Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

Wykład I

Wy1	**Wstęp. Podział widma promieniowania e.m., prawo Lamberta.**	**3**
Wy2	**Prawa promieniowania ciała doskonale czarnego i ciał rzeczywistych.**	**2**
Wy 3	**Termiczne i nietermiczne źródła promieniowania.**	**2**
Wy 4	**Emisja spontaniczna i wymuszona, współczynniki Einsteina. Laser – zasada działania.**	**2**
Wy 5	**Oddziaływanie promieniowania e.m. z materią**	**2**
Wy 6	**Krótki wstęp do fizyki półprzewodników.**	**4**
Wy 7	**Złącza półprzewodnikowe.**	**2**
Wy 8	**Lasery półprzewodnikowe i diody elektroluminescencyjne.**	**2**
Wy 9	**Klasyfikacja detektorów promieniowania e.m; kryteria oceny, parametry.**	**2**
Wy 10	**Detektory termiczne.**	**2**
Wy 11	**Detektory fotonowe.**	**3**
Wy 12	**Spektrometry: pryzmatyczne i siatkowe, interferometry.**	**2**
Wy 13	**Test zaliczeniowy**	**2**
	Suma godzin	**30**

LITERATURA PODSTAWOWA:

[1] Materiały do wykładu i laboratorium (wstępy teoretyczne oraz instrukcje robocze) , dostępne poprzez internet : https://popko.wppt.pwr.edu.pl

[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)

[6] Fizyka dla Szkół Wyższych t. 3, rozdział 9, wyd. Openstax https://cnx.org/contents/u2KTPvIK@8.12:tyRWlTJ7@2/Wst%C4%99p

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA:

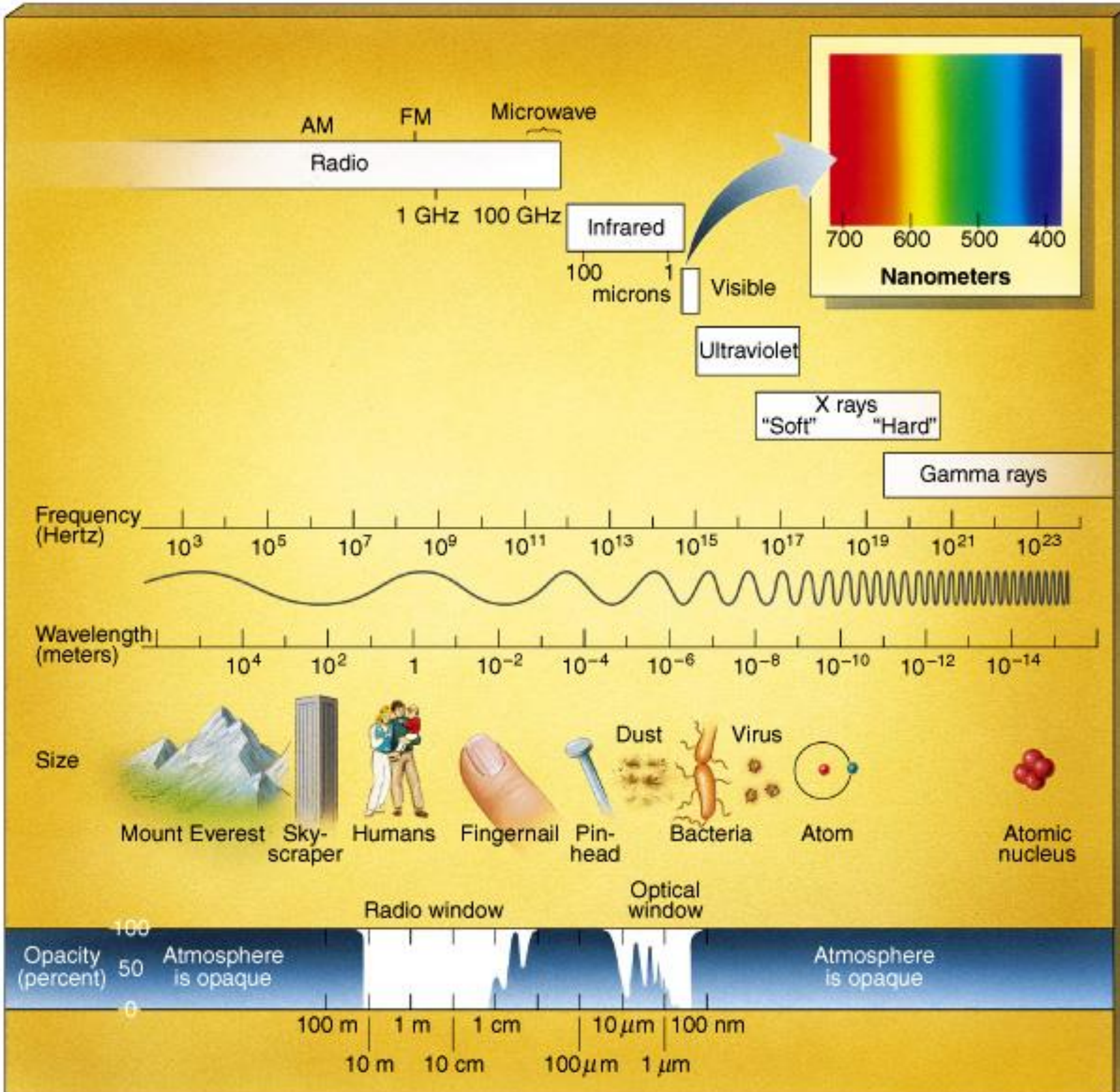
[1] Liczne publikacje nt. detektorów promieniowania, katalogi producentów źródeł promieniowania i detektorów (np. Hamamatsu).

