Źródła i detektory

prof. dr hab. Ewa Popko
ewa.popko@pwr.edu.pl
www.if.pwr.wroc.pl/~popko

Wy1	Podział widma promieniowania e.m., prawo Lamberta, prawa promieniowania ciała doskonale czarnego i ciał rzeczywistych. Termiczne źródła promieniowania.	3
Wy2	Termiczne i nietermiczne źródła promieniowania.	3
Wy3	Złącze p-n. LED i laser półprzewodnikowy	3
Wy4	Klasyfikacja detektorów promieniowania e.m; kryteria oceny, parametry. Detektory termiczne.	3
Wy5	Detektory fotonowe.	3
	Test zaliczeniowy	
	Suma godzin	15

LITERATURA PODSTAWOWA:

[1] Materiały do wykładu i laboratorium (wstępy teoretyczne oraz instrukcje robocze) , dostępne poprzez internet : www.if.pwr.wroc.pl\~popko
[2] E.Płaczek-Popko, „Fizyka odnawialnych źródeł energii" Skrypt DBC
[3] J.Piotrowski i in. „Półprzewodnikowe detektory podczerwieni" WNT (1985).
[4] J.Hennel „Podstawy elektroniki półprzewodnikowej" WNT Warszawa 1995.
[5]W.Domtroder „Spektroskopia laserowa" PWN (1993)

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA:

[1] Liczne publikacje nt. detektorów promieniowania, katalogi producentów źródeł promieniowania i detektorów (np. Hamamatsu).
[2] R.Nowicki, "Pomiary energii promienistej",WNT (1969).
[3] S.M.Sze „Physics of Semiconductor Devices" J.Wiley and Sons, NY 1981, dostępna wersja elektroniczna, e-książki, BG P.Wr.

OPIEKUN PRZEDMIOTU (IMIĘ, NAZWISKO, ADRES E-MAIL)

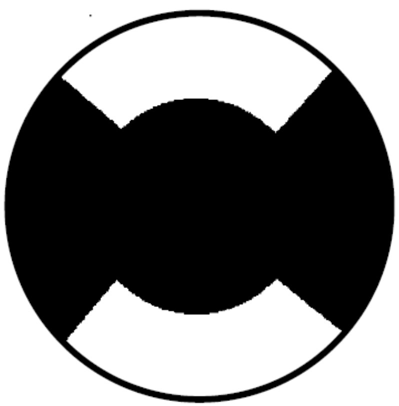
Ewa Popko ewa.popko@pwr.edu.pl

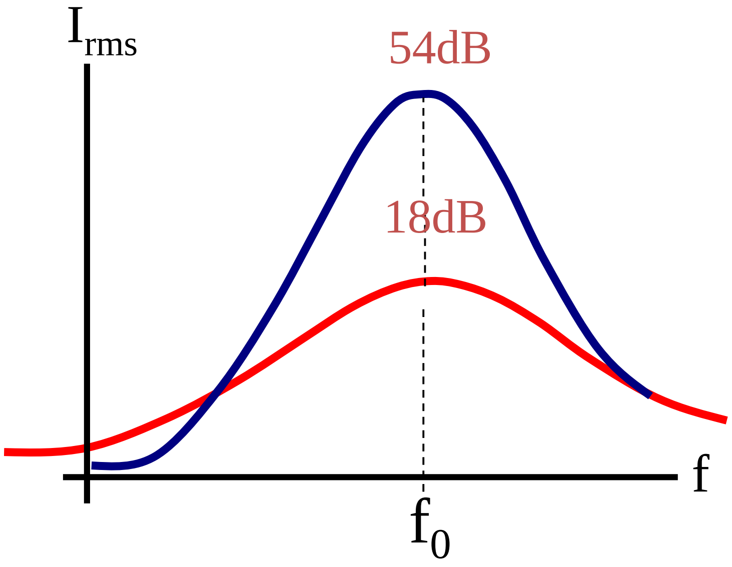
Wykład I

Miernik analogowy

Nanowoltomierz selektywny

Nanowoltomierz selektywny posiada na wejściu obwód rezonansowy, który należy dostroić do częstości modulatora.
Octave selectivty - czułość na oktawę. Ustawić na 54dB



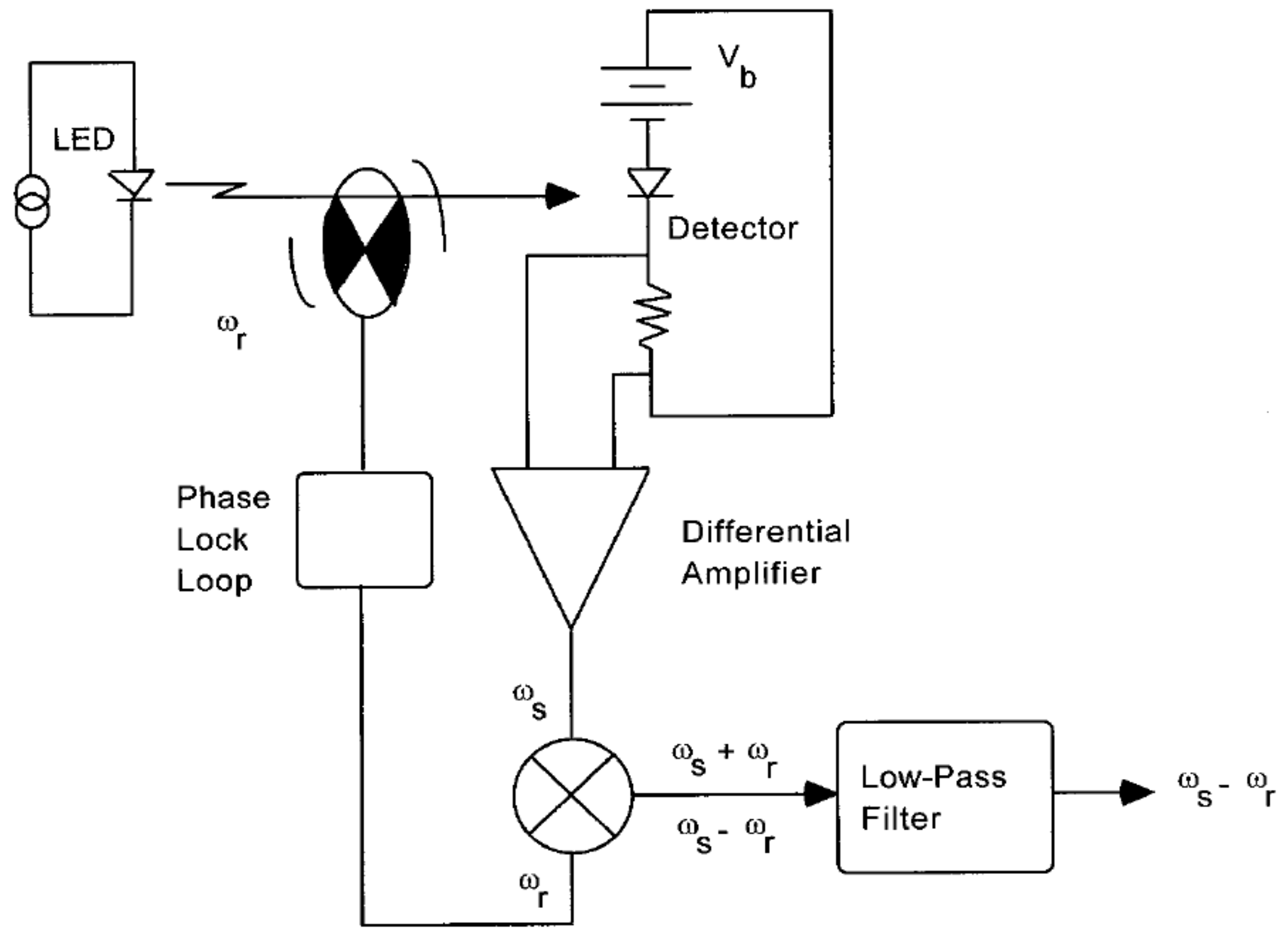


Tarcza modulatora. Wiązka światła jest w czasie T/4 odsłaniana i w takim samym czasie przysłaniana. Częstość modulacji zależy od częstości obrotów silnika i liczby skrzydełek wiatraczka.
Dla 2 skrzydełek, f $= 2f_{silnika}$.

Nanowoltomierz selektywny

SENSITIVITY – czułość (zakres pomiarowy) – przed włączeniem ustawić na 100mV
FREQUENCY RANGE – zakres częstości. Wybrać taki, w którym mieści się częstość modulatora
OCTAVE SELECTIVITY– selektywność. Ustawić na 54dB.
TIME CONSTANT– stała czasowa. Ustawić wyjściowo na „low”.
FREQUENCY – częstość. Ustawić pokrętło tak, aby częstość była równa częstości modulatora.
INPUT – wejście, do którego podłączamy bezpośrednio wyjście z detektora.
PREAMPLIFIER POWER SUPPLY – wejście, do którego podłączamy przedwzmacniacz, jeśli wyjście z detektora podłączamy do przedwzmacniacza.

Pomiar charakterystyk widmowych źródeł promieniowania i fotodetektorów przy pomocy detektora fazoczułego lock-in (nanowoltomierz homodynowy)



Nanowoltomierz lock-in

Nanowoltomierz typu lock-in służy do pomiarów słabych sygnałów periodycznych.
Dlaczego nie wystarczy wzmacniacz AC?

