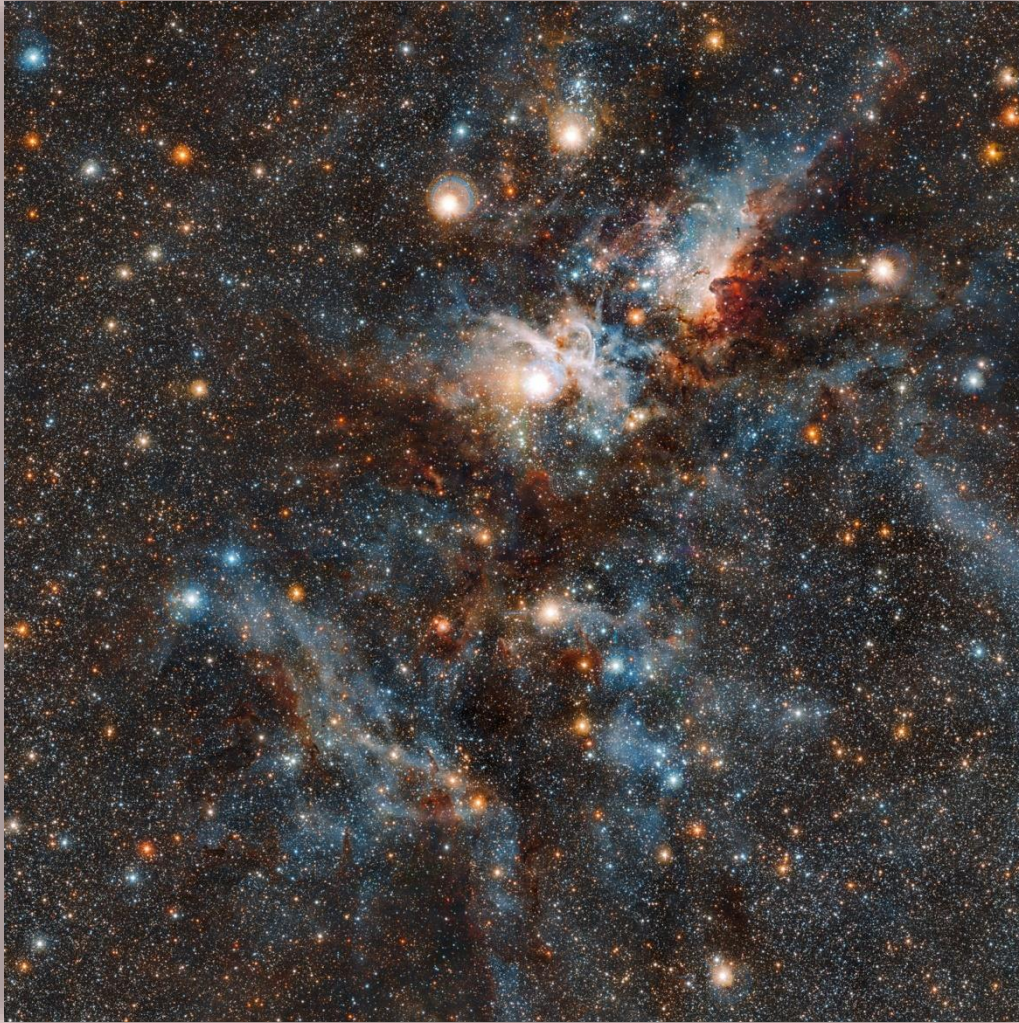




Podstawy Astronomii 1

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

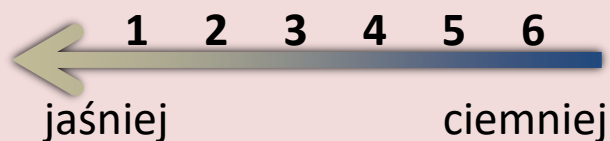
?



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

Galileusz, 1610

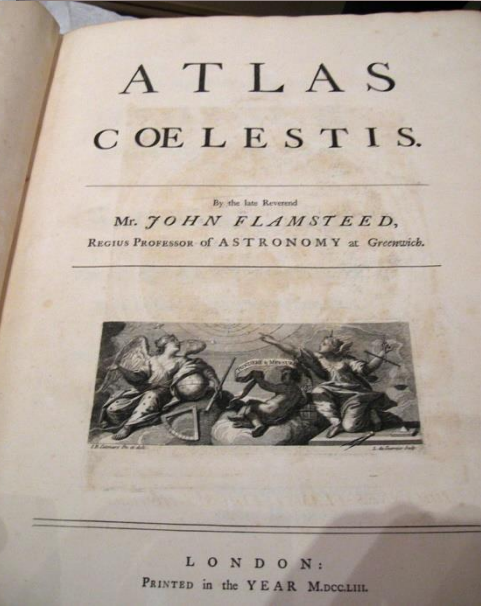
pierwsze obserwacje teleskopowe



Skala magnitudo zostaje rozszerzona na obiekty o jasnościach mniejszych niż możliwe do dostrzeżenia gołym okiem, np.:
7 wielkości gwiazdowej, 8 wielkości..., ...



