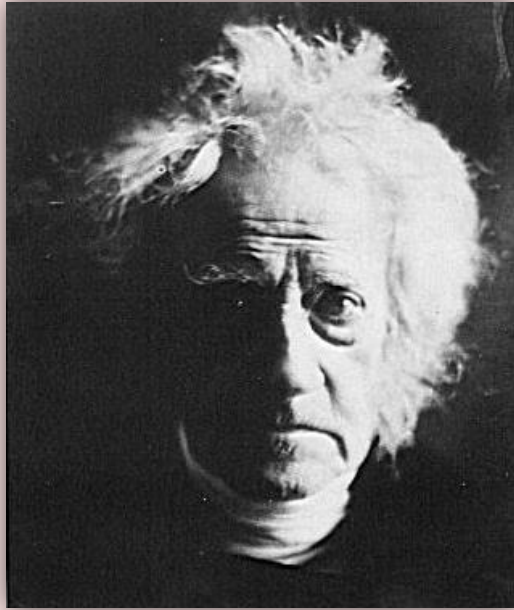
*katalog gwiazd Flamsteeda,
przykład katalogu z
jasnościami wizualnymi*

fotometria

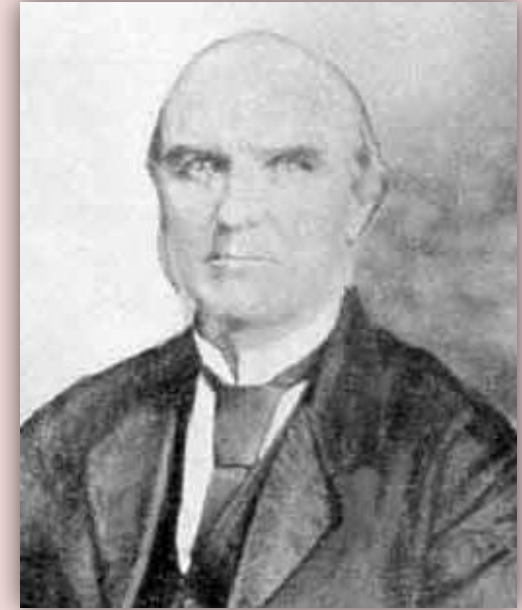
- Do końca XIX w. pomiar jasności w skali magnitudo wykonywany był okiem.
- Pomiar taki nazywany jest **fotometrią wizualną** a zmierzone jasności – **jasnościami wizualnymi**.
- Pomimo wykonywania pomiarów „na oko”, jasności gwiazd udawało się określać z dokładnością 0.1- 0.3 mag. (np. katalog BD *Argelandera*).
- Pomiar jest jednak subiektywny – zależy od obserwatora, dlatego zdarzały się spore błędy systematyczne
- Problem subiektywności zostaje rozwiązany przez wprowadzenie do użycia fotometrów wizualnych (oko + sztuczna gwiazda) i kliszy fotograficznej
- Obecnie pomiarów jasności wykonuje się przede wszystkim z użyciem matryc CCD (**fotometria CCD**)



fotometria



John Herschel



Norman Pogson

- Przejście do fotometrii instrumentalnej umożliwiło ujęcie skali magnitudo w matematyczne ramy.
- John Herschel około 1830 r. zauważył, że ilość światła dochodząca od gwiazdy 1 mag. (I_1) jest około 100 większa niż od gwiazdy 6 mag. (I_6)
- Norman Pogson (1856) przyjmuje, że dla gwiazd różniących się jasnością o 5 mag.:

$$I_m = 100 \cdot I_{m+5}$$

I_m , I_{m+5} – ilości światła mierzone od gwiazdy o jasności m i jasności $m+5$

fotometria

Iloraz $\frac{I_m}{I_{m+5}} = 100$ możemy zapisać inaczej:

$$\frac{I_m}{I_{m+1}} \cdot \frac{I_{m+1}}{I_{m+2}} \cdot \frac{I_{m+2}}{I_{m+3}} \cdot \frac{I_{m+3}}{I_{m+4}} \cdot \frac{I_{m+4}}{I_{m+5}} = 100 = a^5$$

$$\text{a stąd: } a = 2.511886 \dots = 10^{0.4}$$

Wniosek: iloraz ilości światła mierzonego od gwiazd różniących się jasnością o 1^m wynosi zawsze około 2.512. W pierwotnej (Ptolemeusz) skali magnitudo tak nie było.

Dla dwóch gwiazdy o dowolnych jasnościach m_x i m_y iloraz ten wynosi:

$$\frac{I_y}{I_x} = a^{(m_x - m_y)} = (2.512 \dots)^{(m_x - m_y)} = 10^{0.4(m_x - m_y)}$$

Przykład: porównamy dwie gwiazdy o jasnościach $m_x = 5.6^m$ i $m_y = 2.4^m$

$$\frac{I_{2.4}}{I_{5.6}} = 10^{0.4(5.6 - 2.4)} \approx 19.05$$

Wynik: gwiazda $m_y = 2.4^m$ jest jaśniejsza od gwiazdy $m_x = 5.6^m$ około 19 razy.

Wniosek: iloraz I_y/I_x informuje nas, ile razy jeden obiekt jest jaśniejszy/słabszy od drugiego.

A jeśli ten iloraz znamy?

fotometria

Równanie na iloraz I_y/I_x możemy przepisać do postaci podającej wartość $m_x - m_y$:

$$\frac{I_y}{I_x} = 10^{0.4(m_x - m_y)}$$



$$m_x - m_y = 2.5 \log \frac{I_y}{I_x}$$

lub

$$m_x - m_y = -2.5 \log \frac{I_x}{I_y}$$

} *wzór (prawo) Pogsona*

Uwaga na znak minus przed log w drugim wzorze!

Przykład: gwiazda A jest 20 razy jaśniejsza od gwiazdy B, czyli iloraz $I_A/I_B = 20$.