Przykład.
Niech $V_{sig} = 10nV\ i\ f = 10kHz$**. Szum dobrego wzmacniacza tj.** $5nV/\sqrt{Hz}$**. Jeśli pasmo przenoszenia wzmacniacza jest 100kHz a wzmocnienie 1000 to sygnał wyjściowy będzie równy** $10\mu V$**. Tymczasem szum będzie równy:**
$5nV/\sqrt{Hz} \cdot \sqrt{100kHz} \cdot 1000 = 1.6mV$**!**

Wzmacniacz z detektorem fazoczułym (PSD) może wzmacniać sygnał przy 10kHz przy szerokości pasma przenoszenia 0,01Hz. Stąd szum będzie równy jedynie $0,5\mu V$.

lock-in

DC ZERO – przycisk włączony przed włączeniem POWER miernika.
RECOVER SIGNAL – przycisk włączony podczas pomiaru.
SENSITIVITY – czułość (zakres pomiarowy) – przed włączeniem ustawić na 30mV
BAND PASS FILTER– zakres częstości. Wybrać taki, w którym mieści się częstość modulatora
TIME CONSTANT– stała czasowa. Ustawić wyjściowo na 0,3s.
PHASE SHIFT – przesunięcie fazowe; regulujemy tak aby sygnał był maksymalny, używając przycisków 0° lub 90° a następnie pokrętła CONTINUOUS (zmiana ciągła)
SIGNAL – wejście, do którego podłączamy bezpośrednio wyjście z detektora
PREAMPLIFIER POWER SUPPLY – wejście, do którego podłączamy przedwzmacniacz
REFERENCE – wejście sygnału referencyjnego (wyjście z modulatora).

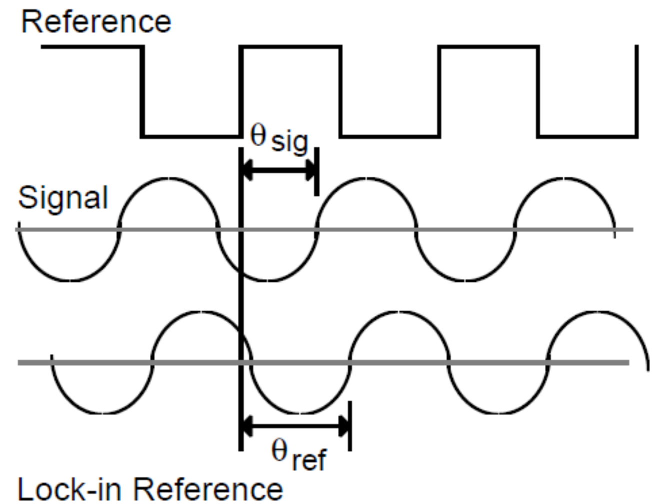
Lock-in

Sygnał mierzony:

$$V_{sig}\sin(\omega_r t + \theta_{sig})$$

Sygnał referencyjny:

$$V_L\sin(\omega_L t + \theta_{ref})$$



Sygnał na wyjściu lock-in'a:

$\sin\alpha\sin\beta = 1/2[\cos(\alpha-\beta)-\cos(\alpha+\beta)]$

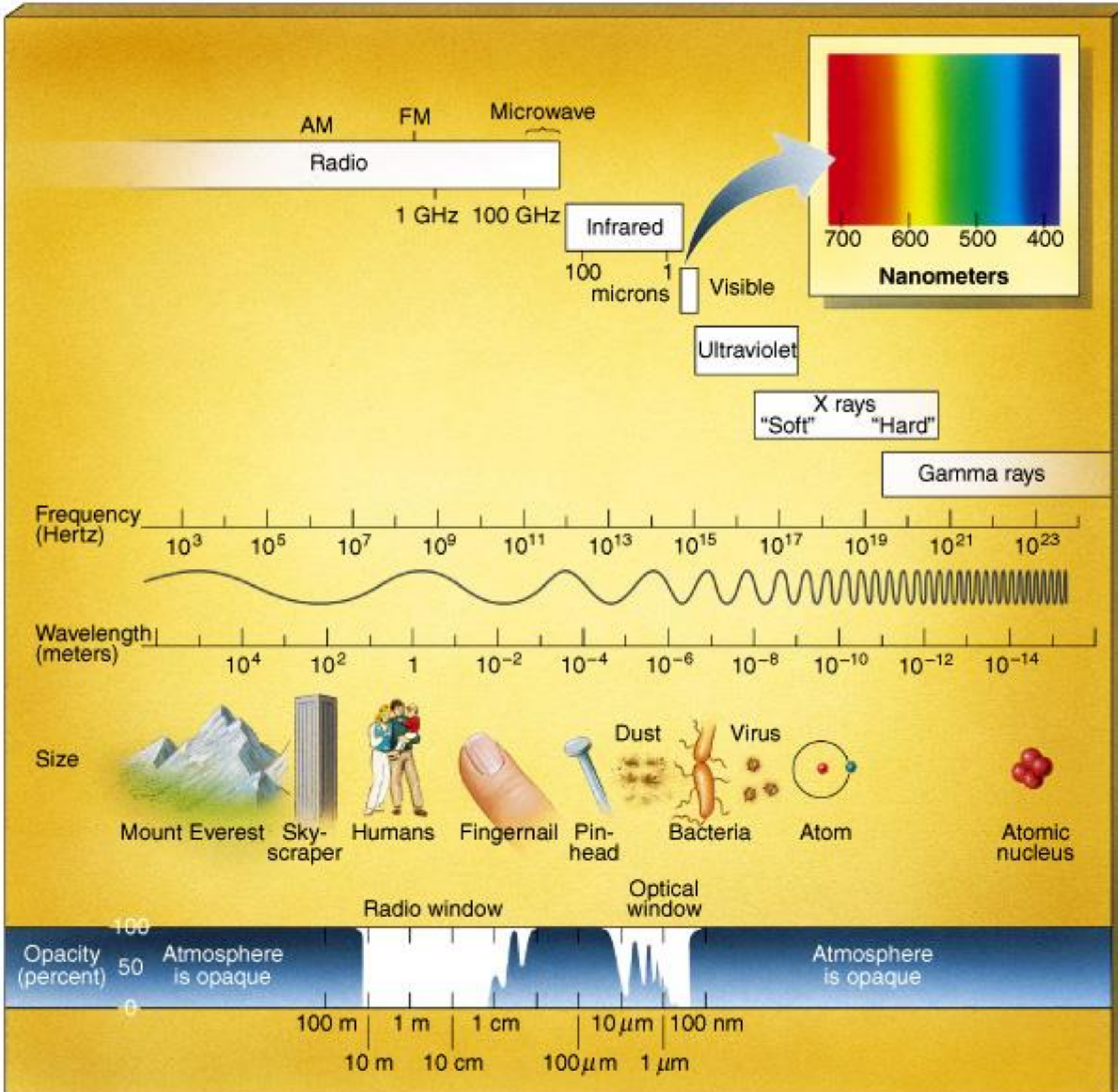
$$V_{psd} = V_{sig}V_L\sin(\omega_r t + \theta_{sig})\sin(\omega_L t + \theta_{ref})$$

$$= 1/2\, V_{sig}V_L\cos([\omega_r - \omega_L]t + \theta_{sig} - \theta_{ref}) - 1/2\, V_{sig}V_L\cos([\omega_r + \omega_L]t + \theta_{sig} + \theta_{ref})$$

Filtr dolnoprzepustowy eliminuje sygnał przemienny. Wtedy $V_{psd} = 0$.
Dla $\omega_r = \omega_L$ sygnał na wyjściu jest stały i największy dla różnicy faz równej zero. Ustalamy położenie pokrętła PHASE SHIFT (przesunięcie fazowe), aby sygnał był jak największy.

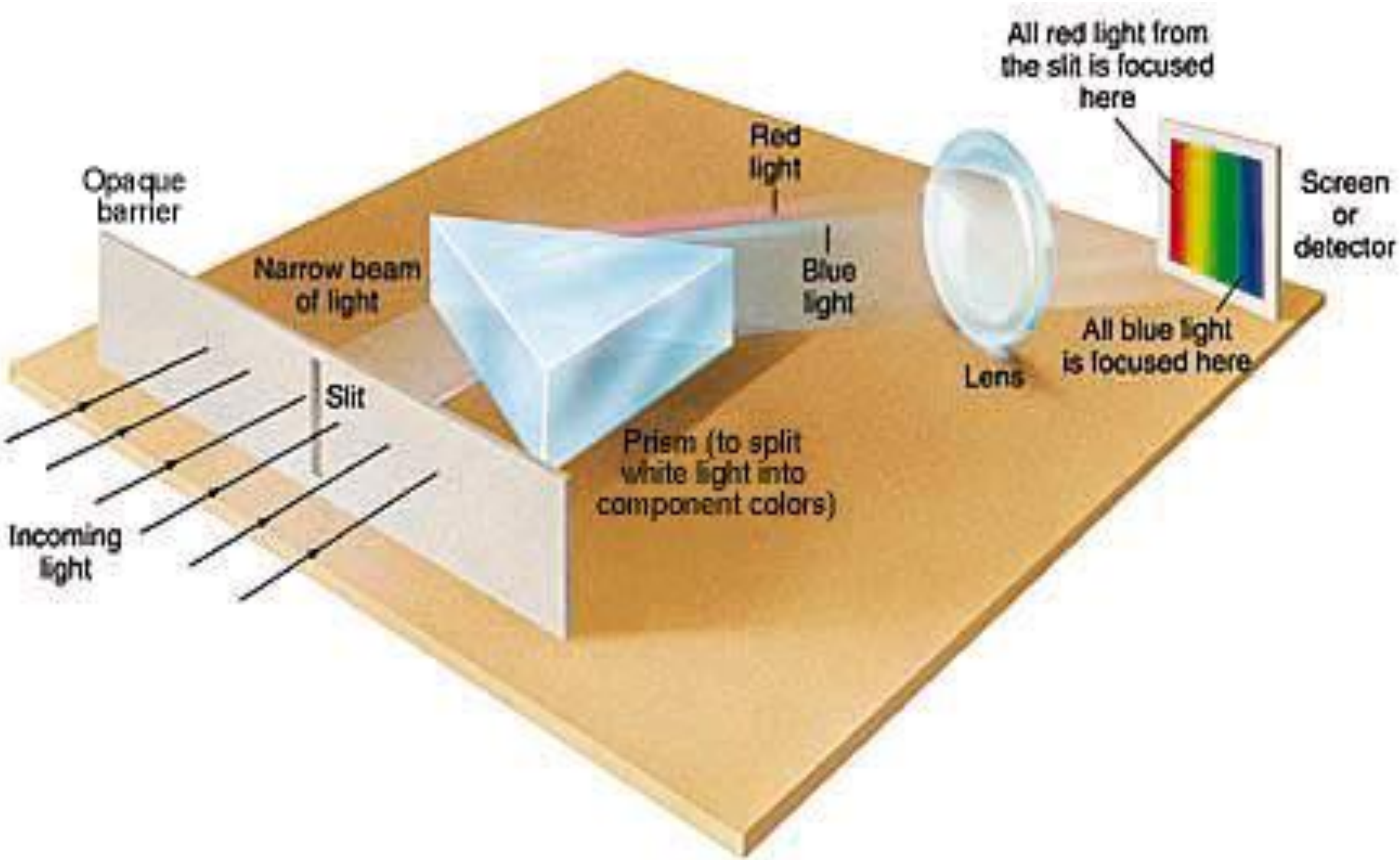
$$V_{psd} = 1/2\, V_{sig}V_L\cos(\theta_{sig} - \theta_{ref})$$