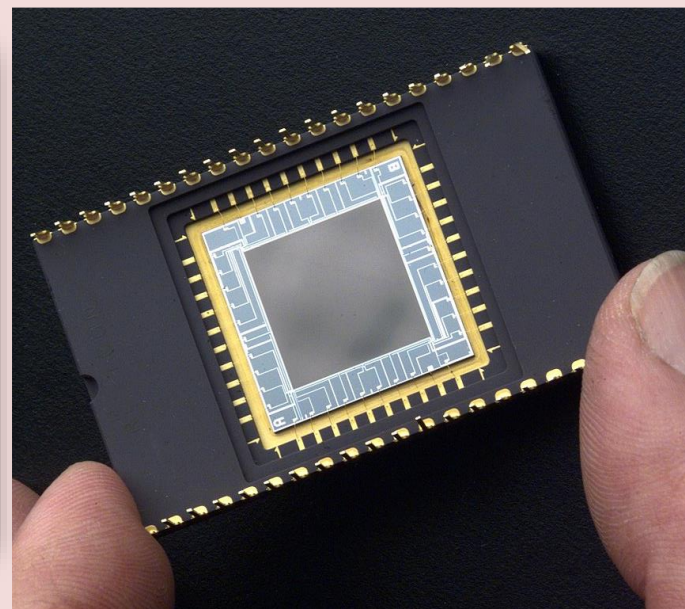
FLAMSTEED.	Ordo		In Constellatione Arietis. 66.	Ascensio recta. 1690.	Distantia à Polo Boreo.	Longitudo. 1690.	Latitudo.	Varia Asc. R. pro 60' longit.		Varia D. à P. pro 60' longit.		Magnitudo.
	Ptol.	Tych.						M.	S.	M.	S.	
S T E L L A R U M D E N O M I N A T I O .												
1			Quz in Cornu duarum præcedens. Sequens & Borea est.	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		In Cervice. In Vertice.	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				Infrà Lucidam. Infor. sup. Caput, Lucida Arietis.	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	In Roſtro duarum Borea.	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			In Roſtro Australior.	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				In extremitate Pedis posterioris. *	32 1 30	80 48 55	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



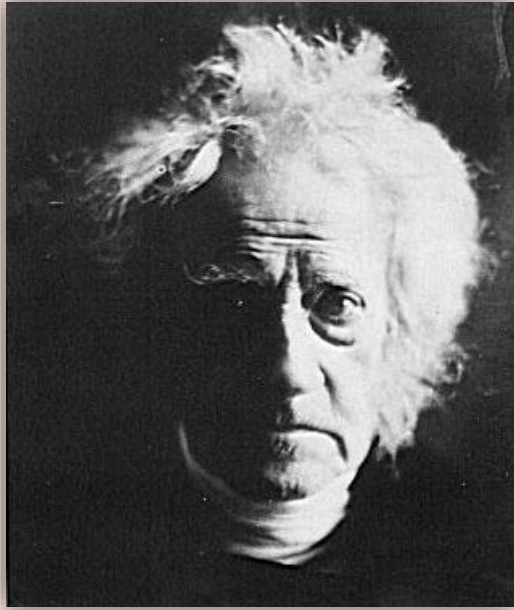
katalog gwiazd Flamsteeda,
przykład katalogu z
jasnościami wizualnymi

fotometria

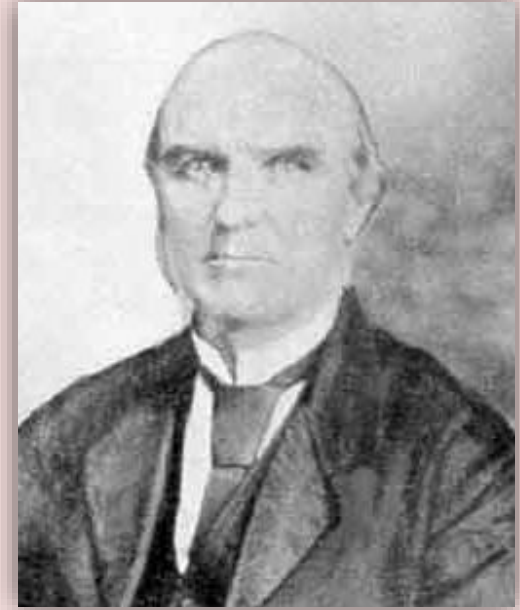
- Do końca XIX w. pomiar jasności w skali magnitudo wykonywany był okiem.
- Pomiar taki nazywany jest **fotometrią wizualną** a zmierzone jasności – **jasnościami wizualnymi**.
- Pomimo wykonywania pomiarów „na oko”, jasności gwiazd udawało się określać z dokładnością 0.1- 0.3 mag. (np. katalog BD *Argelandera*).
- 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 $m_x = 5.2^m$ 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

