

1100-1BO15, rok akademicki 2018/19

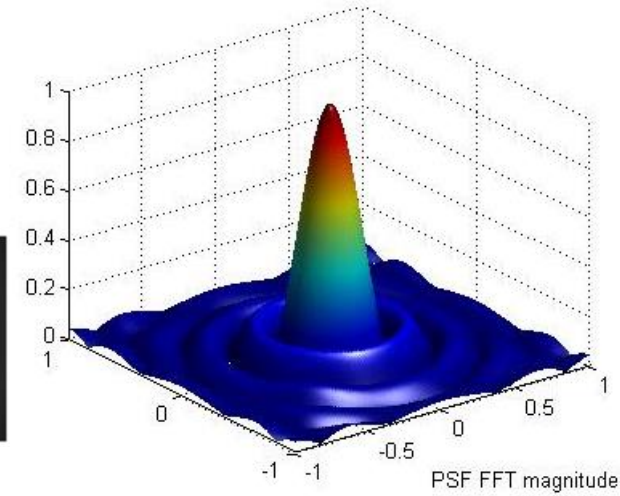
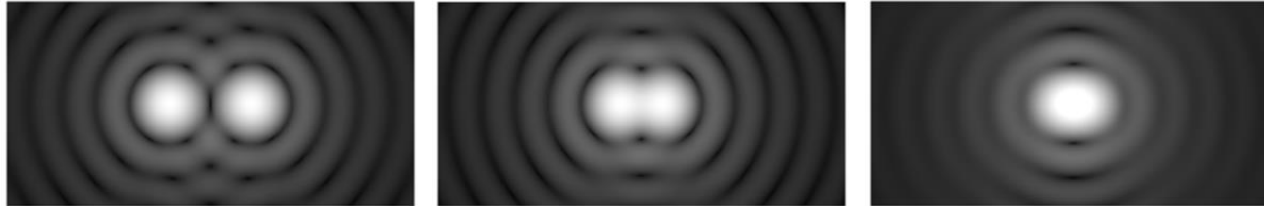
OPTYKA GEOMETRYCZNA I INSTRUMENTALNA

dr hab. Rafał Kasztelanic

Wykład 10

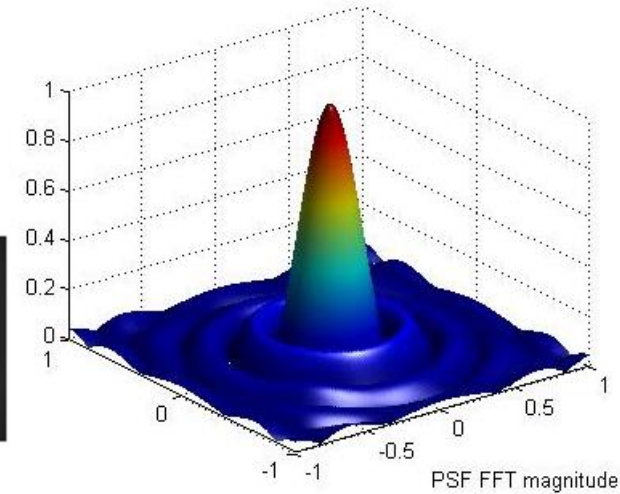
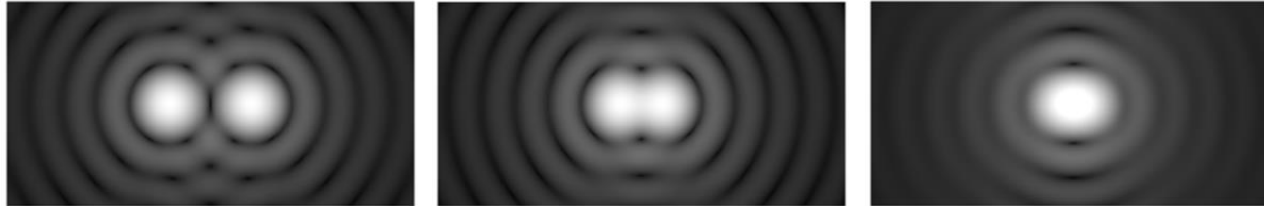
Układy idealne a rzeczywiste

- Wolna przestrzeń
 - Odpowiedź impulsowa układu
- Obraz punktowego źródła, plamka Airy, rozdzielczość



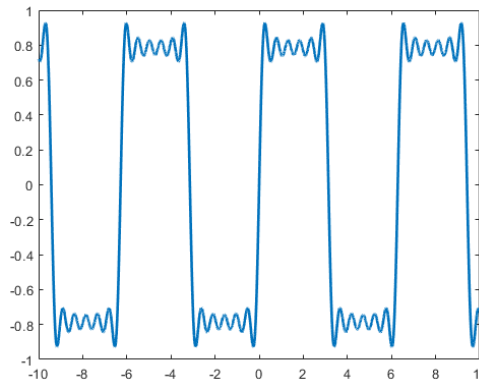
Układy idealne a rzeczywiste

- Wolna przestrzeń
 - Odpowiedź impulsowa układu
Obraz punktowego źródła, plamka Airy, rozdzielczość