Wyznaczamy, o ile różnią się te gwiazdy w jasności w skali magnitudo:

$$m_A - m_B = \Delta m_{AB} = -2.5 \log \frac{I_A}{I_B} = -2.5 \log(20) \approx -3.25 \text{ mag.}$$

Wynik: gwiazdy te różnią się jasnością o 3.25 mag. Znak minus oznacza, że jasność gwiazdy A (jaśniejszej) będzie wyrażony liczbą o 3.25 mniejszą od jasności gwiazdy B. To jest zgodne z cechą skali magnitudo: większa jasność to mniejsza liczba.

fotometria

Uwagi do prawa Pogsona:

- Wielkości we wzorze informują nas o:

$$m_x - m_y = -2.5 \log \frac{I_x}{I_y}$$

o ile jaśniej lub ciemniej ile razy jaśniej lub ciemniej

- Skala jasności mag. jest odwrócona – słabiej świecące obiekty opisane są większą liczbą.
- Skala jasności mag. jest logarytmiczna – nasilenie odbieranego wrażenia (wzrokowego) jest proporcjonalne do logarytmu ilości światła (podobnie jak dźwięk).
- Jasności w skali mag. można wyłącznie odejmować od siebie. Nie można wykonywać na tych jasnościach dodawania, mnożenia i dzielenia.
- Jasności w skali mag. nie są addytywne. Przykład: sumaryczna jasność dwóch gwiazd $m_x = 5.6^m$ i $m_y = 2.4^m$ nie wynosi

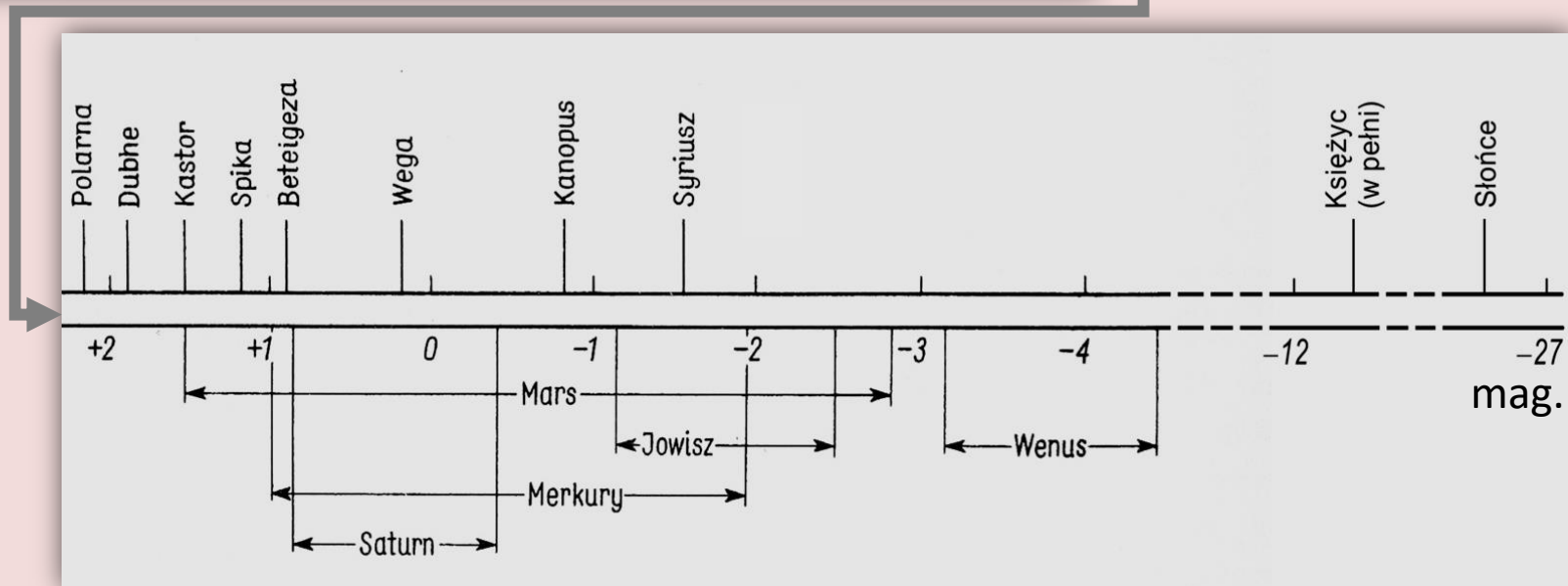
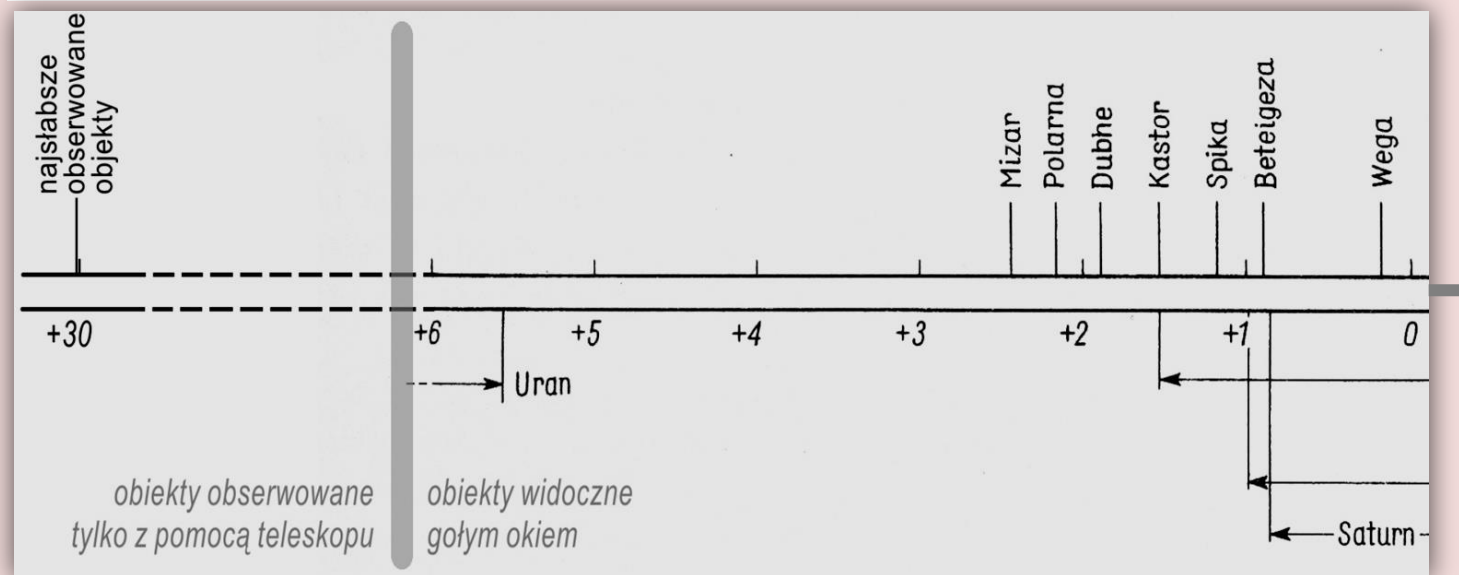
$$\cancel{m_x + m_y = 8.0^m}$$

ponieważ wynik powinien dać jasność większą od jasności każdej z obu gwiazd.