Ustalamy położenie pokrętła PHASE SHIFT (przesunięcie fazowe), aby sygnał był jak największy.



AM
FM
Microwave
Radio
1 GHz
100 GHz
Infrared
100
1
microns
Visible
700
600
500
400
Nanometers
Ultraviolet
X rays
"Soft"
"Hard"
Gamma rays
Frequency (Hertz)
10^3 10^5 10^7 10^9 10^{11} 10^{13} 10^{15} 10^{17} 10^{19} 10^{21} 10^{23}
Wavelength (meters)
10^4 10^2 1 10^{-2} 10^{-4} 10^{-6} 10^{-8} 10^{-10} 10^{-12} 10^{-14}
Size
Mount Everest
Sky-scraper
Humans
Fingernail
Pin-head
Dust
Bacteria
Virus
Atom
Atomic nucleus
Radio window
Optical window
Opacity (percent)
100
50
0
Atmosphere is opaque
Atmosphere is opaque
100 m
10 m
1 m
10 cm
1 cm
100 µm
10 µm
1 µm
100 nm

Spektroskop



Jednostki fotometryczne i energetyczne promieniowania elektromagnetycznego

1.Energia promienista - emitowana lub padająca na powierzchnię	[J]	1.Ilość światła	[lm s]
2. Moc promienista (strumień) - energia promieniowana emitowana lub padająca na powierzchnię w jednostce czasu	[W]	2. Strumień świetlny	[lm]
3. Natężenie promieniowania źródła światła (światłość) -strumień promieniowania emitowany ze źródła do jednostkowego kąta bryłowego	[W/sr]	3. Światłość	[cd] = [lm/sr]
4. Emitancja promieniowania (całkowita zdolność emisyjna) – Strumień promieniowania emitowany przez jednostkę powierzchni źródła	[W/m^2]	4. Emitancja świetlna	[lm/m^2]
5. Luminancja promieniowania (jaskrawość) - strumień promieniowania emitowany przez jednostkę powierzchni źródła do jednostkowego kąta bryłowego	[W/m^{2}sr]	5. Luminancja	[nt] = [cd/m^2]
6. Natężenie napromieniowania - strumień promieniowania padającego na jednostkę powierzchni	[W/m^2]	6. Natężenie oświetlenia	[lux] [lm/m^2]
7. Gęstość energii promieniowania	[J/m^3]		

Skuteczność świetlna źródła promieniowania

- Liczba lumenów na wat promieniowania określana jest jako skuteczność świetlna danego źródła
  - Żarówka wolframowa 10 lm/W
    - 60 W => 600 lm
  - Świetlówka 40 lm/W
    - 15 W => 600 lm
  - Dioda LED 75 lm/W
    - 8 W => 600 lm
  - Światło słoneczne 95 lm/W

Światłość

- Światłość zwykłej świecy woskowej wynosi ok. 1 cd, stąd nazwa tej jednostki
- Typowe światła na skrzyżowaniu charakteryzuje w kierunku kierowców światłość 200-600 cd
- Światła samochodowe w centrum wiązki wytwarzają Światlość 20 000 cd
- Światłość latarni morskiej sięga milionów kandeli

Gęstość widmowa

<u>Gęstość widmowa</u> jest zdefiniowana jako ilość strumienia, energii, luminancji etc., zawarta w jednostkowym przedziale częstości dν = 1Hz (lub długości fali dλ) wokół częstości ν.

Np. całkowita zdolność emisyjna M i odpowiadająca jej gęstość widmowa M_n wiążą się ze sobą następująco:

$$M = \int_0^\infty M_\nu \, d\nu$$

$$\boldsymbol{M_\nu = \frac{\partial M}{\partial \nu}}$$

Fotony

Liczba fotonów o energii hc/λ emitowanych przez źródło o mocy P_λ [W/m] w jednostce czasu (ang. *spectral photon flow*):

$$\boldsymbol{\Psi_{ph,\lambda} = \frac{P_\lambda}{\frac{hc}{\lambda}}} \qquad [s^{-1}m^{-1}]$$

Całkowita liczba fotonów emitowanych przez źródło o mocy *P* w jednostce czasu

$$\boldsymbol{\Psi_{ph} = \int_0^\infty \Psi_{ph,\lambda} d\lambda} \qquad [s^{-1}]$$

Spektralny strumień fotonów (ang. *spectral photon flux*)

$$\boldsymbol{\Phi_{ph,\lambda} = \frac{\partial^2 \Psi_{ph,\lambda}}{\partial A}} \qquad [s^{-1}m^{-1}m^{-2}]$$

Całkowity strumień fotonów (ang. *photon flux*)

$$\boldsymbol{\Phi_{ph} = \int_0^\infty \Phi_{ph,\lambda} d\lambda} \qquad [s^{-1}m^{-2}]$$

Natężenie napromieniowania i emitancja

- Natężenie napromieniowania (ang. *irradiance*) całkowite i spektralne: moc promieniowania <u>padającego</u> na jednostkę powierzchni

$$I_e = \frac{\partial^2 P}{\partial A} \quad [\frac{W}{m^2}] \qquad I_{e,\lambda} = \frac{\partial I_e}{\partial \lambda} \quad [\frac{W}{m^2 \cdot m}] \qquad \mathrm{I}_e = \int_0^\infty \mathrm{I}_{e,\lambda} d\lambda \quad [\frac{W}{m^2}]$$

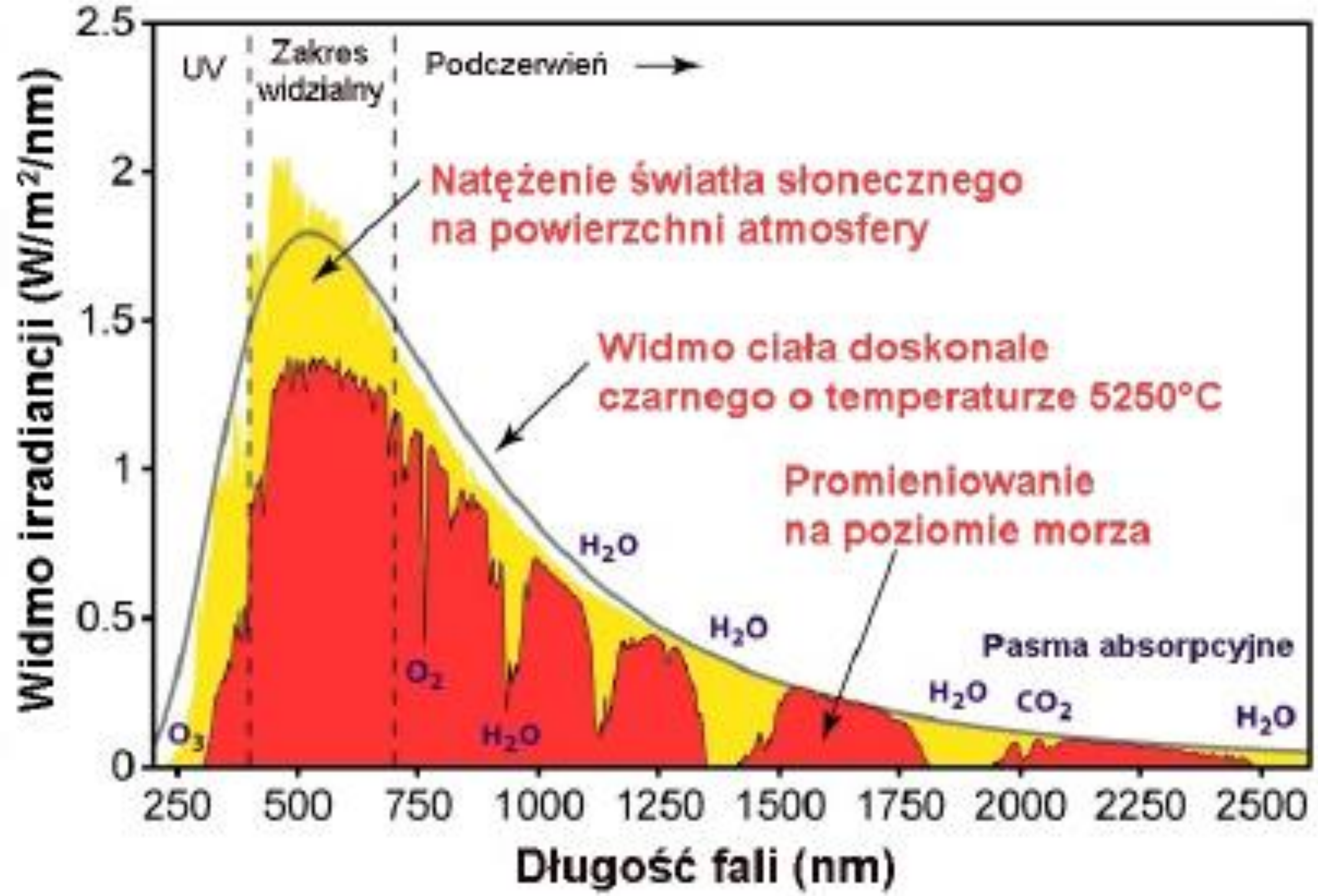
Ponieważ $\Psi_{ph,\lambda} = \frac{P_\lambda}{\frac{hc}{\lambda}}$, to