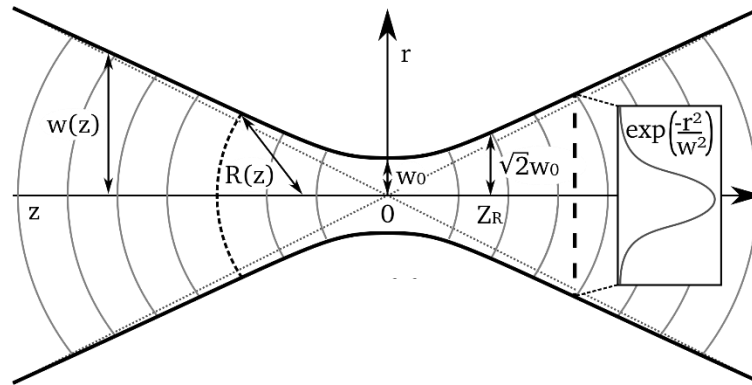
- Funkcja przenoszenia

Propagację fali monochromatycznej w przestrzeni możemy interpretować jako proces filtracji dolnoprzepustowej. Pasma przenoszenia równoważnego filtra jest ograniczone w płaszczyźnie częstości przestrzennym do koła o promieniu $1/\lambda$. Fale, których częstości są wewnątrz tego koła przenoszone są bez zniekształceń lecz z przesunięciem fazowym. Częstość z poza koła są tłumione i w odległości kilku λ nie są rejestrowane.