Addytywne są natomiast ilości światła I .

- Zero w skali mag. nie oznacza obiektu emitującego zerową ilość światła.

fotometria



zakres dostępny dla oka: $+6^m$ do -26^m , czyli $I_{-26}/I_{+6} \approx 6.3 \cdot 10^{12}$

zakres obserwowanych obiektów: od $+30^m$ do -26^m , czyli $I_{-26}/I_{+30} \approx 2.5 \cdot 10^{22}$

fotometria

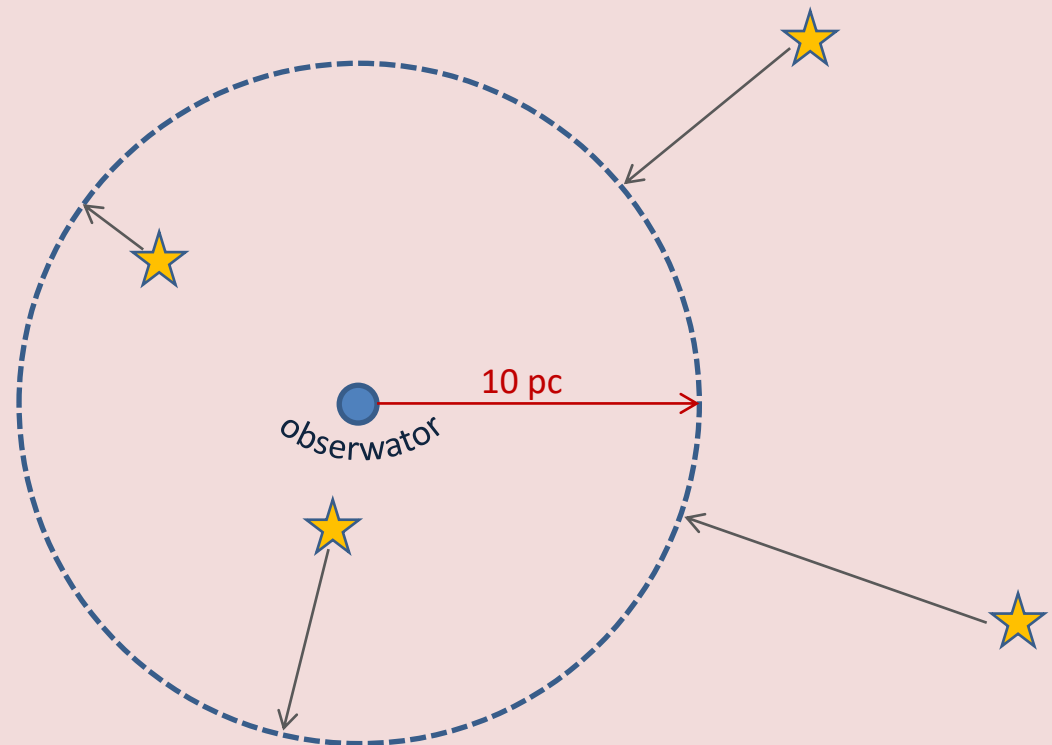
Jasność widoma najjaśniejszych gwiazd

	nazwa	jasność widoma [mag]	gwiazdozbiór	oznaczenie	odległość [lata świetlne]
0	Słońce	-26.73	---	---	0.000 016
1	Syriusz	-1.47	Wielki Pies	α CMa	8.6
2	Kanopus	-0.72	Kil	α Car	310
3	Toliman	-0.27	Centaur	α Cen	4.4
4	Arktur	-0.04	Wolarz	α Boo	37
5	Wega	0.03	Lutnia	α Lyr	25
6	Rigel	0.11	Orion	β Ori	770
7	Procyon	0.34	Mały Pies	α CMi	11
8	Achernar	0.50	Erydan	α Eri	140
9	Betelgeza	0.58	Orion	α Ori	430
10	Hadar	0.60	Centaur	β Cen	530

Jasność widoma zależy nie tylko od cech własnych obiektu, ale również od odległości do niego.
(kolor żółty – gwiazdy widoczne z Polski, Słońce dodane dla porównania)

fotometria

- Aby umożliwić porównanie rzeczywistych jasności gwiazd wprowadzono **jasność absolutną**.
- Jasność absolutna, **M**, to jasność gwiazdy (obiektu) z **odległości 10 pc** (10 parseków = 32.6 lat świetlnych).
- Wartość **M** zależy tylko od tego, ile światła emituje gwiazda.



(więcej o M w przyszłości)

fotometria

Jasności widome i absolutne najjaśniejszych gwiazd

	nazwa	jasność widoma [mag]	jasność absolutna [mag]	oznaczenie	odległość [lata świetlne]
0	Słońce	-26.73	4.83	---	0.000 016
1	Syriusz	-1.47	1.42	α CMa	8.6
2	Kanopus	-0.72	-5.71	α Car	310
3	Toliman	-0.27	4.10	α Cen	4.4
4	Arktur	-0.04	-0.30	α Boo	37
5	Wega	0.03	0.58	α Lyr	25
6	Rigel	0.11	-7.84	β Ori	770
7	Procyon	0.34	2.66	α CMi	11
8	Achernar	0.50	-1.46	α Eri	140
9	Betelgeza	0.58	-5.85	α Ori	430
10	Hadar	0.60	-4.90	β Cen	530


fotometria

Co siedzi we wzorze Pogsona?

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{f_1}{f_2}$$

$$M_1 - M_2 = -2.5 \log \frac{L_1}{L_2}$$

najczęściej spotykane
formy wzoru Pogsona


$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{I_1}{I_2}$$

Występujące w logarytmie wielkości fizyczne w literaturze określane są m.in. tak:

- natężenie blasku
- natężenie światła
- natężenie promieniowania
- natężenie oświetlenia
- ilość światła
- strumień promieniowania
- moc promieniowania

Które z nich są poprawne z fizycznego punktu widzenia?