[2] R.Nowicki, "Pomiary energii promienistej",WNT (1969).

[3] D.A.Neamen „Semiconductor Physics and Devices”, ed. McGraw-Hill, 2012

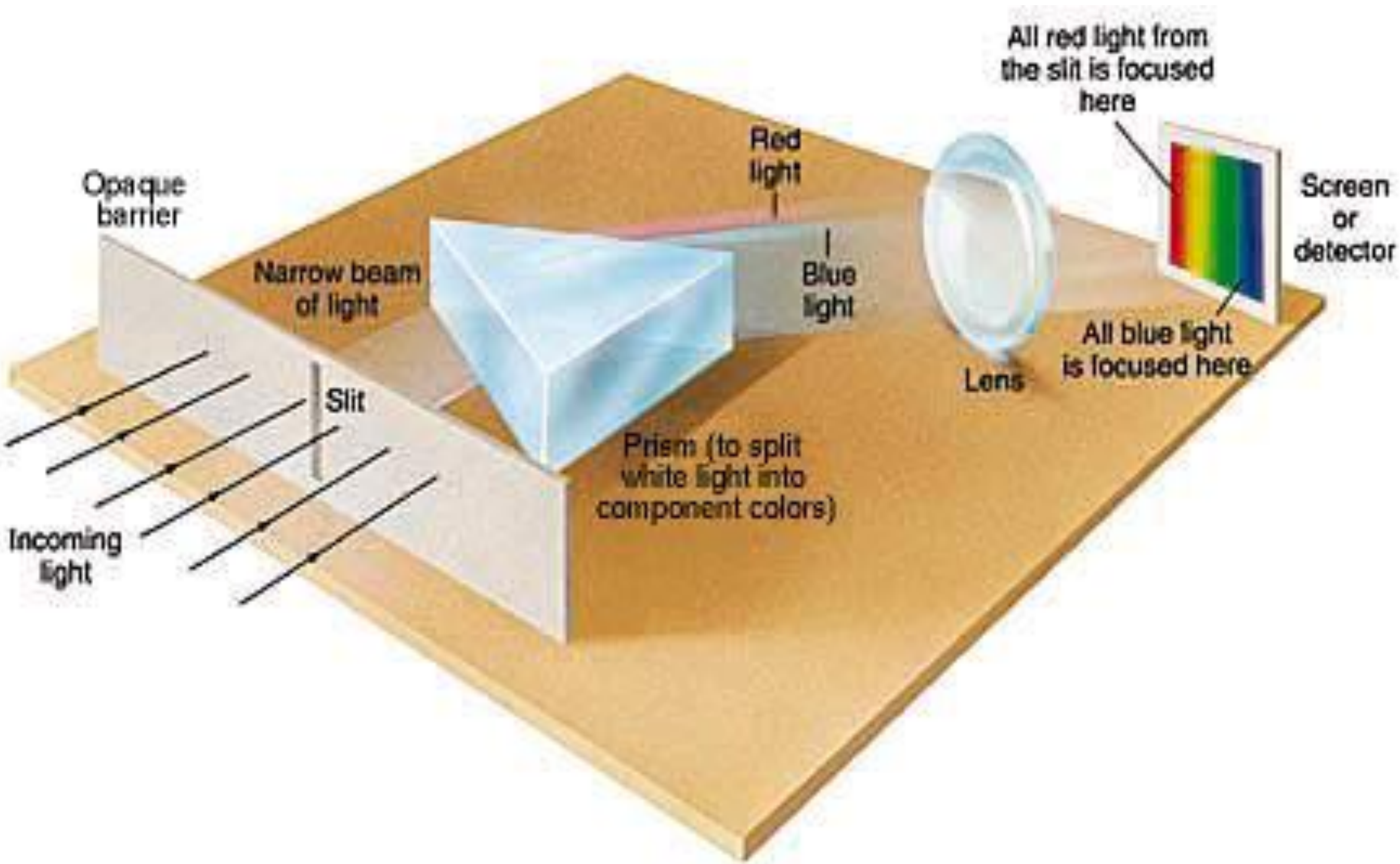
OPIEKUN PRZEDMIOTU (IMIĘ, NAZWISKO, ADRES E-MAIL)

Ewa Popko **ewa.popko@pwr.edu.pl**



AM
FM
Microwave
Radio
1 GHz
100 GHz
Infrared
100 microns
1
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
1 m
1 cm
10 μm
100 nm
10 m
10 cm
100μm
1 μm

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*):

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

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

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