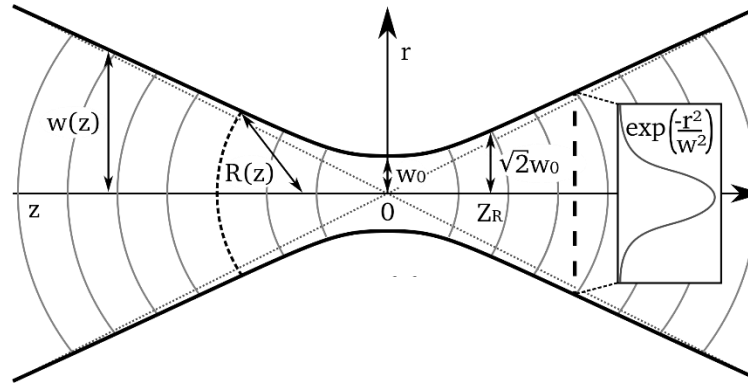
Układy idealne a rzeczywiste

- Wiązka Gaussowska



Układy idealne a rzeczywiste

- Wiązka Gaussowska



- Dyfrakcja, Interferencja

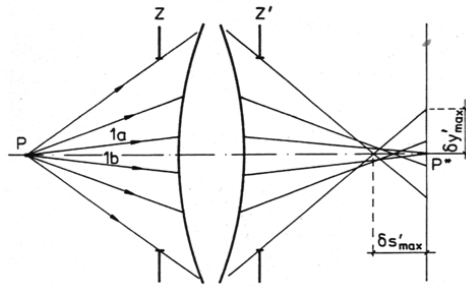
Apertury, krawędzie, zarysowania, kurz

- Rozpraszanie, odbicia, turbulencje atmosfery

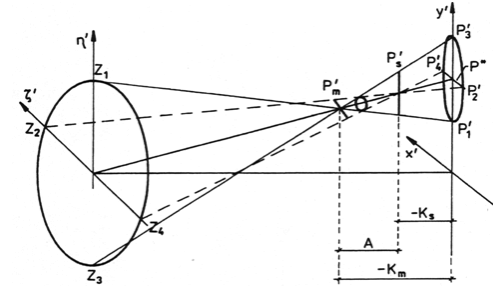
Układy idealne a rzeczywiste

- Aberracje

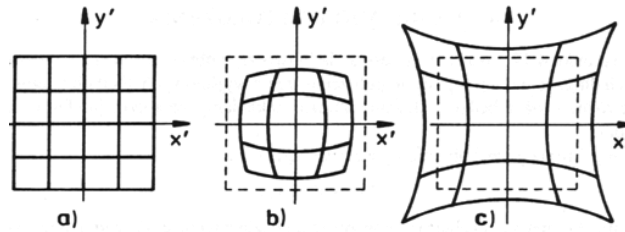
- Sferyczna



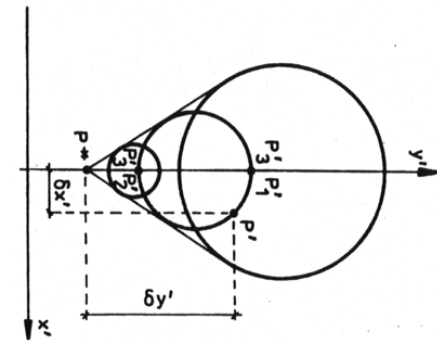
- Astygmatyzm



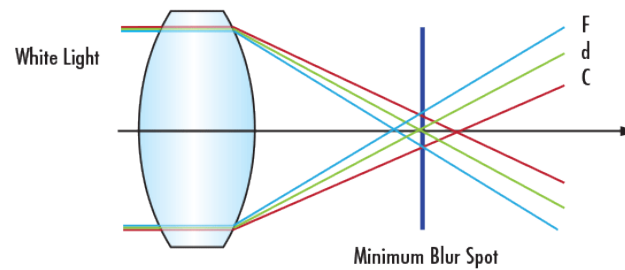
- Dystorsja



- Koma



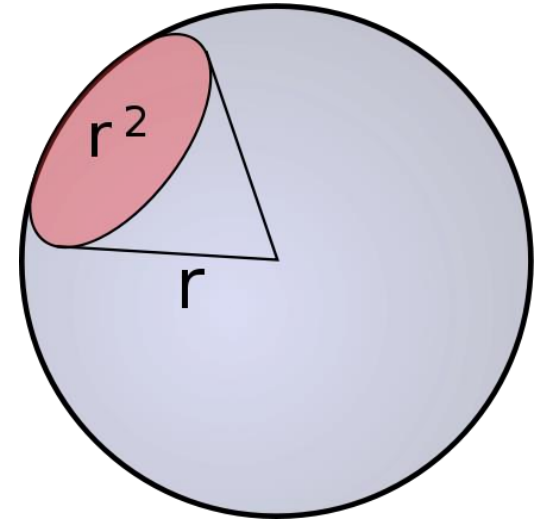
- Chromatyczna



- Fala elektromagnetyczna niesie ze sobą energię. Do opisu energii a także mocy promieniowania e-m można użyć jednostek: dżul i wat i ich pochodnych.
- Ze względu na to iż wzrok człowieka nie reaguje jednakowo na cały zakres widzialny (380 nm–760 nm), wprowadza się inne jednostki opisujące natężenie, czy strumień światła.
- Fotometrię zwykle dzieli się na *energetyczną* (obiektywną) i *wizualną* (subiektywną, czyli uwzględniającą czułość wzroku). Indeksami 'e' będziemy oznaczać wielkości obiektywne, zaś 'v' – subiektywne.
- Źródła światła są w rzeczywistości rozciągłe, ale często stosuje się przybliżenie źródła punktowego, które upraszcza definicje.
- Aby scharakteryzować źródło światła należy podać jego kształt przestrzenny („rozmieszczenie źródeł punktowych”), moc promieniowania, charakterystykę kątową rozchodzenia się energii oraz rozkład widmowy.
- Analiza fotometryczna na ogół bierze pod uwagę światło niekoherentne.

Kąt bryłowy:

- Część przestrzeni ograniczona przez półproste wychodzące z ustalonego punktu (zwanego wierzchołkiem kąta bryłowego), przechodzące przez ustaloną krzywą zamkniętą.
- Kąt bryłowy jest równy stosunkowi powierzchni S , którą ten kąt wycina z powierzchni kuli o promieniu r , do kwadratu promienia tej kuli.
- 1 steradian (sr) to kąt bryłowy wycinający z powierzchni kuli powierzchnię S równą kwadratowi promienia kuli r^2 .



$$\Omega = \frac{S}{r^2}$$

- Pełny kąt bryłowy wynosi 4π sr.

$$\Omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} \text{ sr} = 4\pi \text{ sr}$$

Widzenie fotopowe i skotopowe:

- Wielkości fotometryczne wizualne nie są wielkościami czysto fizycznymi. Są oceniane na podstawie wywoływanych wrażeń świetlnych.
- Czułość względna oka „normalnego” zależy od adaptacji oka do warunków oświetlenia.