Jest wiele wielkości fizycznych, które opisują ilościowo światło. Jak to wygląda w trzech dziedzinach zajmujących się pomiarem światła: radiometrii, fotometrii i astronomii?

fotometria

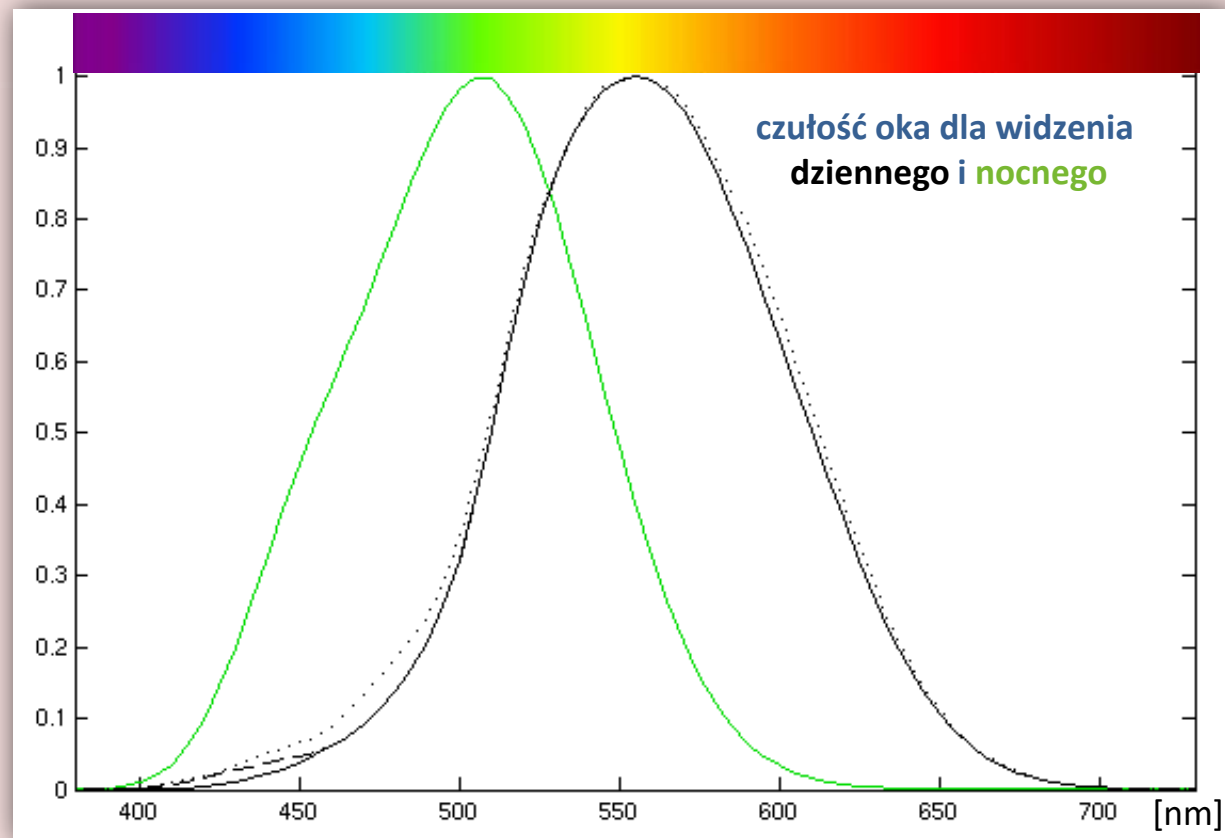
Radiometria – ilościowy pomiar energii promieniowania elektromagnetycznego.

Wielkości używane:

- energia promieniowania (*radiant energy*) [J],
- strumień promieniowania (*radiant flux*) [W],
- natężenie promieniowania (*radiant intensity*) [W sr⁻¹],
- radiancja (*radiance*) [W sr⁻¹ m⁻²],
- irradiancja, emitancja (*irradiance, radiant emittance*) [W m⁻²].

Uwaga: wielkości radiometryczne mogą być też określone na jednostkę długości fali lub częstotliwości.

fotometria



Fotometria – pomiar wrażenia wzrokowego w oku człowieka wywołanego promieniowaniem elektromagnetycznym.

Wielkości używane:

- ilość światła (*luminous energy*) [lm s],
- strumień świetlny (*luminous flux*) [lm],
- natężenie światła / światłość (*luminous intensity*) [$\text{cd} = \text{lm sr}^{-1}$],
- luminancja (*luminance*) [$\text{cd m}^{-2} = \text{lm sr}^{-1} \text{m}^{-2}$],
- natężenie oświetlenia (*illuminance, luminous emittance*) [$\text{lx} = \text{lm m}^{-2}$].

jednostki: lm – lumen (subiektywny W), cd – kandela, lx – luks

fotometria

Kolejne wiersze zawierają wielkości fizyczne odpowiadające sobie w każdej z trzech dziedzin

*Uwaga, niektóre nazwy są takie są same w różnych dziedzinach, ale opisują inną wielkość fizyczną.
np.: strumień promieniowania, co może być przyczyną pomyłek.*

radiometria, fotometria i astronomia – porównanie

radiometria	fotometria	astronomia
strumień promieniowania, Φ [W]	strumień świetlny, Φ [lm]	moc promieniowania, L (luminosity) [W] jasność absolutna, M (absolute magnitude) [mag]
natężenie promieniowania, I [W sr ⁻¹]	natężenie światła, I [lm sr ⁻¹]	brak odpowiednika
irradiancja, E [W m ⁻²]	natężenie oświetlenia, E [lm m ⁻²]	strumień promieniowania, f (flux density) [W m ⁻²] jasność widoma, m (apparent magnitude) [mag]
radiancja, L [W sr ⁻¹ m ⁻²]	luminancja, L [lm sr ⁻¹ m ⁻²]	natężenie promieniowania, I (intensity) [W sr ⁻¹ m ⁻²] jasność powierzchniowa, S (surface brightness) [mag arcsec ⁻² = mpsas]

fotometria

Na podstawie tabeli możemy zapisać wzór Pogsona w następujących formach:

Dla pomiarów instrumentalnych:

Jasność widoma (m) i strumień promieniowania (obserwowany) (f):

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{f_1}{f_2}$$

Jasność absolutna (M) i moc promieniowania (L):

$$M_1 - M_2 = -2.5 \log \frac{L_1}{L_2}$$

Jasność powierzchniowa (S) i natężenie promieniowania (I):

$$S_1 - S_2 = -2.5 \log \frac{I_1}{I_2}$$

Dla obserwacji wizualnych (oko):

Jasność widoma wizualna (m_{vis}) i natężenie oświetlenia (E):

$$m_{vis1} - m_{vis2} = -2.5 \log \frac{E_1}{E_2}$$

Jasność powierzchniowa wizualna (S_{vis}) i luminancja (L):

$$S_{vis1} - S_{vis2} = -2.5 \log \frac{L_1}{L_2}$$

fotometria

Pomiar jasności w astronomii jest radiometrią czy fotometrią?