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

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

Całkowity strumień fotonów (ang. *photon flux*)

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

Natężenie napromieniowania i emitancja

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

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

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

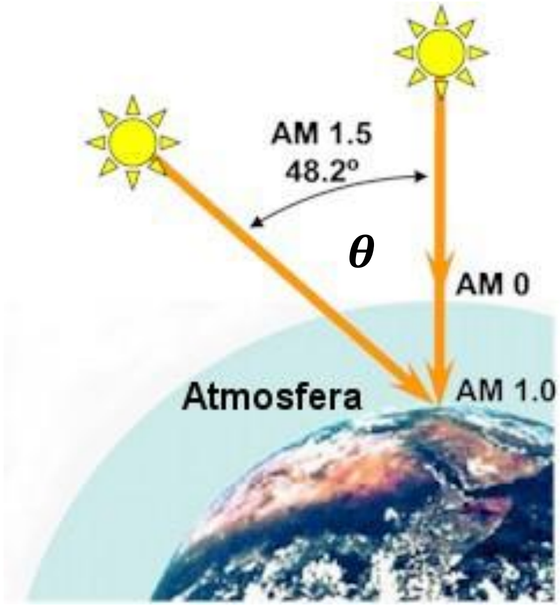
$$I_{e,\lambda} = \frac{\partial^2 P_\lambda}{\partial A} = \frac{\partial^2 \Psi_{ph,\lambda}}{\partial A} \frac{hc}{\lambda} = \boxed{\Phi_{ph,\lambda} \cdot \frac{hc}{\lambda} = I_{e,\lambda}}$$