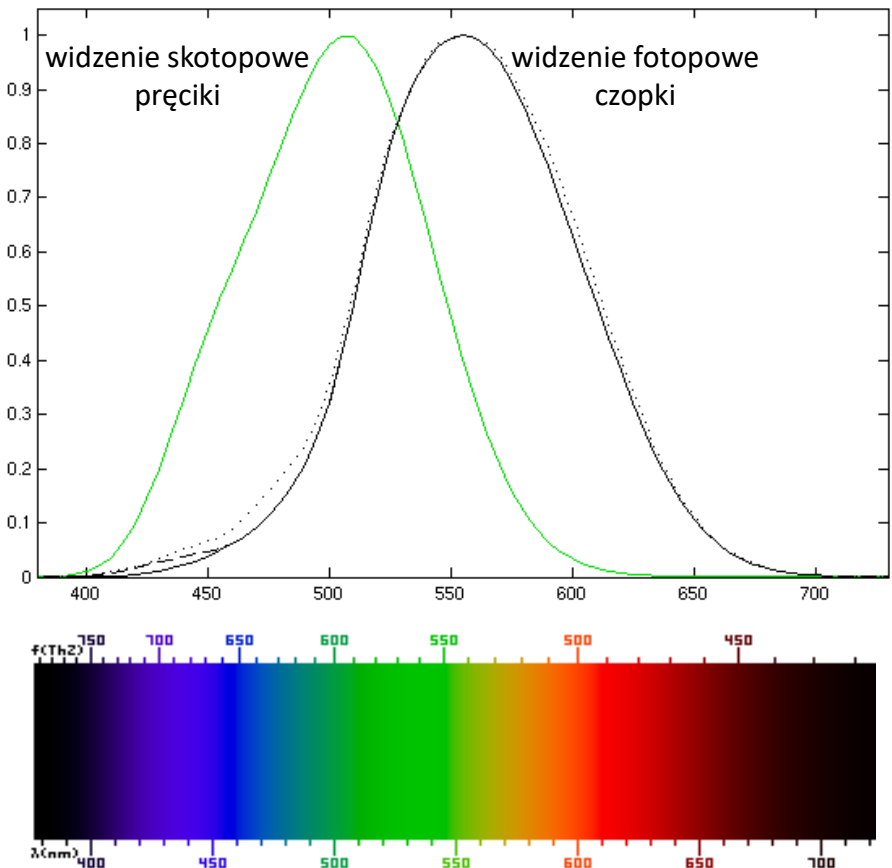
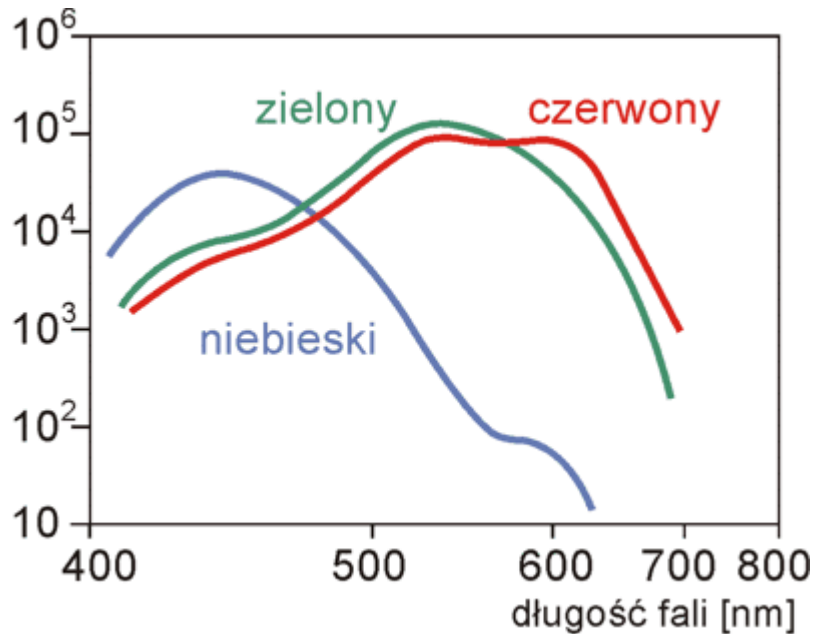
Przy dużej luminancji reagują **czopki** (wypełniające głównie środkową część siatkówki) – **widzenie fotopowe (dienne)**. Receptory te są czułe na barwę (występują w trzech „odmianach”).

Przy małej luminancji reagują **pręciki**, czułe jedynie na natężenie promieniowania – **widzenie skotopowe (nocne)**.

Przy przejściu od dużych do małych luminancji czynne są oba rodzaje receptorów – **widzenie mesopowe (mezopowe)**.

Czułość oka ludzkiego

- Krzywa określa sposób, w jaki oko ludzkie reaguje na światło widzialne o tym samym natężeniu (mierzonym w jednostkach radiometrycznych), ale różnej długości fali.



Prawo Webera-Fechnera

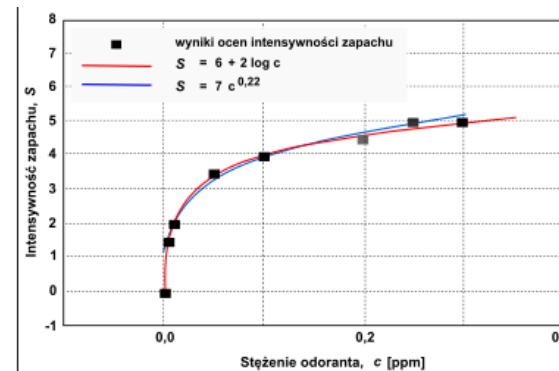
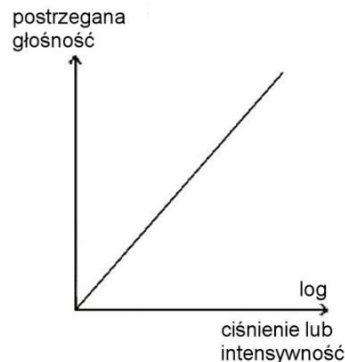
Siła wrażenia jest proporcjonalna do logarytmu bodźca.

$$w = k \cdot \ln \left[\frac{B}{B_0} \right]$$

- w – reakcja układu biologicznego (wrażenie zmysłowe)
- B – natężenie danego bodźca
- B_0 – wartość początkowa natężenia danego bodźca

Jest to prawo fenomenologiczne będące wynikiem wielu obserwacji praktycznych i znajdujące wiele zastosowań technicznych.