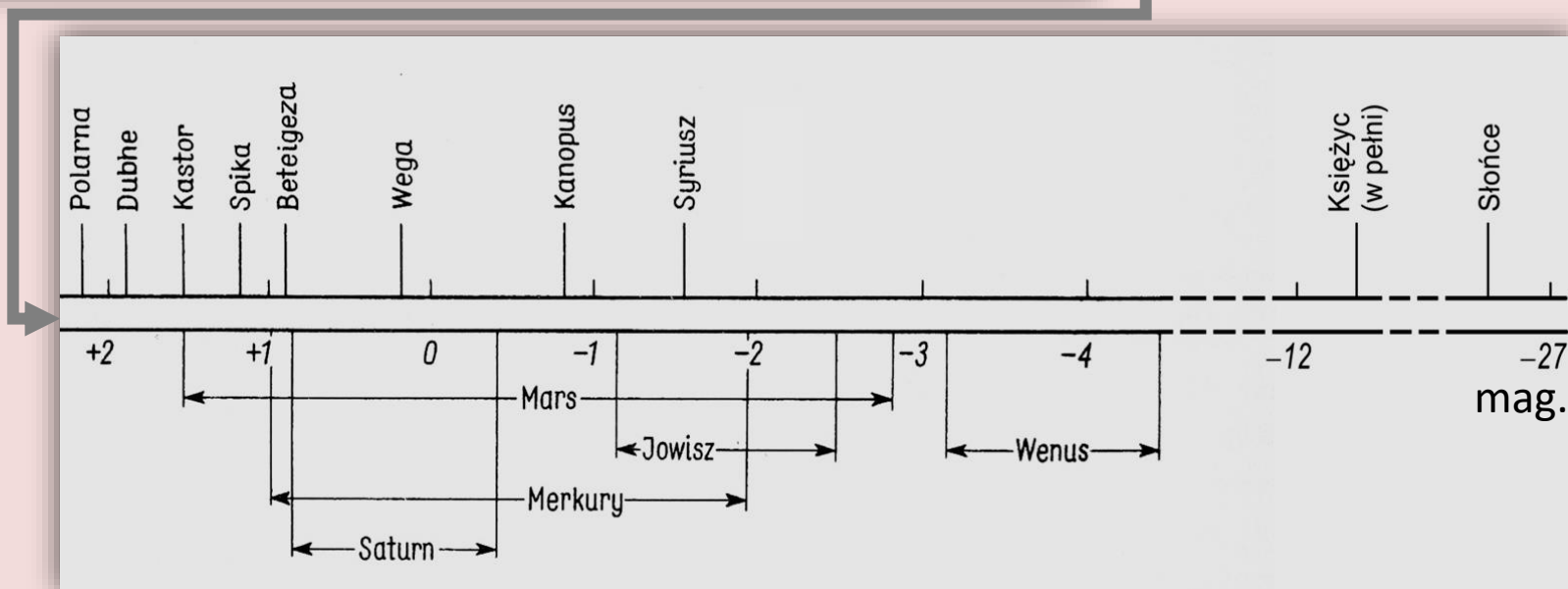
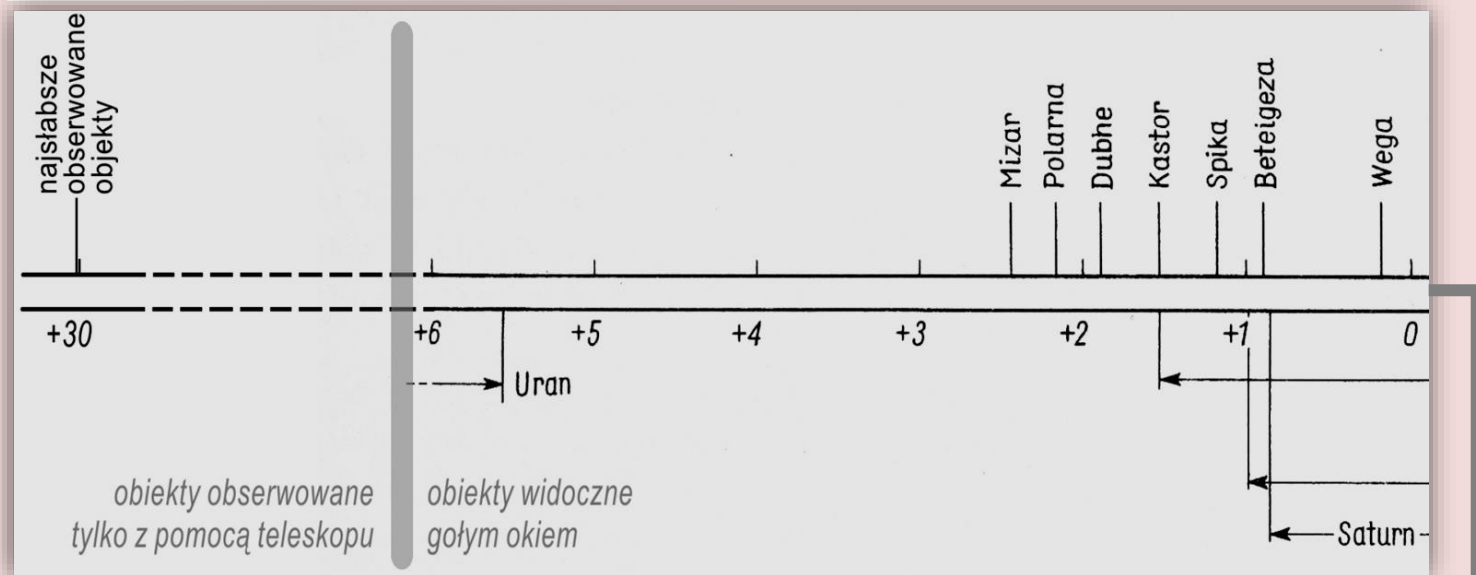
$$\cancel{m_x + m_y = 8.0^m}$$

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 $\frac{I_{-26}}{I_{+6}} \approx 6.3 \cdot 10^{12}$