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

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

Air Mass (AM)

Promieniowanie słoneczne

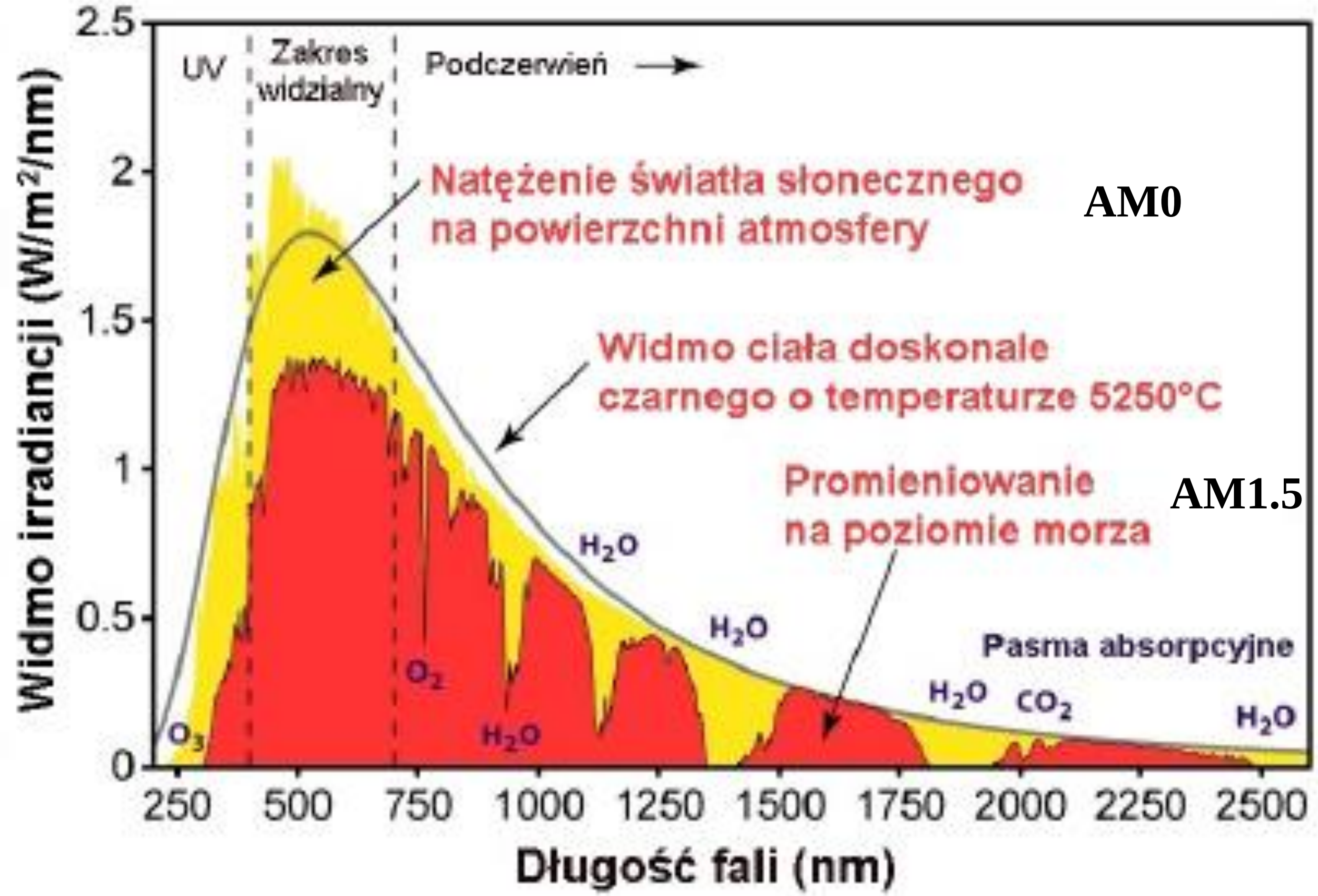