$$I_{e,\lambda} = \frac{\partial^2 P_\lambda}{\partial A} = \frac{\partial^2 \Psi_{ph,\lambda}}{\partial A} \frac{hc}{\lambda} = \boxed{\Phi_{ph,\lambda} \cdot \frac{hc}{\lambda} = I_{e,\lambda}}$$

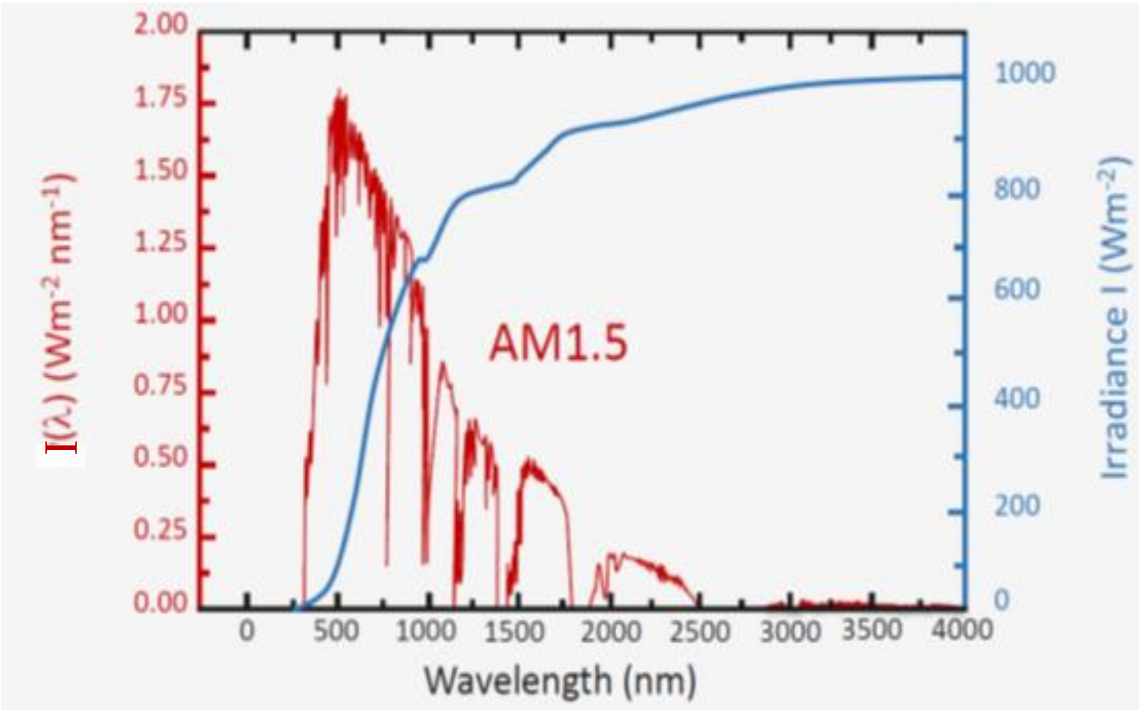
- Emitancja promieniowania (ang. *radiant emittance*): moc promieniowania <u>emitowanego</u> przez jednostkę powierzchni

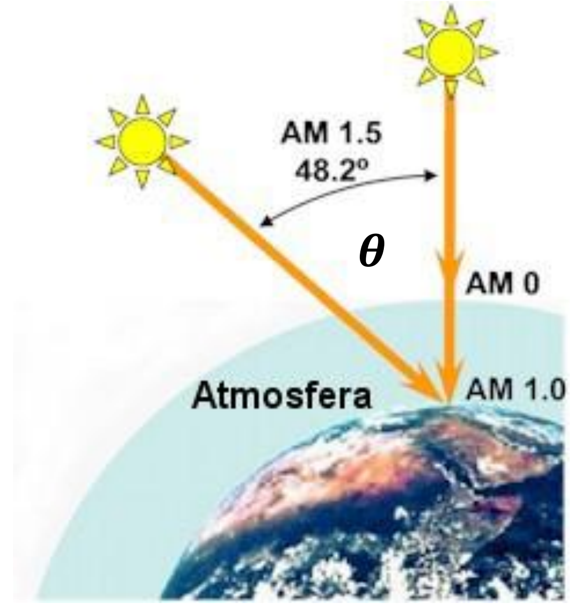
$$\mathrm{M}_e = \frac{\partial^2 P}{\partial A} \quad [\frac{W}{m^2}]$$

Widmo Słońca



Natężenie napromieniowania dla AM1.5





$$\boldsymbol{AMx = \frac{1}{cos\theta}}$$

Całkowite natężenie napromieniowania (irradiance):

$$I = \int I_{ph}(\lambda)\, d\lambda$$

AM – air mass

Jak zamienić widmo I(λ) na Φ(λ)?

- **Dzielimy widmowe natężenie napromieniowania przez odpowiadającą mu energię fotonu. Otrzymujemy rozkład widmowy strumienia fotonów.**

$$\boxed{\Phi_{ph,\lambda} = \frac{I_{e,\lambda}}{\frac{hc}{\lambda}}}$$

- **Całkujemy (sumujemy) po wszystkich długościach fali i otrzymujemy całkowity strumień fotonów.**

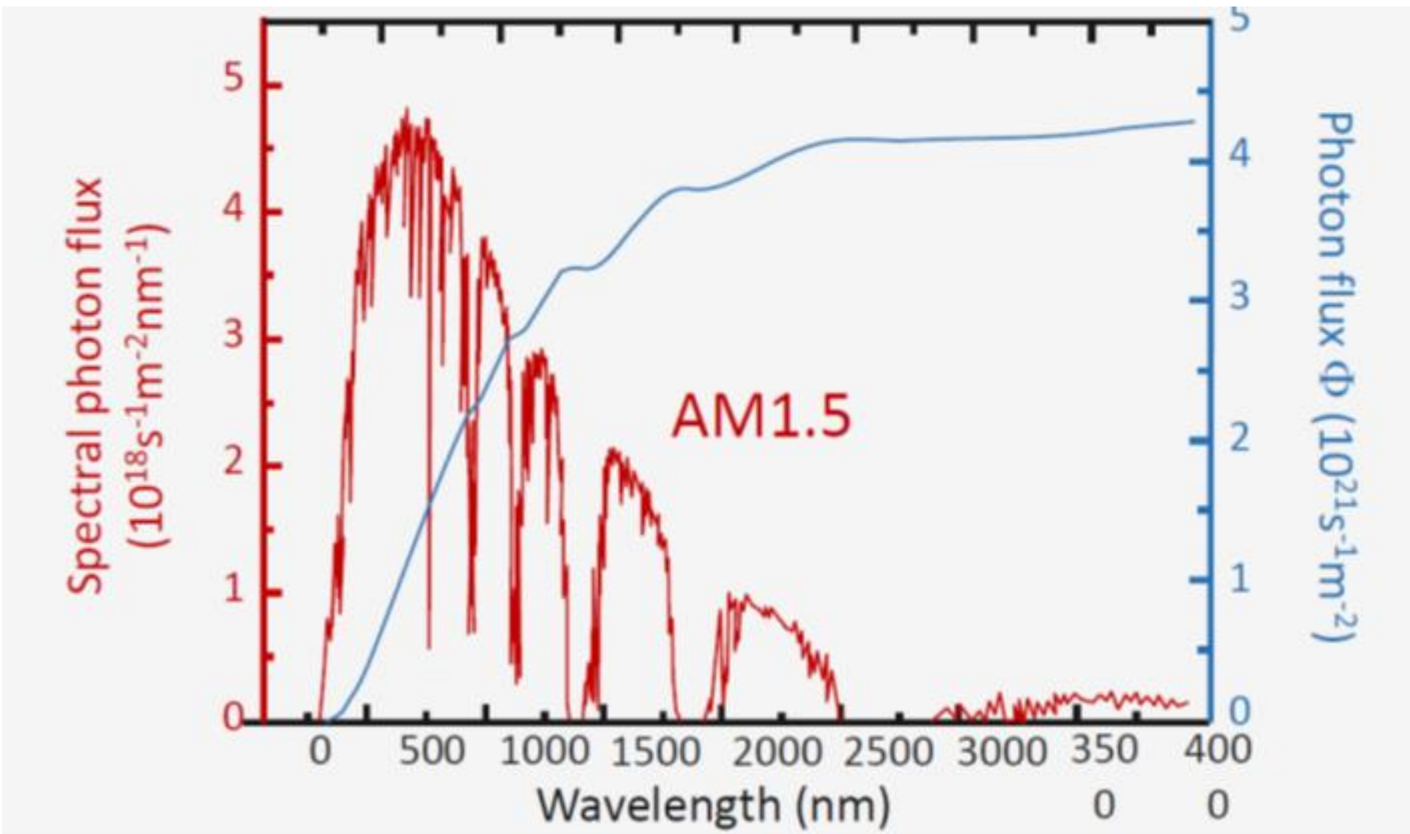
Widmowy i całkowity strumień fotonów dla AM1.5

$$\boldsymbol{\Phi_{ph}(\lambda)} = \frac{\boldsymbol{I_{ph}}(\lambda)}{\frac{\boldsymbol{hc}}{\lambda}}$$