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

fotometria

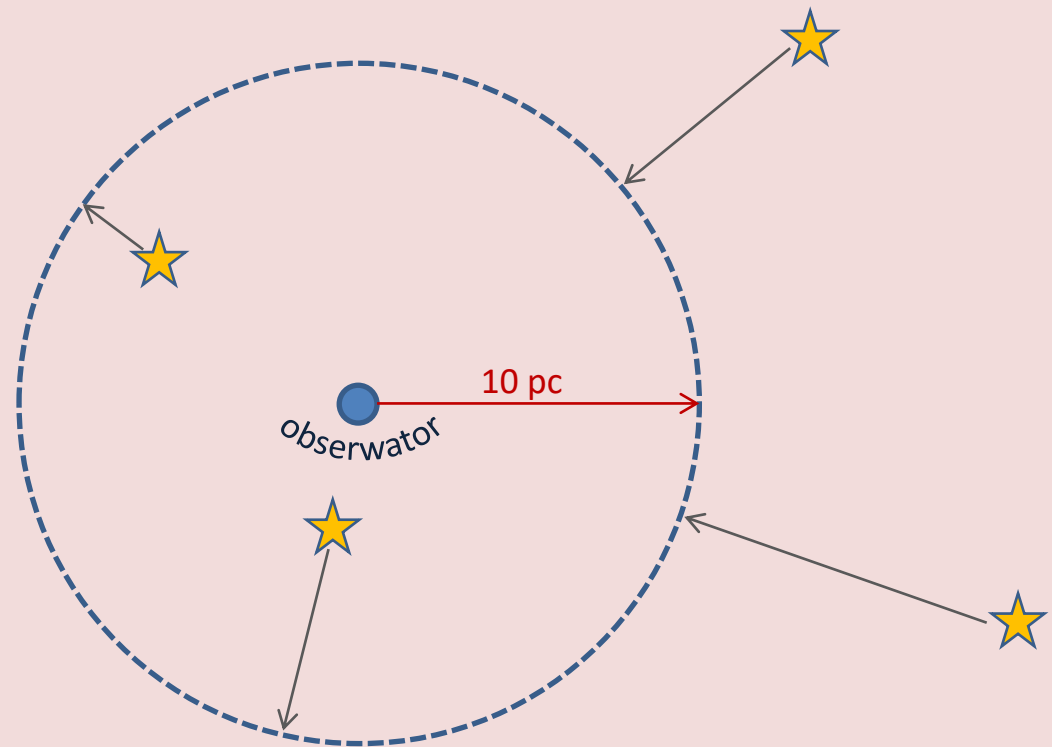
Jasność widoma najjaśniejszych gwiazd

	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

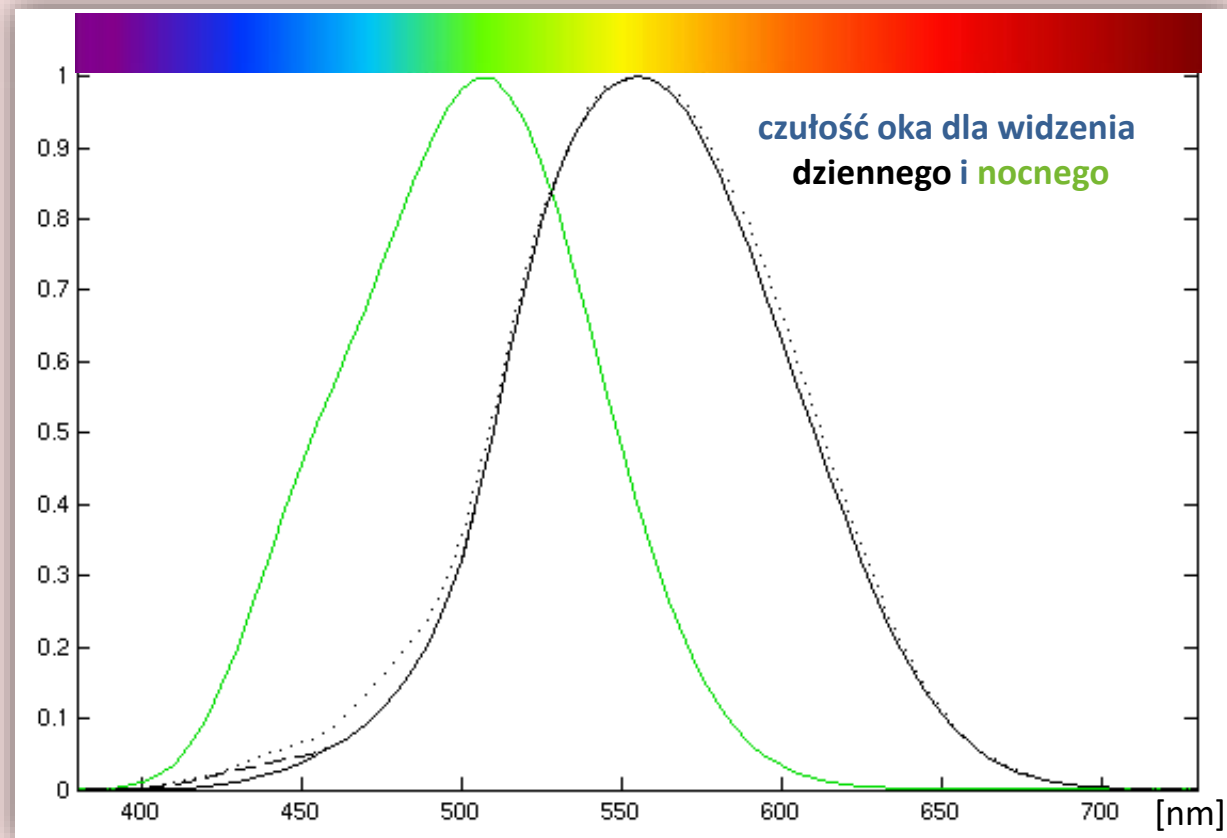
Radiometria – ilościowy pomiar energii promieniowania elektromagnetycznego.