$$\boldsymbol{x = \frac{1}{cos\theta}}$$

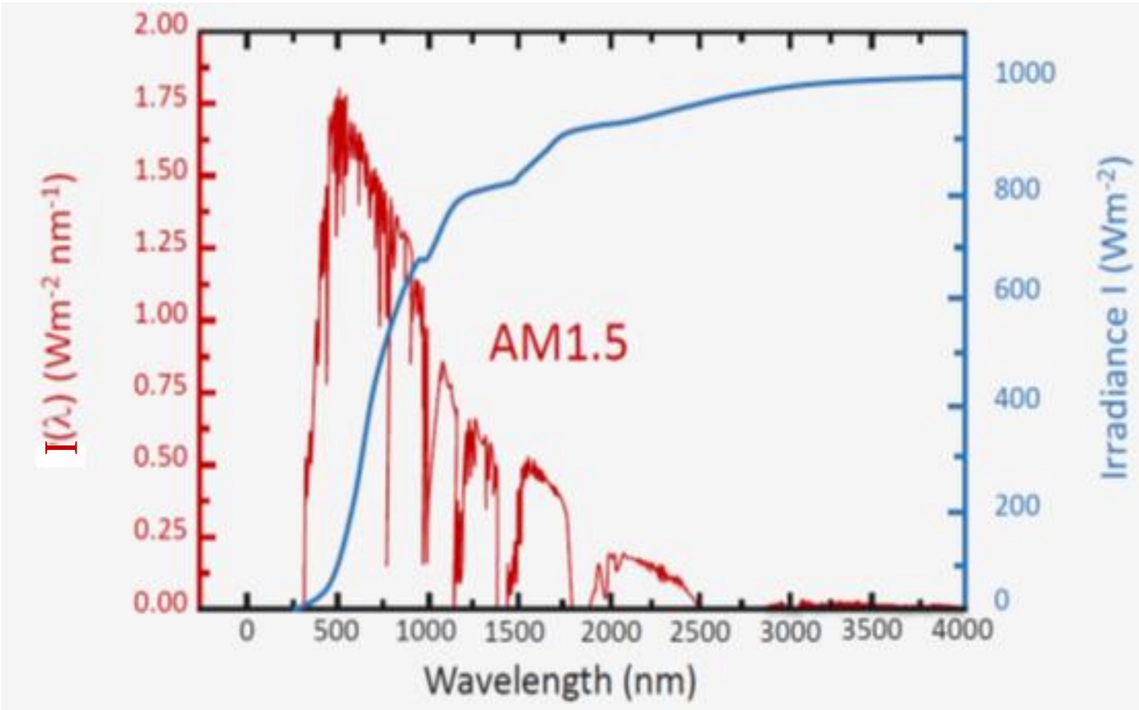
$$x = \frac{1}{cos0°} = 1 \qquad AM1$$

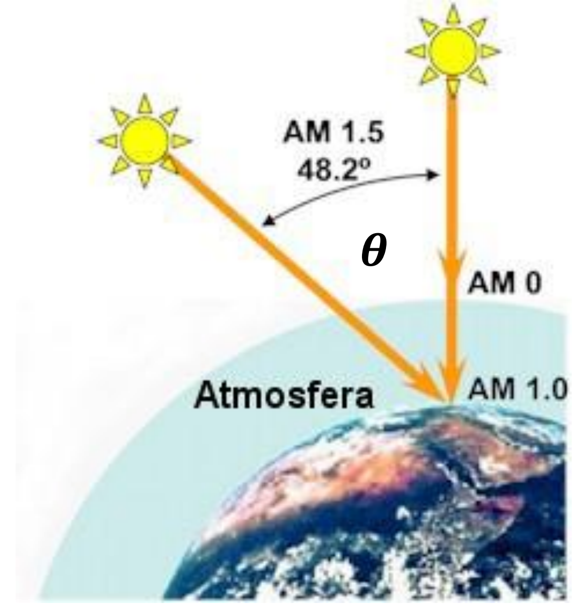
$$x = \frac{1}{cos48{,}2°} = 1{,}5 \qquad AM1{,}5$$