Spektralny strumień fotonów = liczba fotonów na jednostkę powierzchni [$m^{-2}s^{-1}nm^{-1}$]

Spektralne natężenie promieniowania [$Wm^{-2}nm^{-1}$]

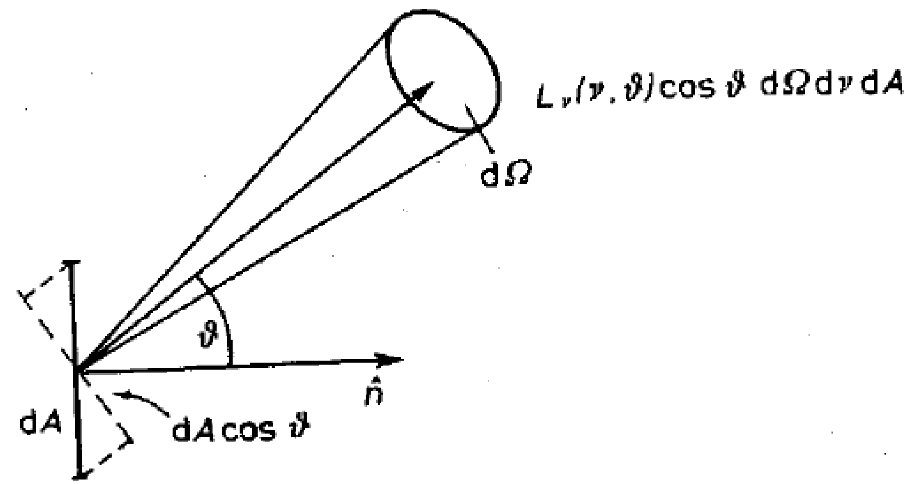
widmo Φ(λ) i Φ



Prawo Lamberta

Rozpatrzmy jednostkowy element powierzchni dA źródła promieniowania o gęstości widmowej luminancji $L_\nu(\vartheta,\nu)$. Wartość L_ν zależy od kąta między kierunkiem obserwacji a normalną n do powierzchni źródła.

$$L_\nu(\vartheta,\nu) = \frac{\partial L}{\partial \nu} \quad \left[\frac{W}{m^2 sr Hz}\right]$$

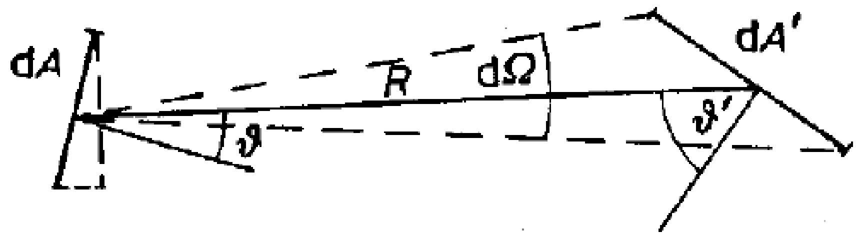


Powierzchnia źródła widziana pod kątem ϑ jest równa $dA\cos\vartheta$. Moc promieniowania dP emitowana przez to źródło do jednostkowego kąta bryłowego $d\Omega$:

$$dP = L_\nu(\vartheta,\nu)\cos\vartheta\, d\Omega\, d\nu\, dA$$

Prawo Lamberta cd.

Rozważmy element powierzchni detektora dA', znajdujący się w odległości R od elementu powierzchni źródła dA,



Element dA' jest widziany ze źródła w kącie bryłowym dΩ. Zatem dla $R^2 >> dA, dA'$ moc promieniowania padającego na element dA' jest równa:

$$dP = L(\vartheta)\cos\vartheta d\Omega dA = L(\vartheta)\cos\vartheta dA' dA \cos\vartheta' / R^2$$

- **Dla źródeł izotropowych, dla których luminancja nie zależy od kąta, moc promieniowania emitowanego do jednostkowego kąta bryłowego jest proporcjonalna do cosinusa kąta pomiędzy kierunkiem obserwacji a normalną do powierzchni emitującej.**
- **Jest również proporcjonalna do cosinusa kąta między kierunkiem obserwacji a normalną do powierzchni detektora.**

Prawo Lamberta

$$dP = L_\nu(\vartheta, \nu)\cos\vartheta\, d\Omega\, d\nu\, dA$$

Moc promieniowania emitowanego przez źródło otrzymuje się po scałkowaniu tego równania po całej powierzchni źródła A , po wszystkich częstościach światła ν oraz po pełnym kącie bryłowym:

$$P = \oint_A \int_0^\infty \int_\Omega L_\nu(\vartheta, \nu)\cos\vartheta\, d\Omega\, d\nu\, dA$$

$$P_\nu = \oint_A \int_\Omega L_\nu(\vartheta, \nu)\ \cos\vartheta\, d\Omega\, dA$$

$$P_\nu = \frac{\partial P}{\partial \nu} \quad [\frac{W}{Hz} = W \cdot s]$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \qquad P_\nu = \frac{\partial P}{\partial \nu} = \frac{\partial P}{\partial \lambda} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial \nu} = P_\lambda(-\frac{c}{\nu^2})$$

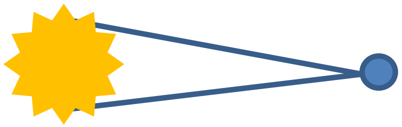
Przykład I. Luminancja Słońca

Przy padaniu normalnym, bez odbicia i absorpcji w atmosferze, do $1m^2$ powierzchni Ziemi dociera promieniowanie o natężeniu $I_z = 1.35kW/m^2$ (stała słoneczna).
Ze względu na symetrię możemy traktować dA' jako źródło a dA jako odbiornik.

$$R_S = 696000km \quad AU = 149600000km \quad R_Z = 6370km$$

$$\Omega_S = \pi\left(\frac{R_S}{AU - R_Z}\right)^2 \approx 68.5\mu sr$$

$$dP = L\, d\Omega dA$$



$$L_s = \frac{dP}{dAd\Omega} = \frac{I_z}{\Omega_S} = \frac{1.35 \cdot 10^3 kW}{68.5 \cdot 10^{-6} m^2 sr} = 2 \cdot 10^7 W/(m^2 sr)$$

Przykład II. Luminancja lasera He-Ne

Załóżmy, że moc wyjściowa 1mW jest emitowana przez 1 mm^2 powierzchni zwierciadła w kącie płaskim 4', co odpowiada kątowi bryłowemu 10^{-6}sr. Maksymalna luminancja w kierunku rozchodzenia się wiązki laserowej jest więc równa:

$$L_{He-Ne} = \frac{10^{-3}}{10^{-6}10^{-6}}\frac{W}{m^2 sr} = 10^9\frac{W}{m^2 sr} \qquad \Omega = \pi(sin2')^2 = 10^{-6}\text{sr}$$

Porównując luminancję Słońca i lasera:

$$\frac{L_{He-Ne}}{L_s} = \frac{10^9}{2\cdot 10^7} = 50$$

Promieniowanie jednomodowego lasera He-Ne jest skupione w szerokości widmowej ok. 1MHz, więc:

$$L_\nu = 10^9/10^6 = 10^3\ W/(m^2 srHz)$$

Promieniowanie Słońca jest skupione w szerokości 10^{15}Hz, co daje:

$$L_{\nu s} = 2\cdot 10^7/\,10^{15} = 2\cdot 10^{-8} W/(m^2 srHz) \qquad \frac{L_\nu}{L_{\nu s}} = 5\cdot 10^{10}$$

Przykłady

- **Oko reaguje na luminancję 10^{-4} W/(m^2sr)**
- **Ból oka i możliwość jego uszkodzenia – 10^6W/(m^2sr).**
- **Niebo w noc bezksiężycową - 10^{-4} W/(m^2sr).**
- **Kartka papieru przy oświetleniu ok. 30 lx - 10 W/(m^2sr).**
- **Włókno żarówki – 10^6 W/(m^2sr).**
- **Tarcza słoneczna – 10^9 W/(m^2sr).**

Źródło lambertowskie

Dla źródła izotropowego, zwanego lambertowskim, luminancja nie zależy od kąta.