Dla pomiarów instrumentalnych **fotometria astronomiczna jest radiometrią**.

Wielkości fotometryczne astronomiczne mogą odnosić się do wybranych przedziałów fal elektromagnetycznych (filtry astronomiczne) lub do całego widma elektromagnetycznego (wartości bolometryczne). [więcej o tym w przyszłości]

Gdy instrumentem pomiarowym (detektorem) jest oko ludzkie, czyli dla obserwacji wizualnych, **fotometria astronomiczna jest fotometrią**.

fotometria

Definicja punktu zero w skali magnitudo.

- Skala magnitudo wymaga określenia punktu zerowego – jaki obiekt ma jasność $m=0.0$ mag.
- Jeśli znamy taki obiekt (referencyjny), to możemy zapisać prawo Pogsona:

$$m - 0.0 = -2.5 \log \left(\frac{f}{f_0} \right)$$

gdzie f_0 jest strumieniem obserwowanym dla źródła referencyjnego. Inny zapis:

$$m = -2.5 \log(f) + C$$

- Gwiazdą referencyjną była przez długi czas Wega (α Lyr).
- Jednym ze skutków takiego określenia punktu zerowego jest to, że jasność obserwowana niektórych obiektów ma wartości ujemne (np.: Syriusz -1.47 mag., Wenus w maksimum blasku -4.4 mag, Księżyc w pełni -12.74 mag.).



fotometria

Jasność graniczna (limiting magnitude, zasięg gwiazdowy) – jasność najśłabszych widocznych gwiazd. Dla oka nieuzbrojonego w sprzęt optyczny (lornetka, teleskop) to **przeciętnie 6 mag.**, ale...

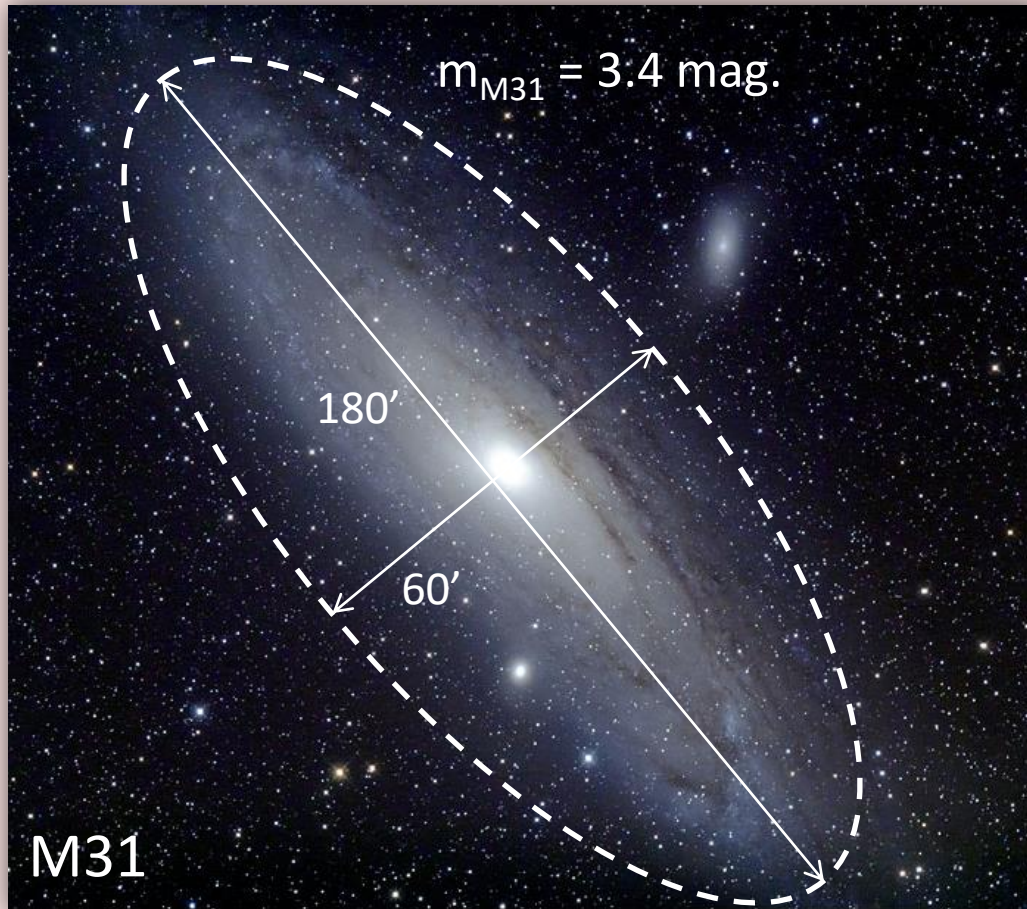
- typowa jasność graniczna dla oka (**ciemne niebo***): **5.5– 6.5 mag.**
- jasność graniczna dla oka doświadczonego obserwatora o bardzo dobrym wzroku (**ciemne niebo***): **6.5 – 7.0 mag.**
- jasność graniczna dla oka z użyciem specjalnych technik obserwacyjnych lub w teście laboratoryjnym z sztucznymi gwiazdami: **≈8.5 mag.**



* uwaga na jasność tła nieba!