- Wykorzystywane m.in. w akustyce i fotometrii.



Prawo Stevensa

Prawo psychofizyczne, stanowiące że intensywność odczuwanego wrażenia zmysłowego jest wprost proporcjonalna do wielkości bodźca, podniesionej do potęgi α , która jest określana w drodze doświadczenia.

$$\psi(I) = kI^\alpha$$

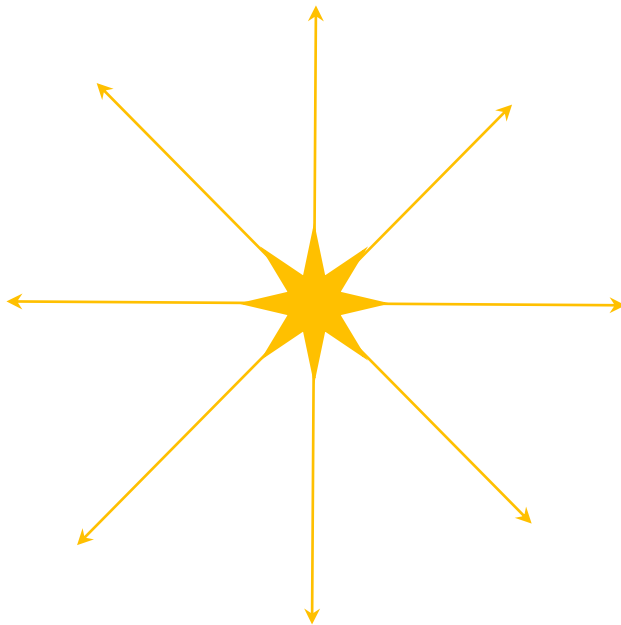
Prawo Stevensa

$$\psi(I) = kI^a$$

Continuum	a	Stimulus condition			
Loudness	0.67	Sound pressure of 3000 Hz tone	Warmth	1.6	Metal contact on arm
Vibration	0.95	Amplitude of 60 Hz on finger	Warmth	1.3	Irradiation of skin, small area
Vibration	0.6	Amplitude of 250 Hz on finger	Warmth	0.7	Irradiation of skin, large area
Brightness	0.33	5° target in dark	Discomfort, cold	1.7	Whole body irradiation
Brightness	0.5	Point source	Discomfort, warm	0.7	Whole body irradiation
Brightness	0.5	Brief flash	Thermal pain	1	Radiant heat on skin
Brightness	1	Point source briefly flashed	Tactual roughness	1.5	Rubbing emery cloths
Lightness	1.2	Reflectance of gray papers	Tactual hardness	0.8	Squeezing rubber
Visual length	1	Projected line	Finger span	1.3	Thickness of blocks
Visual area	0.7	Projected square	Pressure on palm	1.1	Static force on skin
Redness (saturation)	1.7	Red-gray mixture	Muscle force	1.7	Static contractions
Taste	1.3	Sucrose	Heaviness	1.45	Lifted weights
Taste	1.4	Salt	Viscosity	0.42	Stirring silicone fluids
Taste	0.8	Saccharin	Electric shock	3.5	Current through fingers
Smell	0.6	Heptane	Vocal effort	1.1	Vocal sound pressure
Cold	1	Metal contact on arm	Angular acceleration	1.4	5 s rotation
			Duration	1.1	White noise stimuli

Jednostki

Źródło



kandela, lumen, nit, wat, ...
(częściej kąt bryłowy)

Oświetlany obiekt



luks, wat, ...
(częściej jednostka powierzchni)

Kandela

- Kandela (cd, jednostka subiektywnego natężenia światła) – natężenie światła wypromieniowanego w kierunku normalnym przez $(1/60)$ cm² powierzchni ciała doskonale czarnego znajdującego się w temperaturze krzepnięcia platyny pod ciśnieniem 101352 N/m².
- Kandela (cd) jest to **światłość**, jaką ma w określonym kierunku źródło emitujące promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości $5,4 \times 10^{14}$ Hz i którego energetyczne natężenie promieniowania w tym kierunku wynosi 1/683 W/sr.
- Jedna kandela opisuje źródło światła o mocy zbliżonej do świecy woskowej.

Lumen

- Jednostka **strumienia świetlnego** Φ w układzie SI.
- Strumień świetlny Φ jest to stosunek energii promieniowania do czasu czyli ilość energii wyemitowanej przez źródło w jednostce czasu

$$\Phi = \frac{Q}{t}$$

- Jeden lumen definiuje się jako światłość jaką ma punktowe źródło światła, które emituje światło o natężeniu jednej kandeli w kąt bryłowy 1 steradiana.
- Izotropowe źródło światła o światłości jednej kandeli emituje strumień 4π lumenów.
- Przyjmuje się, że oko ludzkie najwyższą czułość osiąga dla światła o długości 555 nm. Jednemu lumenowi odpowiada wówczas promieniowanie o mocy 0,00147 W.