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 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 najsłabszych 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.**

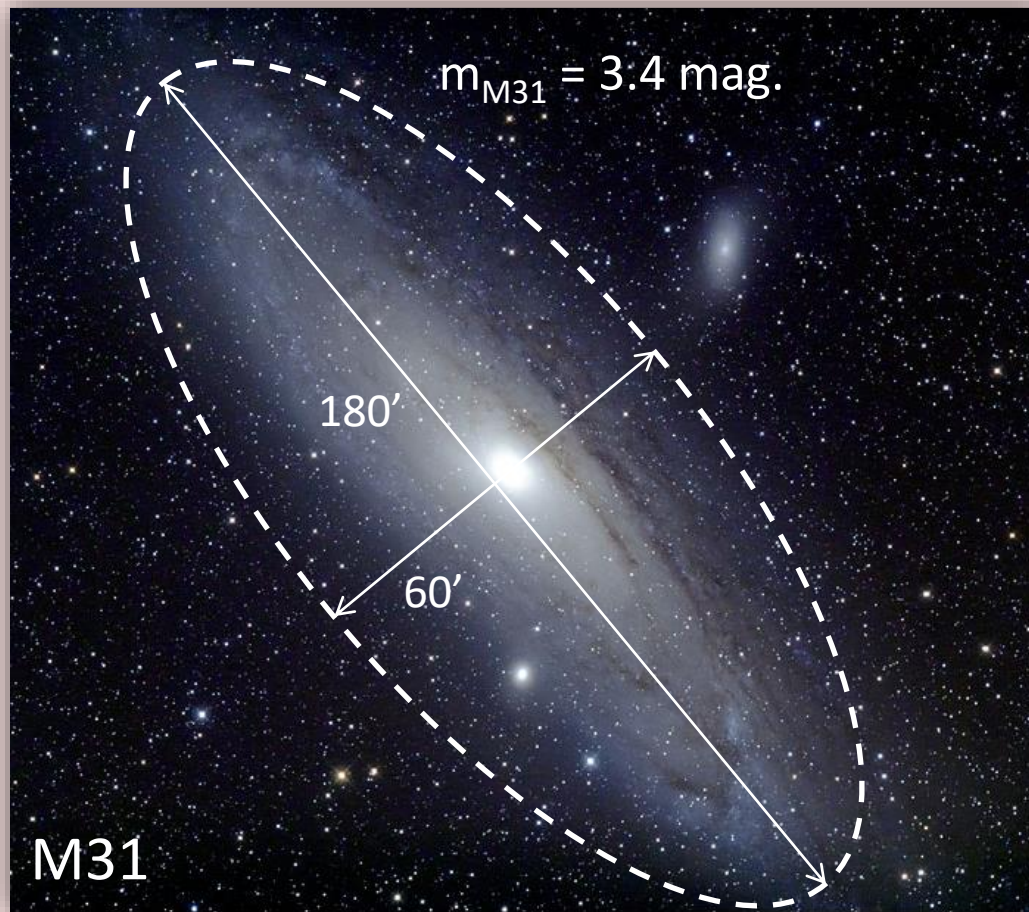


* **uwaga na jasność tła nieba!**

artykuł dla zainteresowanych tematem
Human contrast threshold and astronomical visibility
<https://academic.oup.com/mnras/article/442/3/2600/1052389>

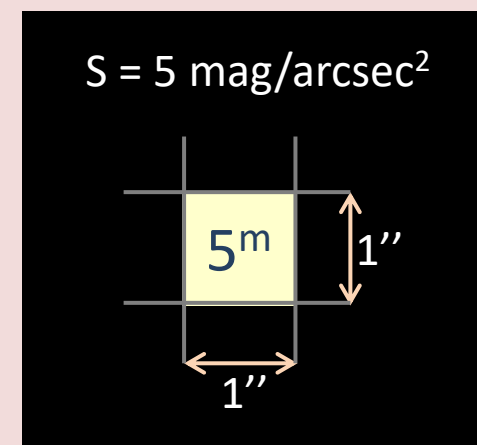
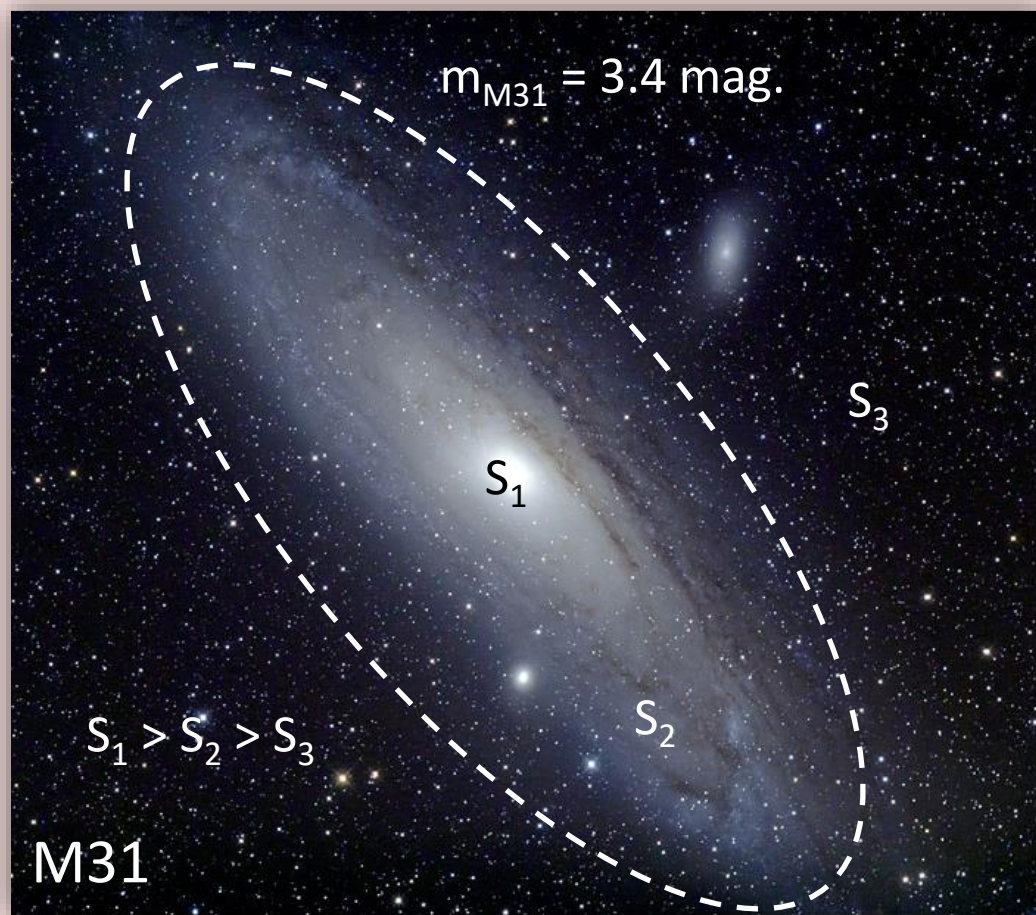
fotometria