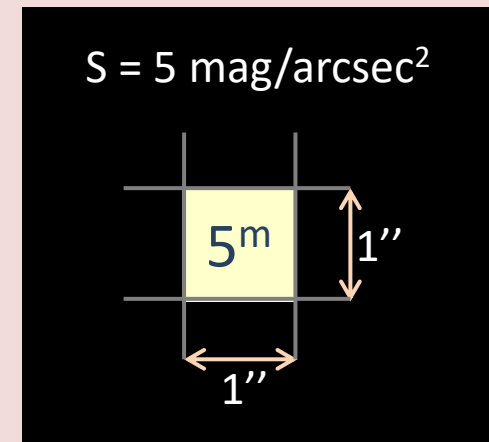
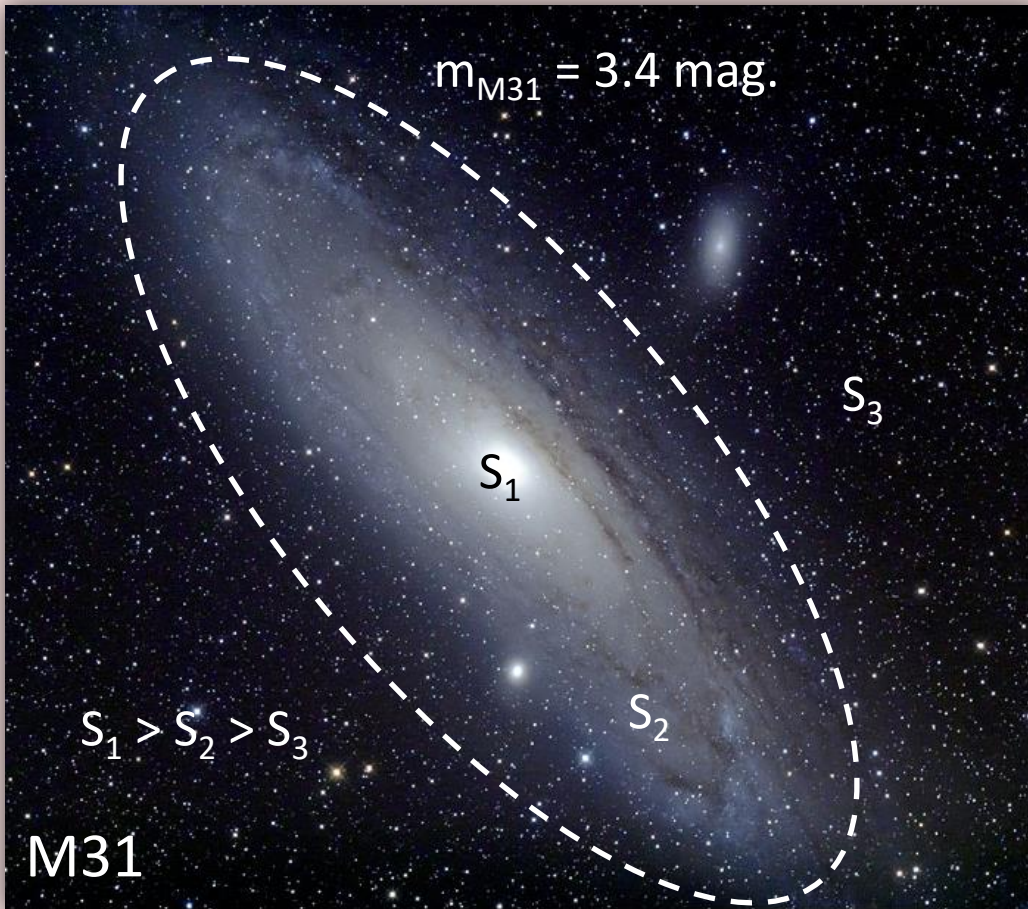
fotometria

- Jasność w skali magnitudo podajemy też dla planet oraz dla **obiektów mgławicowych** (mgławice, galaktyki, gromady gwiazd, komety – obiekty „niepunktowe”).
- Jasność widoma np. galaktyki, to zwykle jej **całkowitą jasność** pochodząca z całego przez nią zajętego obszaru na niebie.