Lumen

- Każda żarówka, świetlówka LED itd. Im ma więcej lumenów tym daje więcej światła!
- Aby porównać dane źródła światła należy podzielić strumień świetlny przez moc, czyli określić tzw skuteczność świetlną wyrażoną w lumenach na wat.
- Dane oświetlenie jest bardziej wydajne i oszczędne im na wyższą skuteczność świetlną, czyli większą ilość lumenów na wat mocy.
- Teoretyczna skuteczność świetlna to 683 lm/W przy założeniu, że cała energia zamieniana jest na światło.
- Czyli sprawność można policzyć jako stosunek skuteczności świetlnej źródła do teoretycznej skuteczności świetlnej 683 lm/W .

Lumen

Skuteczności świetlne poszczególnych źródeł:

- świeczka 0.3 [lm/W]
- żarówka zwykła, 8-20 [lm/W]
- lampa rtęciowo-żarowa 17-25 [lm/W]
- żarówka halogenowa 20-30[lm/W]
- rtęciówka zwykła 30-65 [lm/W]
- świetlówka 40-90[lm/W]
- LED 40 – 90 max ponad 200[lm/W]
- rtęciówka halogenowa 75-100[lm/W]
- sodówka wysokoprężna 90-120 [lm/W]
- sodówka niskoprężna 80-180[lm/W]

Lumeny	Moc żarówki[Wat]
220-250	25
410-470	40
700-810	60
920-1060	75
1300-1530	100

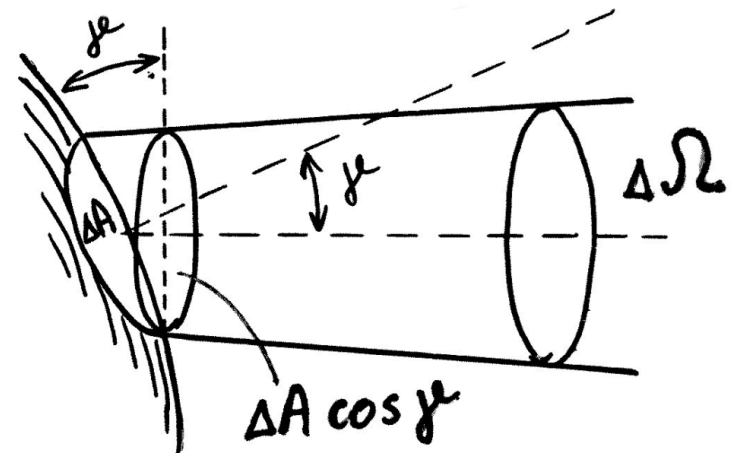
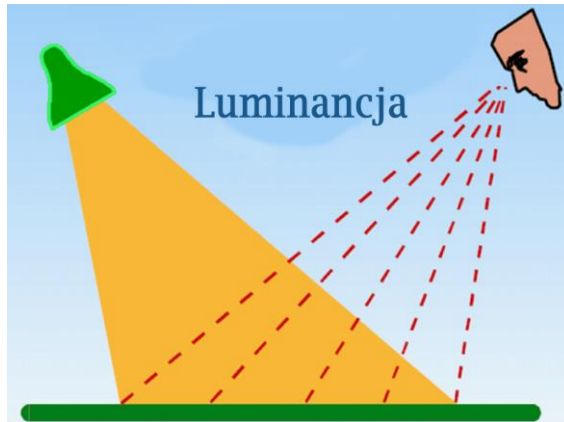
Sprawność:

- żarówka zwykła - 15 [lm/W] sprawność $15/683 = 2.2\%$
- zwykły halogen 25 [lm/W] sprawność $25/683 = 3.6\%$
- świetlówka 40-90[lm/W] sprawność $40-90 / 683$ 5.8% – 13%
- LED 40 – 90 [lm/W] sprawność $40-90 / 683$ 5.8% – 13%

Luminancja

- Wielkość wprowadzona do opisu źródeł rozciągłych, których różne fragmenty powierzchni świecącej w pewnym kierunku wykazują różną jasność.
- Luminancja L jest to stosunek natężenia źródła światła ΔI w tym kierunku pochodzącego z powierzchni ΔA , do powierzchni $\Delta A \cos \gamma$ rzutu elementu ΔA na płaszczyznę prostopadłą do danego kierunku.
- Jednostka luminancji jest nit (nt). Luminancja wynosi 1 nt, gdy każdy metr kwadratowy powierzchni źródła ma natężenie 1 cd (1 nt = 1 cd/m²).

$$L = \frac{\Delta I}{\Delta A \cos \gamma} = \frac{\Delta \phi}{\Delta \Omega \Delta A \cos \gamma}$$



Lux

Luks (lx) określany jest jako oświetlenie wywołane przez równomiernie rozłożony strumień świetlny o wartości równej 1 lumena (lm) padający na powierzchnię 1 m², a więc:

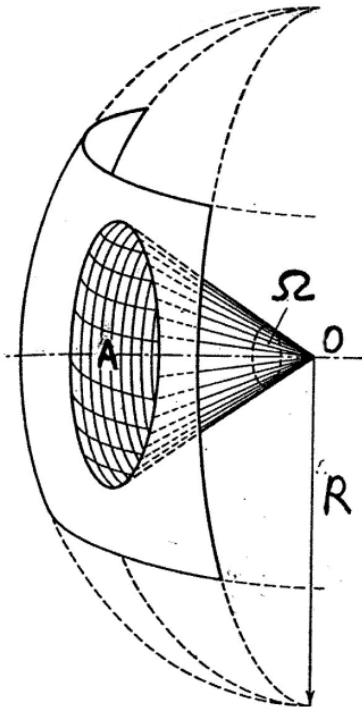
$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} / \text{m}^2$$



Lux

Luks (lx) określany jest jako oświetlenie wywołane przez równomiernie rozłożony strumień świetlny o wartości równej 1 lumena (lm) padający na powierzchnię 1 m², a więc:

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} / \text{m}^2$$



Jeśli w odległości 1 m od izotropowego punktowego źródła światła o natężeniu 1 cd ustawimy wklęsłą powłokę kulistą o polu powierzchni 1 m² tak, że promienie światła padają prostopadłe do powierzchni (powierzchnia ta określa kąt bryłowy 1 sr), a oświetlenie powierzchni jest równomierne i wynosi 1 lx, wtedy strumień świetlny padający na tę powierzchnię wynosi 1 lm.

Lux

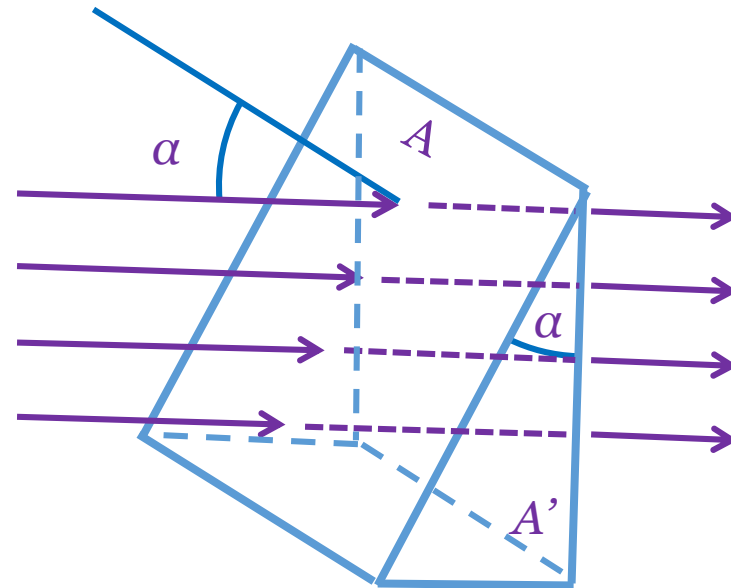
Illuminance	Example
10^{-5} lux	Light from Sirius , the brightest star in the night sky ^[2]
10^{-4} lux	Total starlight , overcast sky ^[2]
0.002 lux	Moonless clear night sky with airglow ^[2]
0.01 lux	Quarter moon
0.27 lux	Full moon on a clear night ^{[2][3]}
1 lux	Full moon overhead at tropical latitudes ^[4]
3.4 lux	Dark limit of civil twilight under a clear sky ^[5]
50 lux	Family living room ^[6]
80 lux	Hallway/toilet ^[7]
100 lux	Very dark overcast day ^[2]
320–500 lux	Office lighting ^{[8][9][10]}
400 lux	Sunrise or sunset on a clear day.
1,000 lux	Overcast day ^[2] ; typical TV studio lighting
10,000–25,000 lux	Full daylight (not direct sun) ^[2]
32,000–130,000 lux	Direct sunlight

Lux a BHP

- Oświetlenie – poziom i natężenie oświetlenia reguluje Polska Norma (PN-84/E-02033): „Oświetlenie wnętrz światłem elektrycznym”.
- Zalecenia międzynarodowe dla oświetlenia stanowisk komputerowych są uregulowane w normie ISO 924 oraz ISO 8995.
- Najkorzystniejszym jest oświetlenie w przedziale od 300 lx do 700 lx, o równomierności oświetlenia $> 0,65$. *Ciekawostka: Podaje się czasem, że bardzo ważnym jest, aby na klawiaturze komputera średnie natężenie oświetlenia wynosiło 500 lx.*

Oświetlenie a nachylenie powierzchni

- Niech równoległa wiązka światła pada pod kątem α na powierzchnię A . Powierzchnia A' jest rzutem powierzchni A na płaszczyznę prostopadłą do kierunku padania wiązki światła, przy czym $A' = A \cos\alpha$.
- Wynika stąd, że $E = E_0 \cos\alpha$.