- 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.

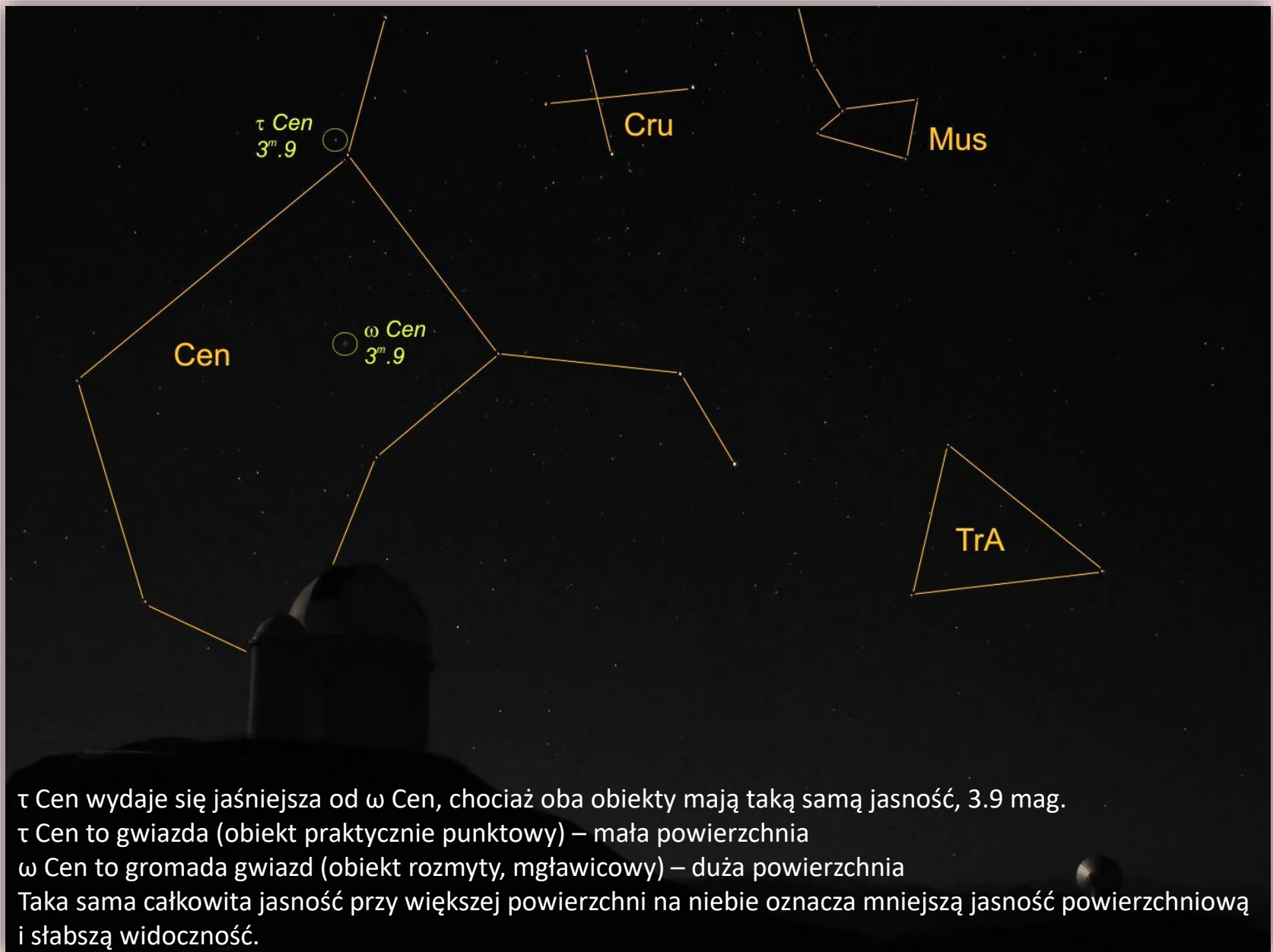


fotometria

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



fotometria



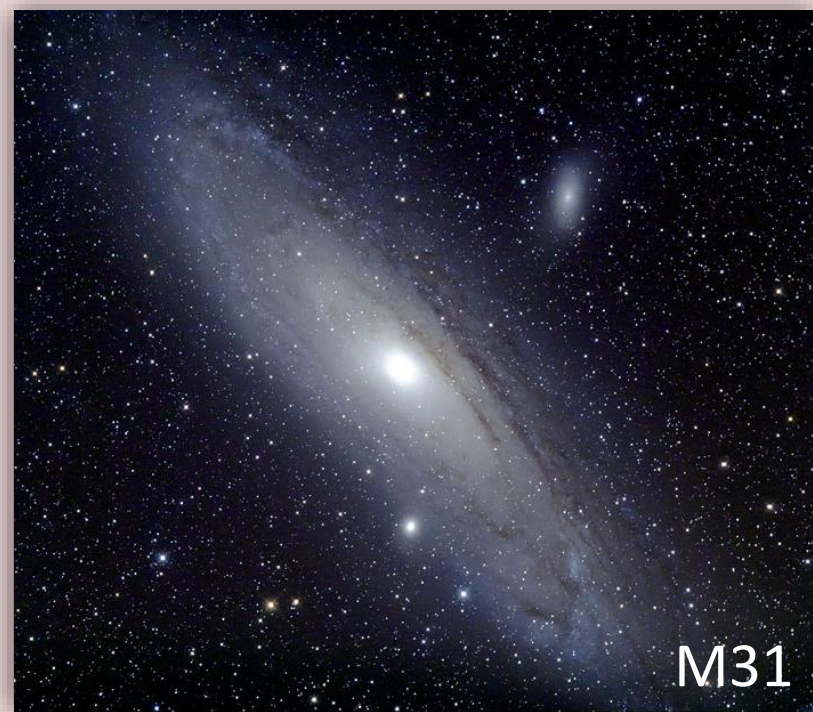
τ Cen wydaje się jaśniejsza od ω Cen, chociaż oba obiekty mają taką samą jasność, 3.9 mag.

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.