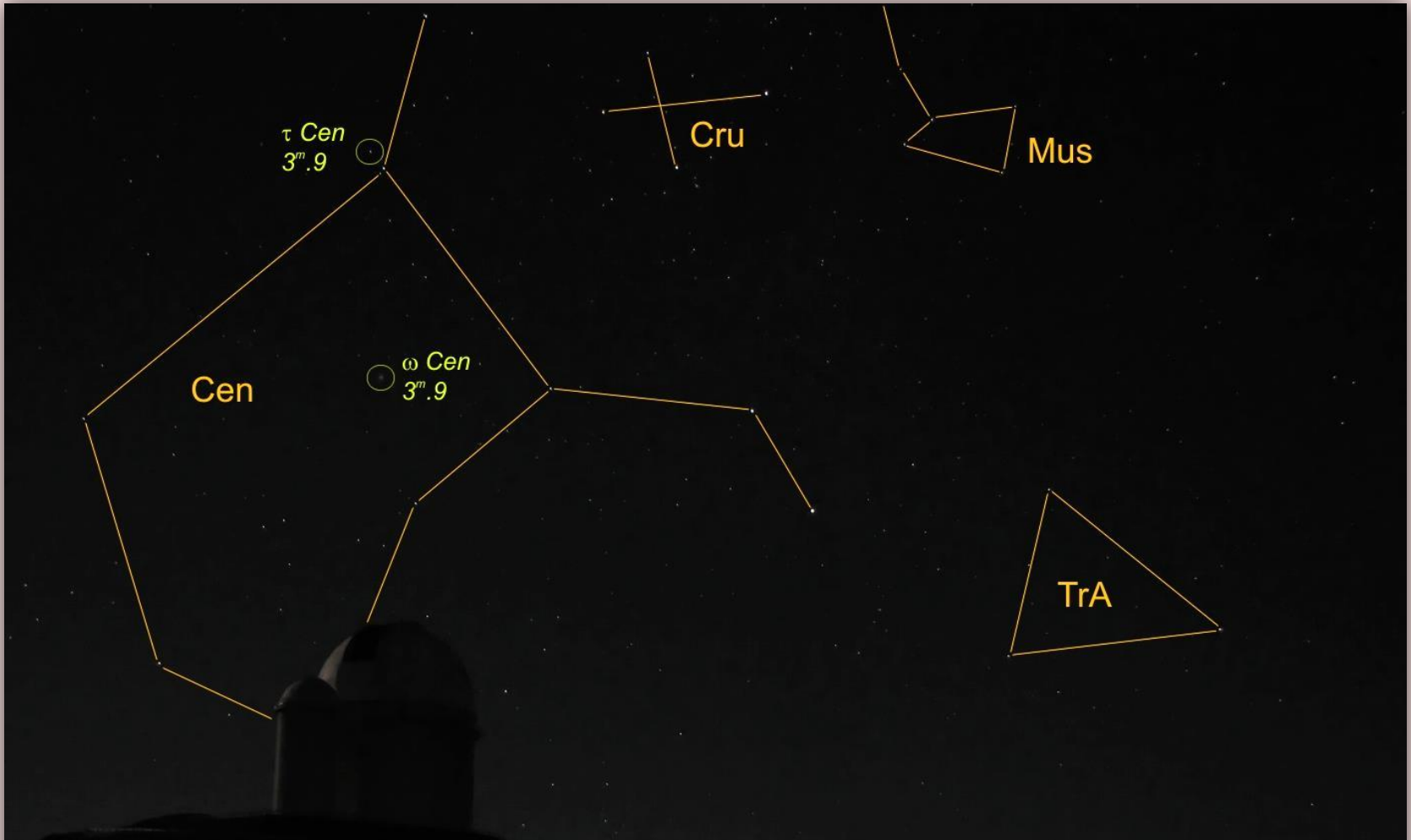


fotometria

- Dla widoczności obiektów mgławicowych ważna jest nie tylko jasność całkowita, a też powierzchnia zajmowana na niebie.
- **Jasność powierzchniowa S [mag/arcsec², mpsas]** to jasność przypadająca na jednostkową powierzchnię nieba (kąąt bryłowy), zwykle 1 arcsec²



fotometria



τ Cen wydaje się jaśniejsza od ω Cen, chociaż oba obiekty mają taką samą jasność, 3.9 mag.

τ Cen to gwiazda (obiekt praktycznie punktowy) – mała powierzchnia

ω Cen to gromada gwiazd (obiekt rozmyty, mgławicowy) – duża powierzchnia

Taka sama całkowita jasność przy większej powierzchni na niebie oznacza mniejszą jasność powierzchniową i słabszą widoczność.

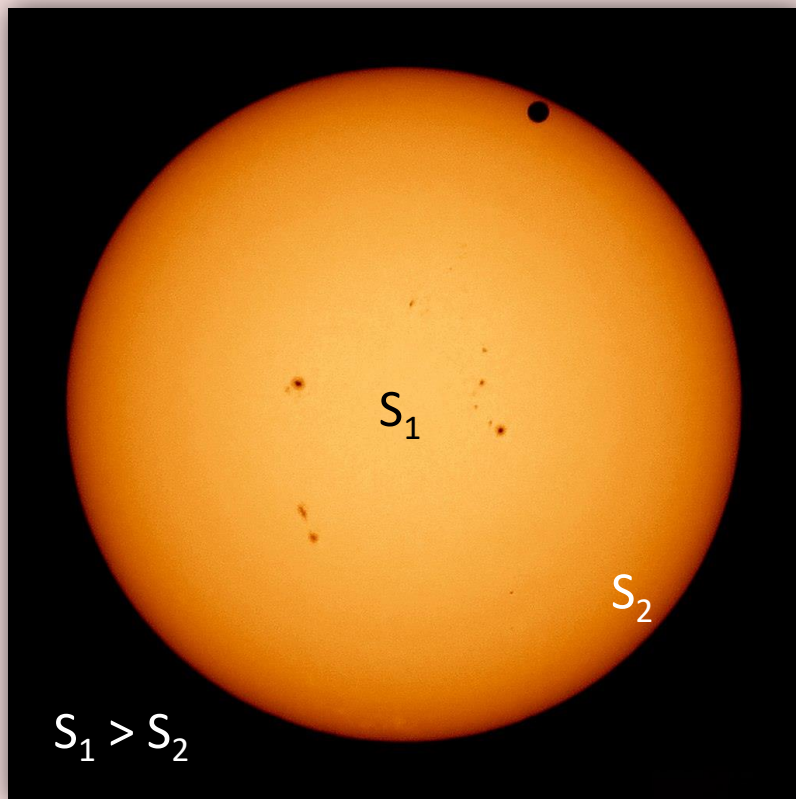
fotometria



Obiekt	jas. całk.	maks. jas. pow.
M31 (And):	3.4 mag	16.6 mag/arcsec ²
M33 (Tri):	5.7 mag	20.1 mag/arcsec ²
M13 (Her):	5.8 mag	16.9 mag/arcsec ²