- **Dla takiego źródła, o powierzchni emitującej dA, moc promieniowania padającego prostopadle ($\cos\vartheta=1$) na detektor rozciągły, widoczny ze źródła pod kątem aperturowym u wyraża się wzorem**:

$$P = \pi L \sin^2 u dA$$

- **Między emitancją (całkowitą zdolnością emisyjną) M źródła spełniającego prawo Lamberta a jego luminancją L, zachodzi relacja:**

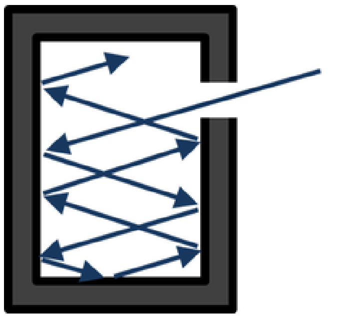
$$M = \pi L$$

- **Związek między gęstością energii ρ i emitancją M źródła Lamberta**

$$M = \frac{\rho c}{4}$$

Strumień promieniowania emitowany przez ciało doskonale czarne (CDC)

- otwór wyjściowy CDC - koło o promieniu r,
- x- odległość między CDC a detektorem
- powierzchnie detektora i CDC są równoległe (cosθ =1)
- źródło o luminancji L
- detektor jest widziany ze źródła pod kątem aperturowym u.



Strumień promieniowania docierającego do detektora:

$$P = \pi L \sin^2 u dA = L\pi \frac{r^2}{x^2} dA = LdA \frac{dA_{źr}}{x^2}$$

Biorąc dalej pod uwagę, że $L = \frac{M}{\pi}$ **otrzymujemy:**

$$P = \frac{MdAdA_{źr}}{\pi x^2}$$

Strumień promieniowania pochodzący z ciała doskonale czarnego (CDC)

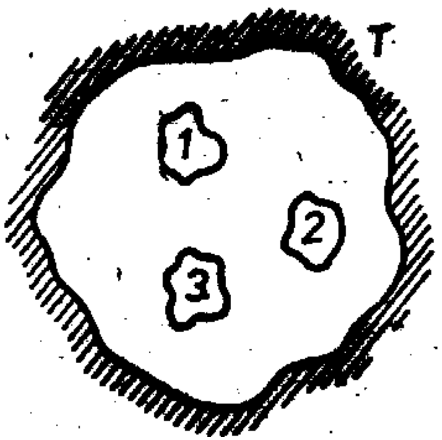
Emitancja CDC o temperaturze T, przy założeniu, że temperatura otoczenia jest równa T_0, zgodnie z prawem Stefana – Boltzmanna jest równa:

$$M = \sigma(T^4 - T_0^4)$$

σ=5,7 · 10^{-8}W/(m^{2}K^4) - **stała Stefana - Boltzmanna**

$$\mathbf{P} = \frac{M dA dA_{źr}}{\pi x^2} = \frac{\sigma(T^4 - T_0^4) dA dA_{źr}}{\pi x^2}$$

Prawo Kirchhoffa

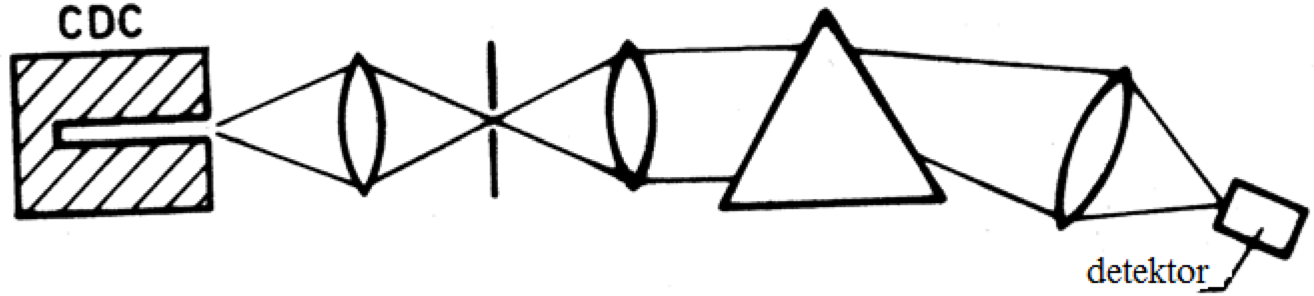


Stosunek spektralnej zdolności emisyjnej do spektralnej zdolności absorpcyjnej ciał jest taką samą funkcją długości fali i temperatury, niezależną od rodzaju ciała:

$$\frac{e_\lambda(\lambda,T)}{a_\lambda(\lambda,T)} = f(\lambda,T)$$

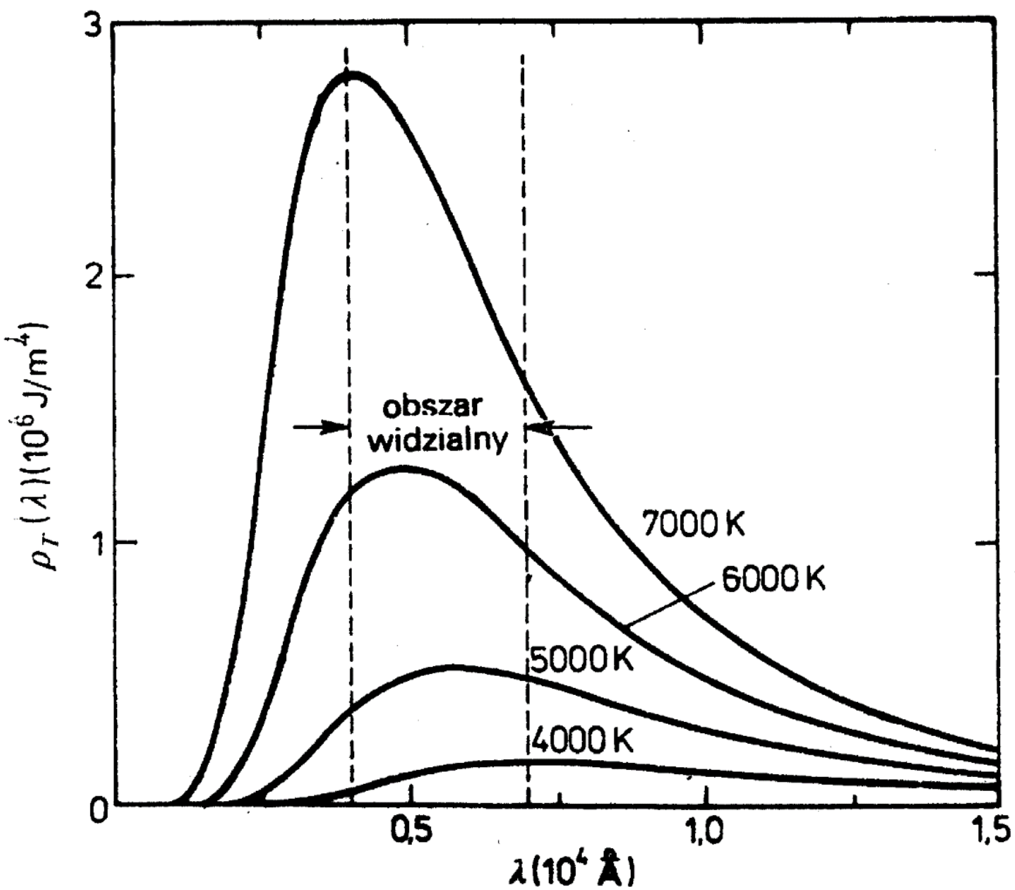
Dla CDC, a_λ *(λ,T)=1* i zgodnie z prawem Kirchoffa zdolność emisyjna CDC jest poszukiwaną funkcją f (λ ,T).

Układ do pomiaru f (λ,T)