Parametry charakteryzujące źródło światła

- Emitancja:

$$M_e = \frac{\Delta\Phi_e}{\Delta S} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad M_v = \frac{\Delta\Phi_v}{\Delta S} \left[\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right]$$

- Luminancja:

$$L_e = \frac{\Delta I_e}{\Delta S \cos \Theta} = \frac{\Delta\Phi_e}{\Delta\Omega \Delta S \cos \Theta} \left[\frac{\text{W}}{\text{sr} \cdot \text{m}^2} \right]$$

$$L_v = \frac{\Delta I_v}{\Delta S \cos \Theta} = \frac{\Delta\Phi_v}{\Delta\Omega \Delta S \cos \Theta} \left[\frac{\text{lm}}{\text{sr} \cdot \text{m}^2} = \text{nt} \right]$$

Indeks 'e' – wielkości obiektywne,

Indeks 'v' – wielkości subiektywne.

Parametry charakteryzujące przedmioty oświetlane

- Natężenie napromieniowania:

$$E_e = \frac{\Delta\Phi_e}{\Delta S} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

- Natężenie oświetlenia (egzystancja):

$$E_v = \frac{\Delta\Phi_v}{\Delta S} \left[\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = \text{lx} \right]$$

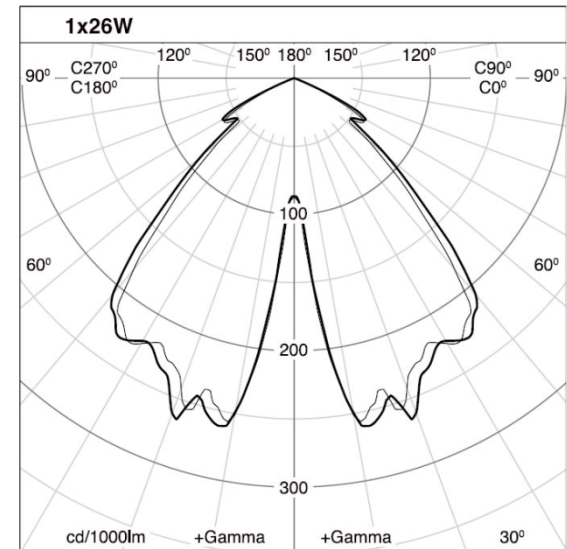
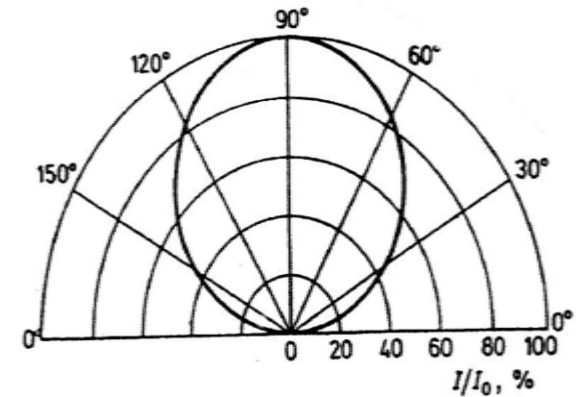
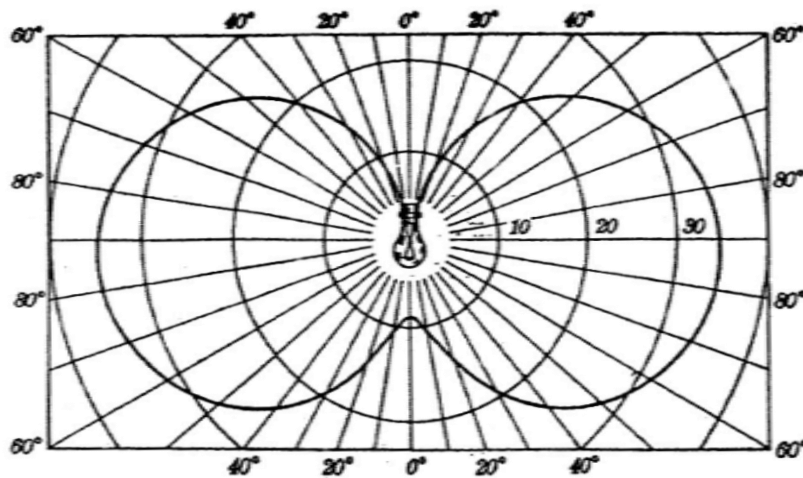
Indeks 'e' – wielkości obiektywne,

Indeks 'v' – wielkości subiektywne.

Kątowy rozkład strumienia

Jeśli źródło światła można uważać za punktowe, to można je charakteryzować kątowym rozkładem strumienia energetycznego w przestrzeni.

$$I_e \equiv \frac{d\Phi_e}{d\omega} \left[\frac{\text{W}}{\text{sr}} \right]$$



Kątowy rozkład strumienia – źródło Lambertowskie

- Natężenie źródła w pewnym kierunku jest proporcjonalne do kosinusa kąta, który tworzy z normalną do powierzchni świecącej prosta wyznaczająca wyróżniony kierunek.
- Dla źródła Lambertowskiego luminancja jest jednakowa we wszystkich kierunkach
- Przyjęcie tego warunku upraszcza obliczenia i jest powszechnie stosowane (takie źródło nie istnieje w rzeczywistości).
- Pojęcie to jest także stosowane w odniesieniu do powierzchni (jako odbicie).