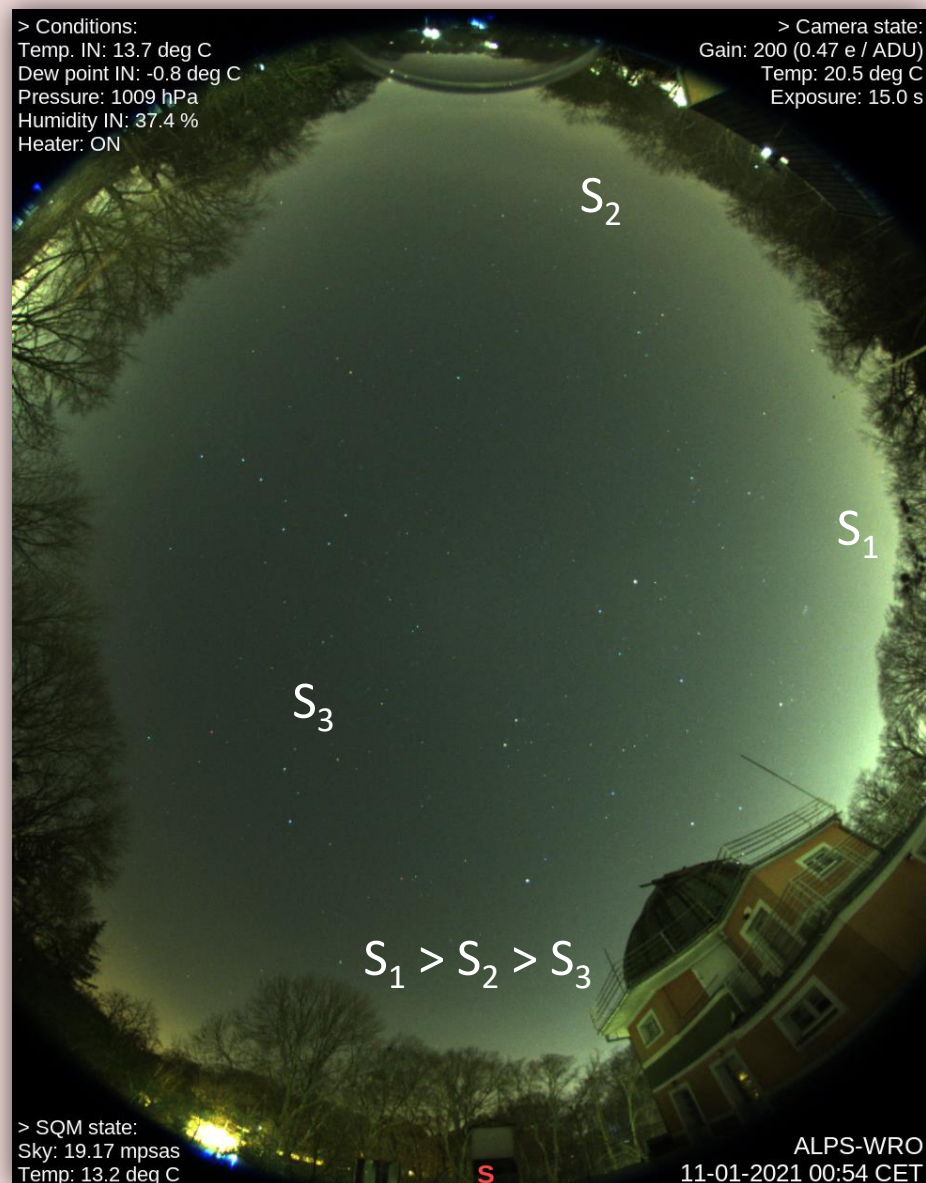
Uwaga na jasność tła nieba (kontrast)!

fotometria



- Jasność powierzchniowa S podawana jest też dla nieba oraz dla obiektów z widoczną tarczą, np. Słońce.
- Jasność powierzchniową możemy przez prawo Pogsona powiązać z natężeniem promieniowania:

$$S_1 - S_2 = -2.5 \log \frac{I_1}{I_2}$$



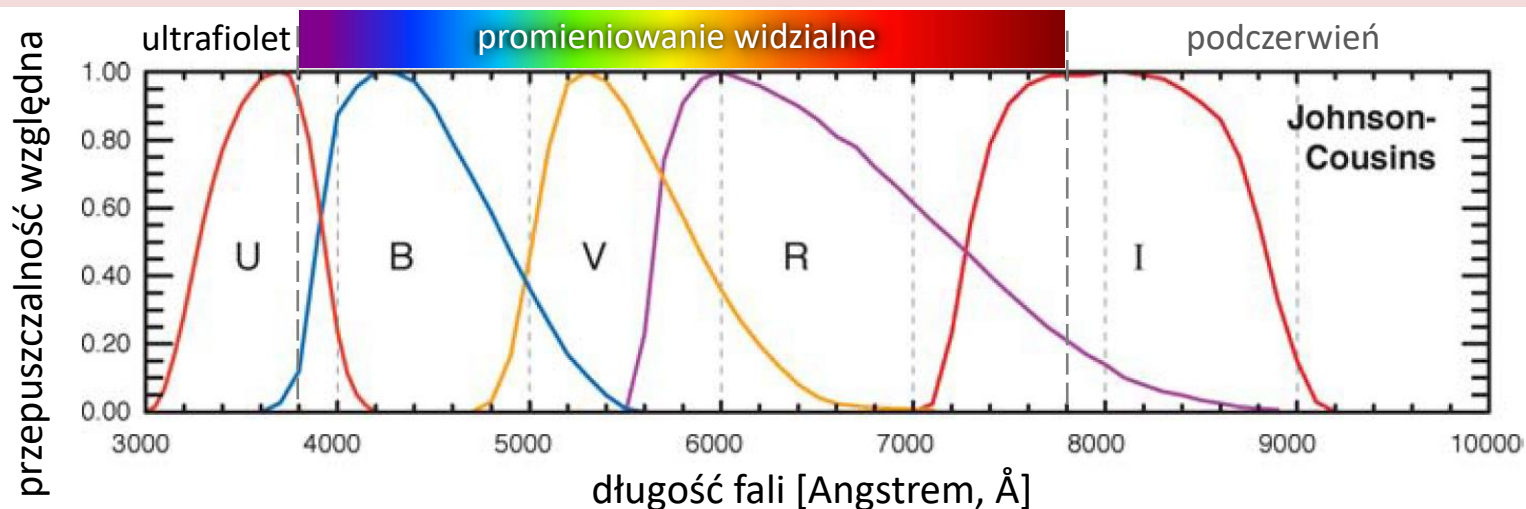
fotometria

- Pomiar ilości promieniowania emitowanego przez obiekt we wszystkich dł. fali jednym detektorem nie jest możliwy.
- Pomiar ilości promieniowania wykonywany jest w pewnym zakresie dł. fal. Zakres ten jest odpowiednio dobrany i ściśle określony.
- Praktyczne „wycięcie” odpowiedniego zakresu wykonywane jest za pomocą filtra.
- Często do pomiarów jasności wykorzystuje się jednocześnie kilku filtrów, które pozwalają uzyskać pewne informacje o fizycznych cechach obiektu.
- System fotometryczny składa się zwykle z zestawu odpowiednio dobranych filtrów.
- Naturalnym systemem fotometrycznym jest ludzkie oko. Jasność „mierzoną” okiem nazywamy wizualną.
- Jednym z najbardziej znanych systemów fotometrycznych jest system Johnsona-Cousinsa (UBVRI).
- Mierząc strumień gwiazdy w danym filtrze dostajemy jej jasność w tym filtrze, np. m_V , V dla filtra V .

przykład jasności
w systemie UBVRI

Wega: $U = 0.03$, $B = 0.03$, $V = 0.03$, $R = 0.07$, $I = 0.10$ mag.

Arktur: $U = 2.46$, $B = 1.18$, $V = -0.05$, $R = -1.03$, $I = -1.68$ mag.



*charakterystyka
widmowa
filtrów
systemu
UBVRI*