Dalej pokażemy, że

$$e(\lambda, T) = \frac{\rho(\lambda, T) \cdot c}{4}$$



$e(\lambda, T)$- spektralna zdolność emisyjna

$\rho(\lambda, T)$ - spektralna gęstość energii

Prawa promieniowania CDC

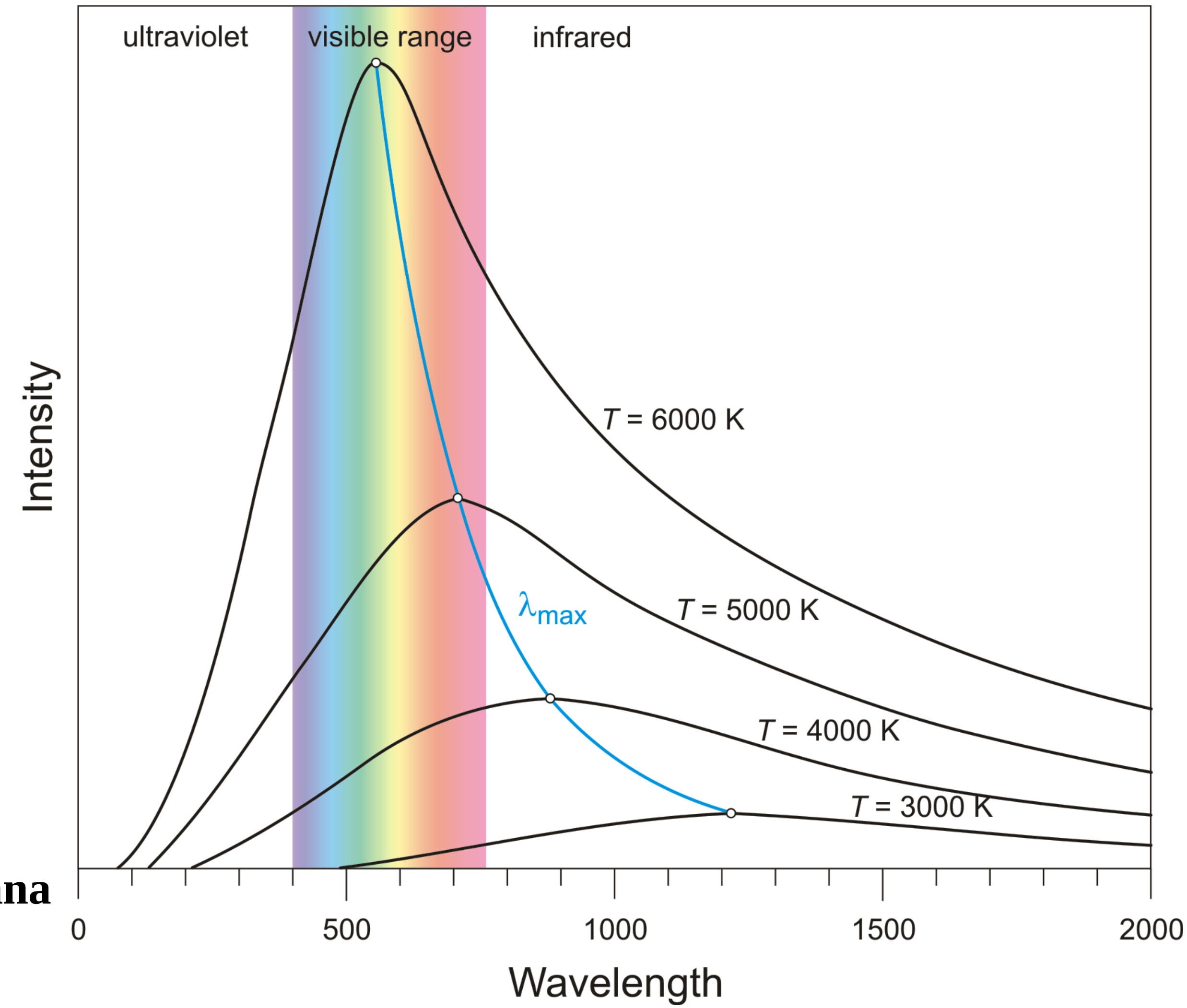
- **Prawo Plancka**

$$e(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1}$$

- **Prawo Stefana-Boltzmanna:**

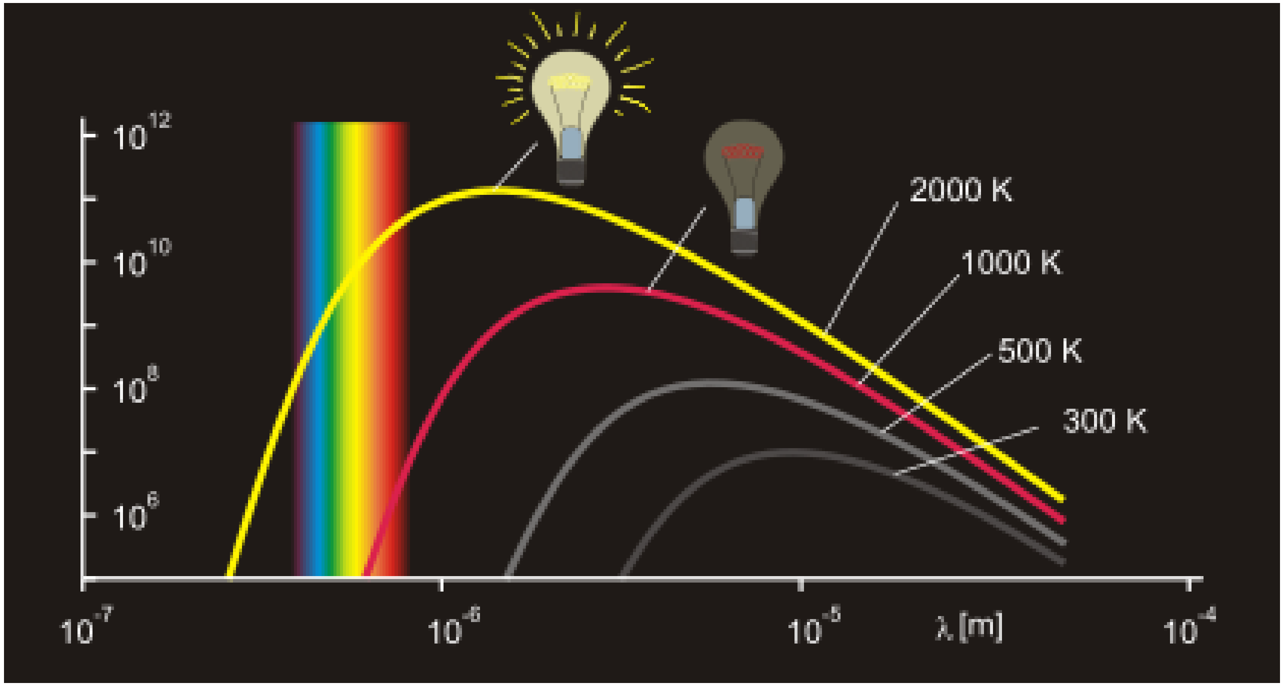
$$M(T) = \int_0^\infty e(\lambda, T)d\lambda = \sigma(T^4 - T_0{}^4)$$

σ – stała Stefana-Boltzmanna



- **Prawo Wiena:** $\lambda_{max} \cdot \mathrm{T} = 2898\ \mu\mathrm{m\ K}$

CDC



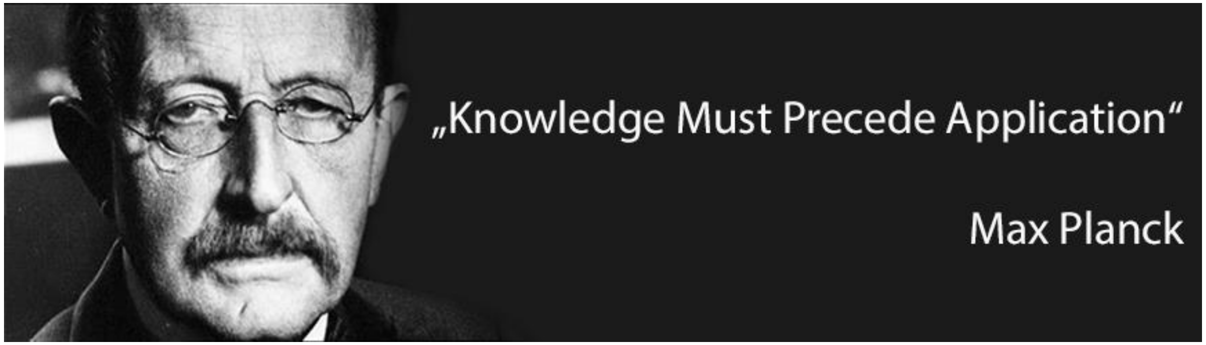
- **Prawo Wiena:** $\boldsymbol{\lambda_{max} \cdot \mathrm{T} = 2898\ \mu\mathrm{m\ K}}$

Prawo Wiena

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 \cdot 10^{-6}\ m \cdot K = 2898 \cdot \mu m \cdot K$$

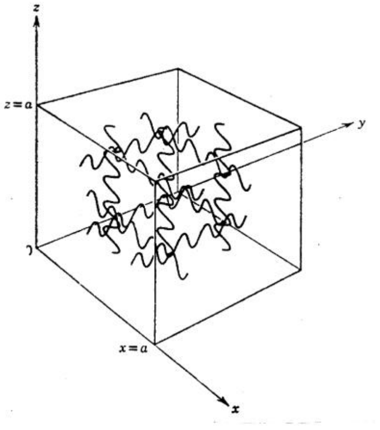
Temperatura °K	Temperatura °C	Długość fali [μm]	Emiter
273	0	11	lód
373	100	8	wrząca woda
473	200	6,3	kolba do lutowania
573	300	5,2	żelazko do prasowania
773	500	3,9	gorące żelazo
1 273	1 000	2,3	grzejnik Ni-Cr
2 848	2 575	1,0	włókno wolframowe
3 000	2 727	0,97	żarówka samochodowa

Prawo Plancka



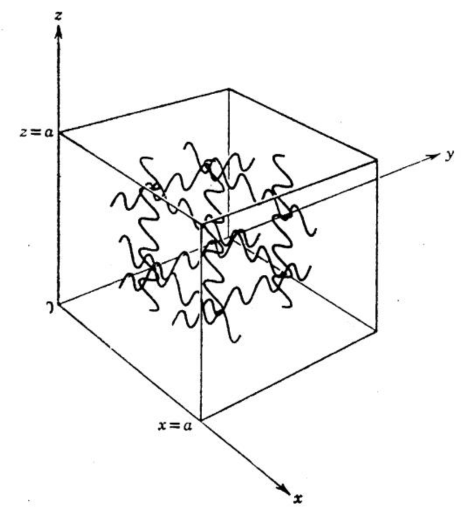
Postulat Plancka (1900r – narodziny mechaniki kwantowej):

$$\boxed{\varepsilon_n = nh\nu \qquad n = 1,2,3\ldots}$$



Stała Plancka $\boldsymbol{h = 6.63 \cdot 10^{-34} Js}$

Prawo Plancka CDC



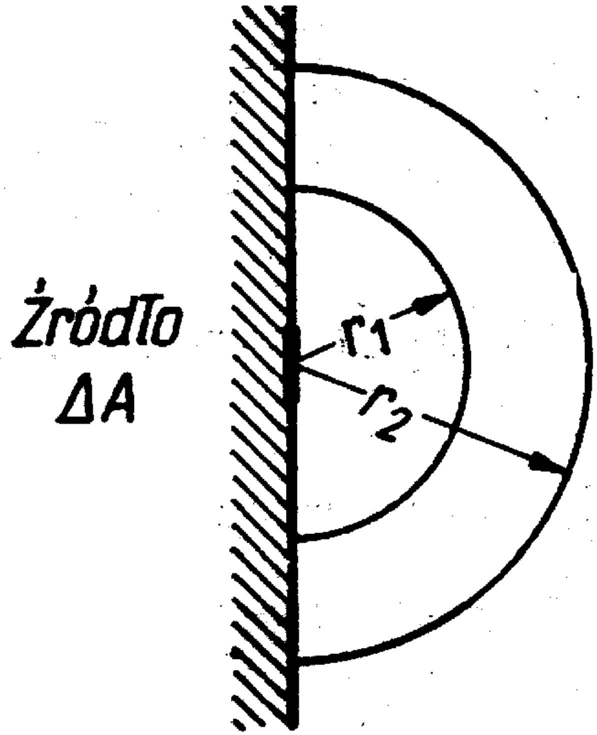
$$\boxed{e_\nu = \frac{2h\nu^3}{e^{h\nu/kT}-1}\frac{1}{c^2}}$$