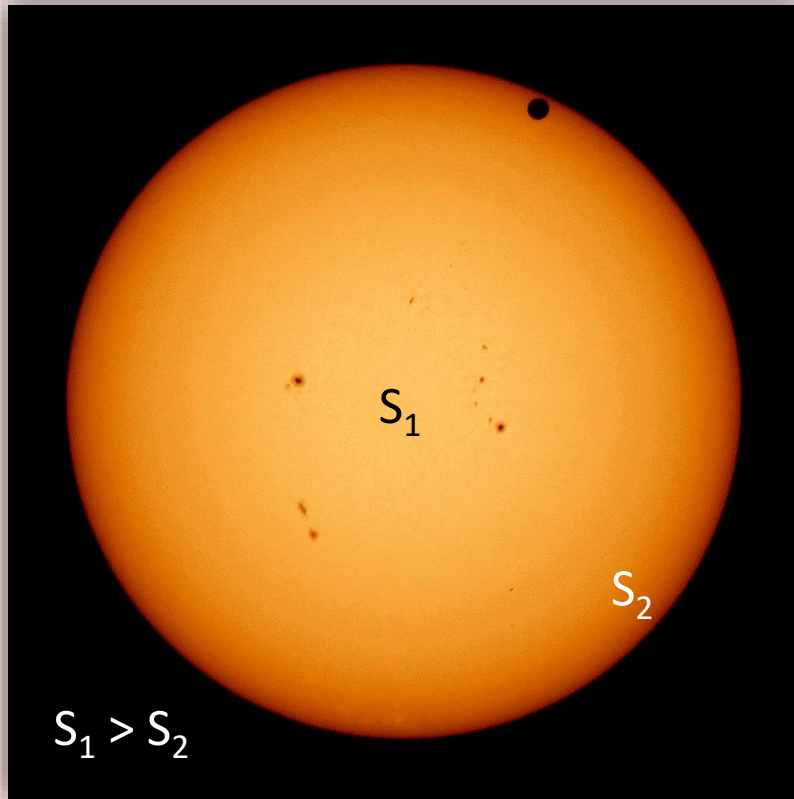
fotometria



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

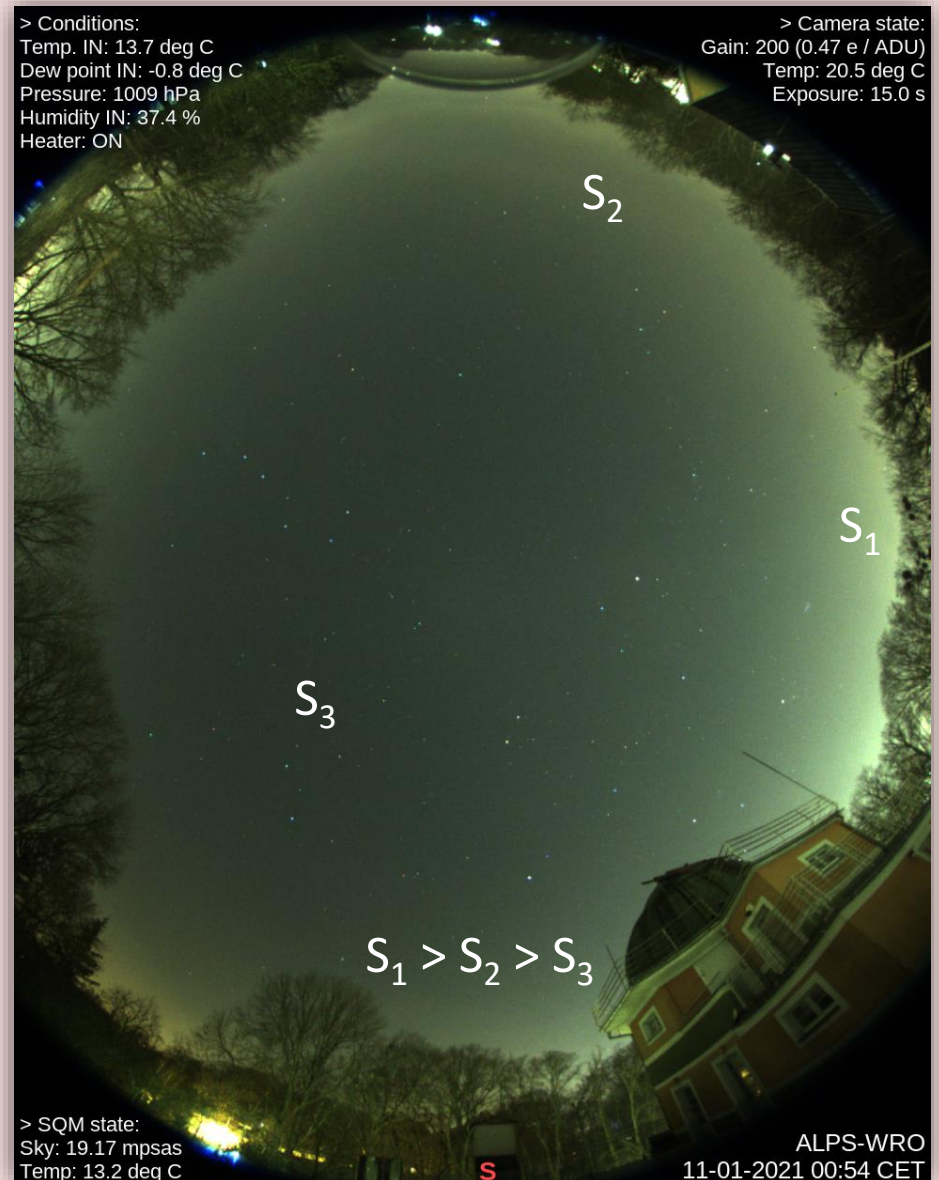
M13 i M31 mają na tyle dużą jasność powierzchniową, że są dość łatwo widoczne gołym okiem. M33 to obiekt bardzo trudny do zobaczenia