Charakterystyka spektralna (widmo) Słońca



Natężenie napromieniowania dla AM1.5





Spektralne natężenie napromieniowania (spactral irradiance):

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

Całkowite natężenie napromieniowania (irradiance):

$$I_e = \int I_{e,\lambda}(\lambda)\, d\lambda$$

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.**

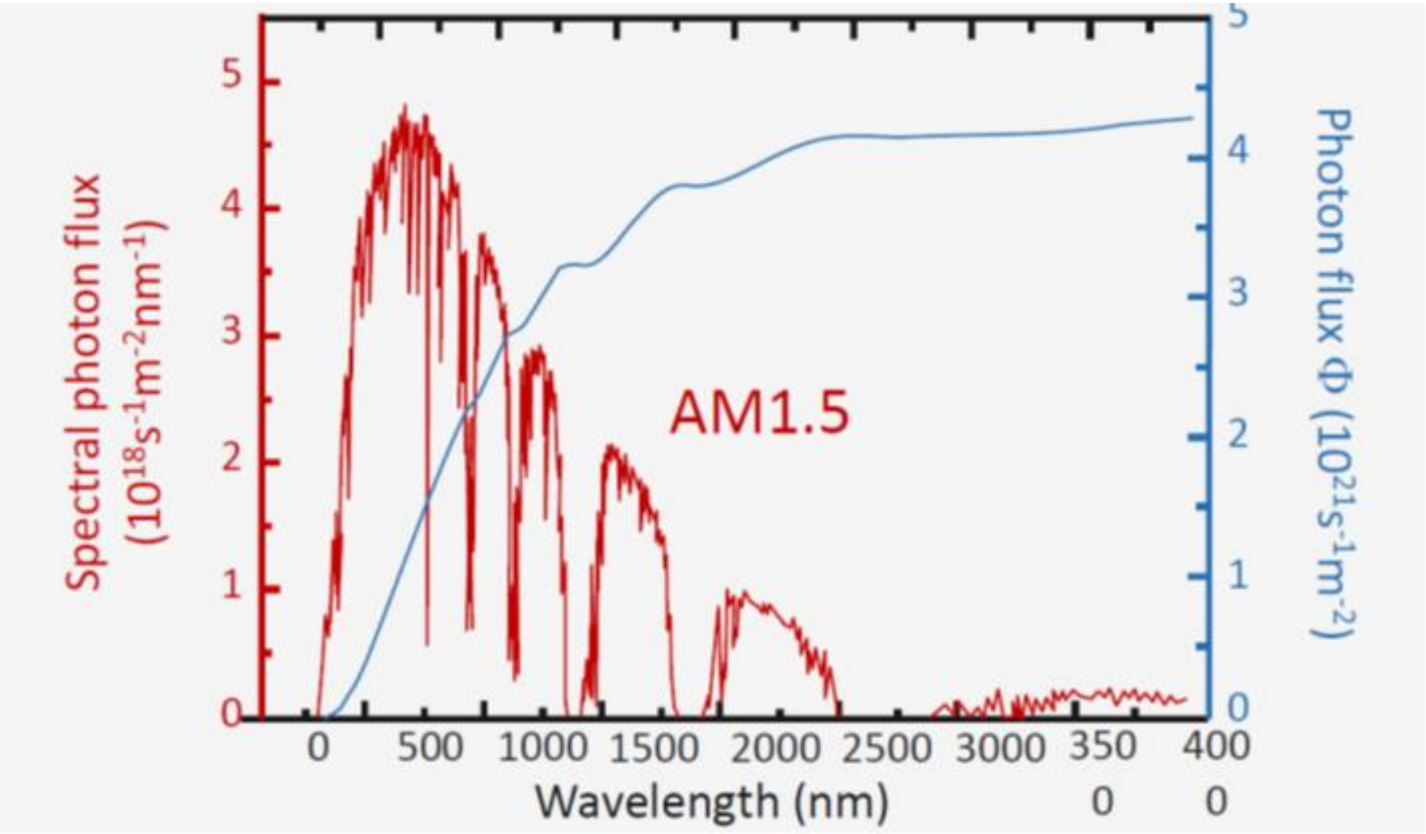
Widmowy i całkowity strumień fotonów dla AM1.5