Prawo Plancka

$$\boxed{\boldsymbol{e(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1}}}$$

Prawo odwrotnych kwadratów

Natężenie napromieniowania:



$$E_{r1} = \frac{\emptyset}{2\pi {r_1}^2}$$

$$E_{r2} = \frac{\emptyset}{2\pi {r_2}^2}$$

$$\frac{E_{r1}}{E_{r2}} = \frac{{r_2}^2}{{r_1}^2}$$

Współczynnik emisyjności

$$f(\lambda,T) = \frac{e_{\lambda}(\lambda,T)}{a_{\lambda}(\lambda,T)} = \frac{e_{c\lambda}(\lambda,T)}{a_{c\lambda}(\lambda,T)} = e_{c\lambda}(\lambda,T)$$

Współczynnik emisyjności

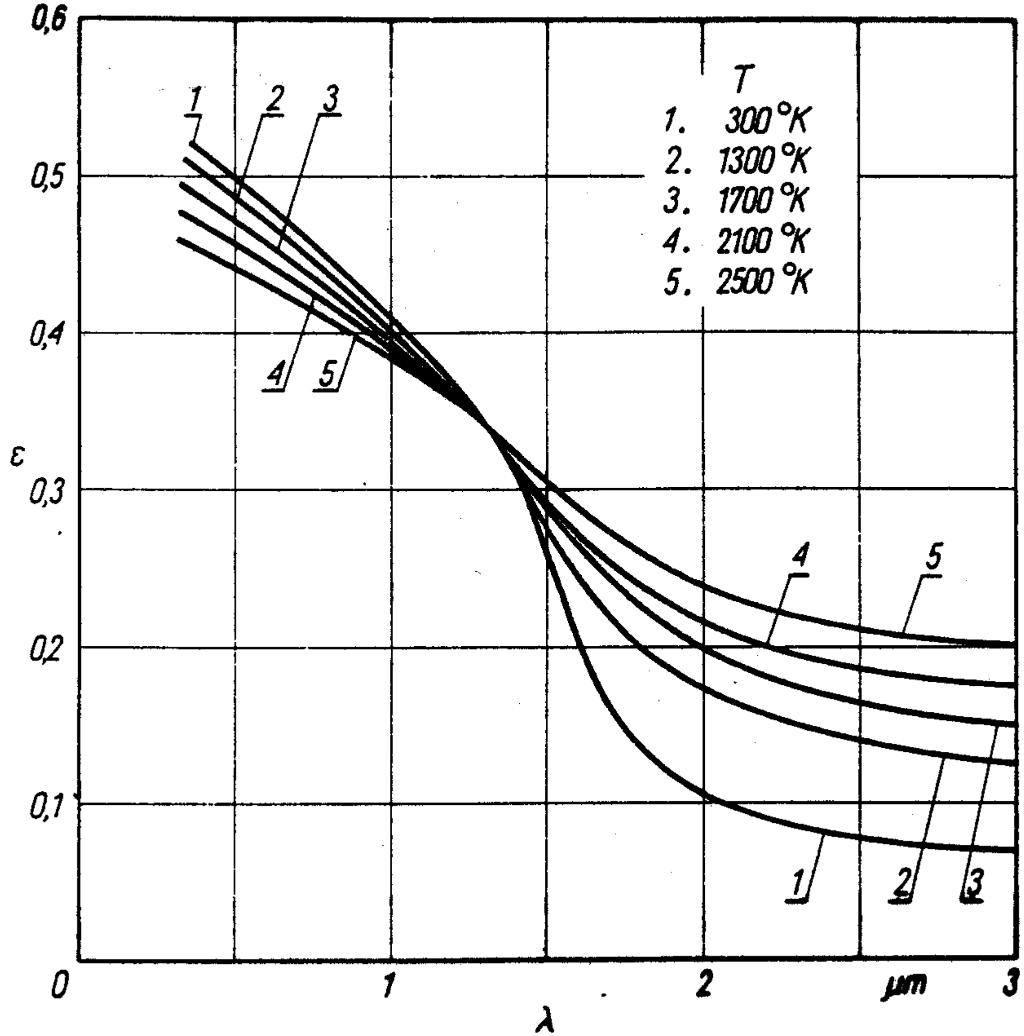
$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda,T) = \frac{e_{\lambda}(\lambda,T)}{e_{c\lambda}(\lambda,T)} = a_{\lambda}(\lambda,T)$$

Ciała dla których współczynnik emisyjności nie zależy od długości fali nazywamy ciałami szarymi. Natomiast o ciałach, które mają wyraźne maksimum współczynnika emisyjności mówimy, że promieniują selektywnie.

Współczynnik emisyjności

Materiał	t[°C]	ε
Miedź elektrolityczna polerowana	80÷115	0,018÷0,023
Srebro polerowane	225÷652	0,0198÷0,0324
Aluminium polerowane	225÷575	0,039÷0,057
Nikiel polerowany	225÷375	0,07÷0,087
Chrom	100÷1 000	0,08÷0,26
Żelazo polerowane	425÷1 020	0,144÷0,377
Żelazo utlenione	100	0,736
Tlenek żelaza	500÷1 200	0,85÷0,95
Szkło gładkie	22	0,937
Woda	0÷100	0,95÷0,963
Sadza ze szkłem wodnym	100÷185	0,959÷0,947
Lakier czarny matowy	40÷95	0,96÷0,98

Emisyjność wolframu



Współczynnik odbicia

Główna różnica miedzy promieniowaniem ciał rzeczywistych a promieniowaniem CDC polega na tym, ze wszystkie ciała rzeczywiste odbijają część strumienia promieniowania które na nie pada, czyli maja różny od zera <u>współczynnik odbicia</u>.

$$\Phi = \Phi_\rho + \Phi_\alpha + \Phi_\tau \quad / \quad \Phi$$

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

$\rho = \Phi_\rho / \Phi$ - <u>współczynnik odbicia</u>,

$\alpha = \Phi_\alpha / \Phi$ jest - <u>współczynnik pochłaniania</u>

$\tau = \Phi_\tau / \Phi$ jest <u>współczynnik transmisji</u>

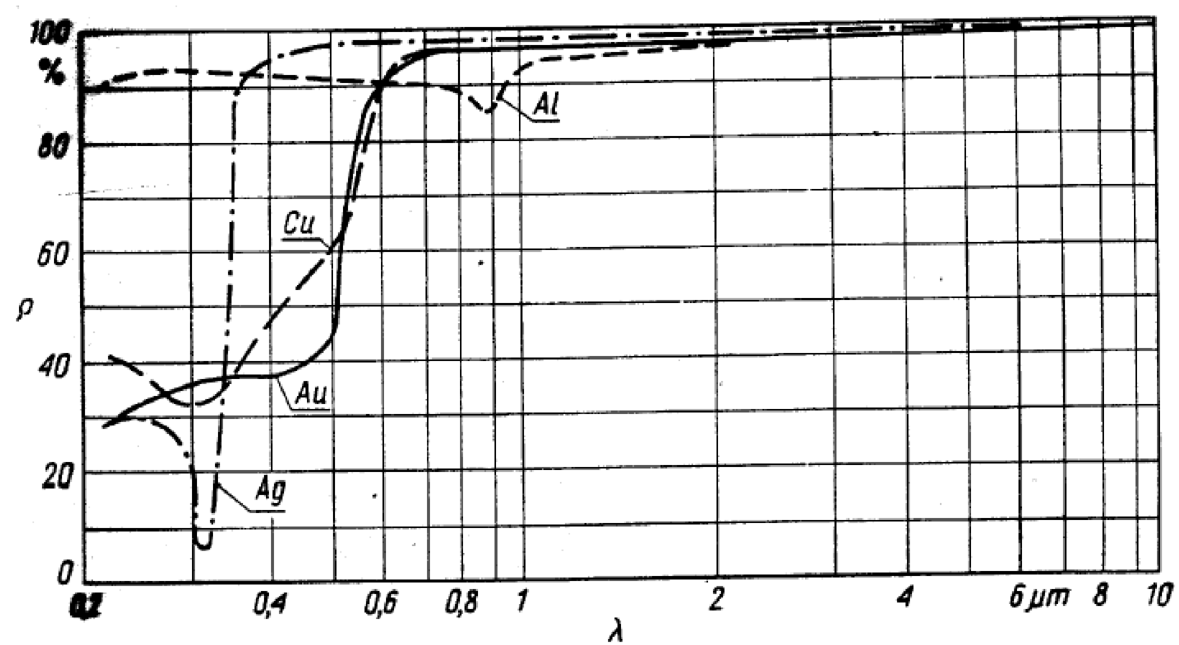
Dla ciał nieprzezroczystych (np. metale dla światła widzialnego) $\tau = 0$:

$\rho + \alpha = 1$ a stąd $\alpha = 1 - \rho$

Ponieważ $\alpha = \varepsilon$ to

$$\boldsymbol{\varepsilon = \alpha = 1 - \rho}$$

Współczynnik odbicia



Współczynnik odbicia dla kilku cienkich warstw metalicznych