gołym okiem ze względu na niską jasność powierzchniową.

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:

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



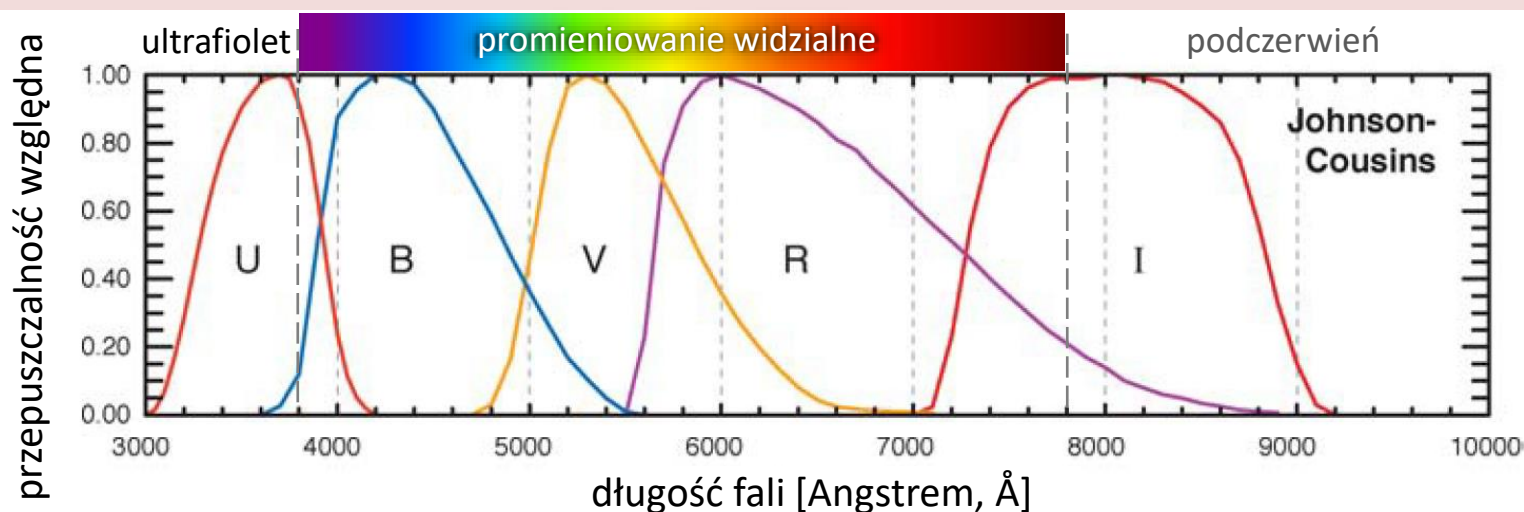
fotometria

- 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*