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

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

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

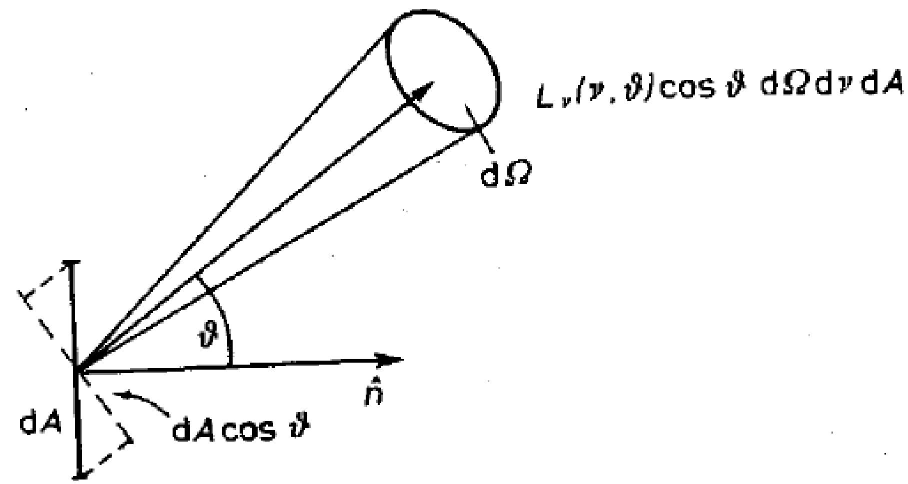
widmo Φ(λ) i Φ



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.

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

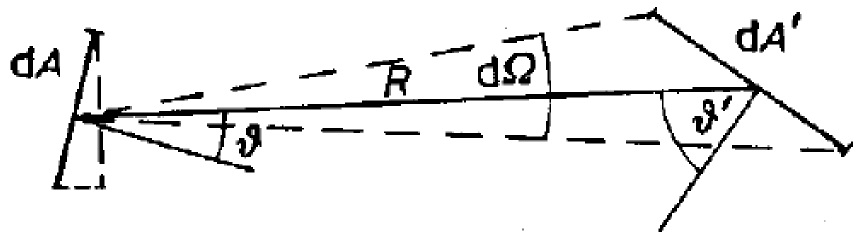


Powierzchnia źródła widziana pod kątem ϑ jest równa $dAcos\vartheta$. Moc promieniowania dP emitowana przez to źródło do jednostkowego kąta bryłowego $d\Omega$:

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

Prawo Lamberta cd.

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



Element dA' jest widziany ze źródła w kącie bryłowym dΩ. Zatem dla $R^2 \gg dA, dA'$ 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.**

Przykłady

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

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:**

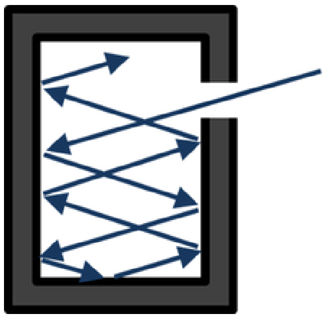
$$M = \pi L$$

- **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:

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

$\boldsymbol{\sigma = 5{,}7 \cdot 10^{-8} W/(m^2K^4)}$ **- stała Stefana - Boltzmanna**

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

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