

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:

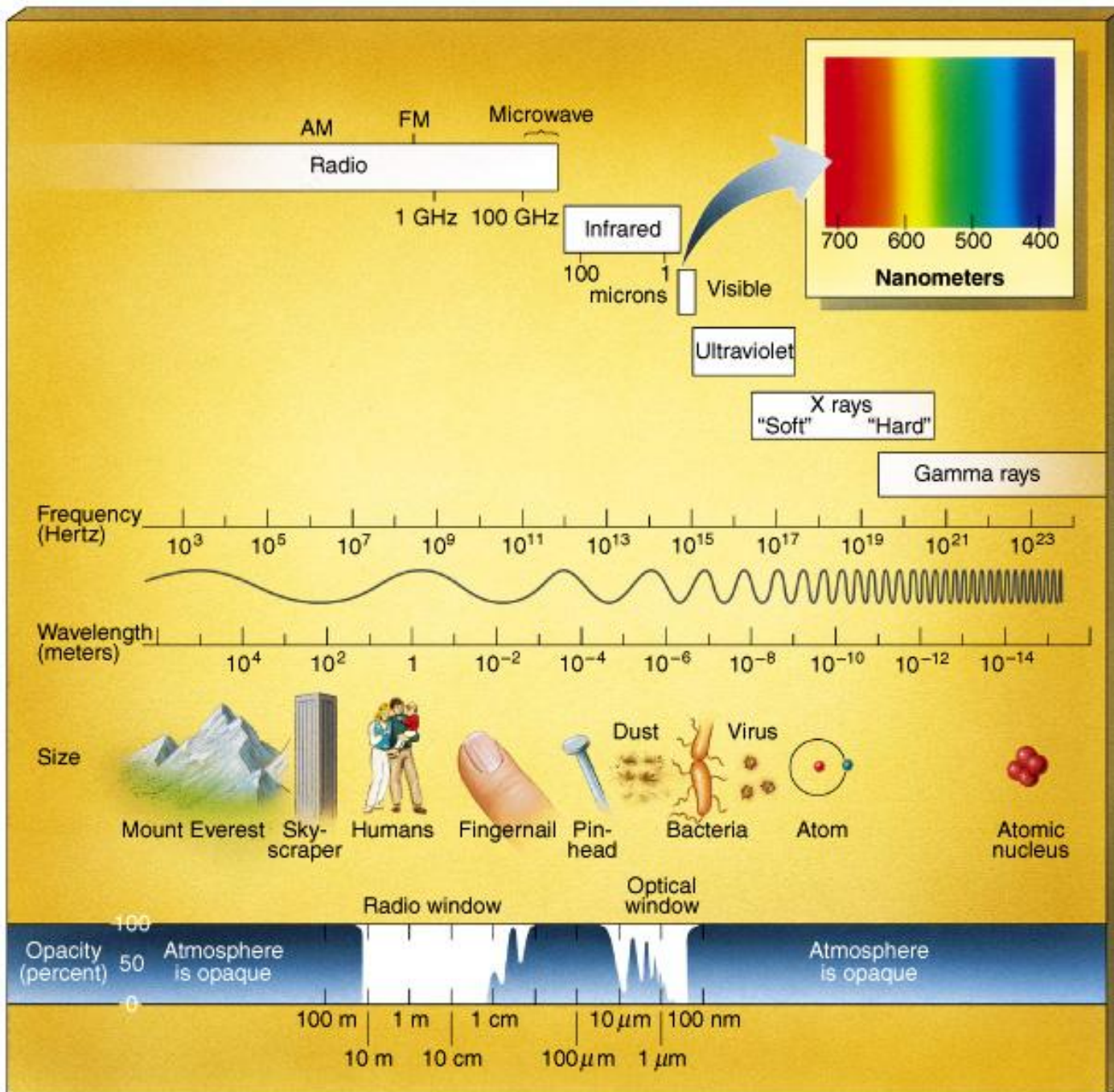
- [1] Materiały do wykładu i laboratorium (wstępy teoretyczne oraz instrukcje robocze) , dostępne poprzez internet : <https://popko.wppt.pwr.edu.pl>
- [2] E.Płaczek-Popko, „Fizyka odnawialnych źródeł energii” Skrypt DBC
- [3] J.Piotrowski i in. „Półprzewodnikowe detektory podczerwieni” WNT (1985).
- [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:tyRWITJ7@2/Wst%C4%99p>

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA:

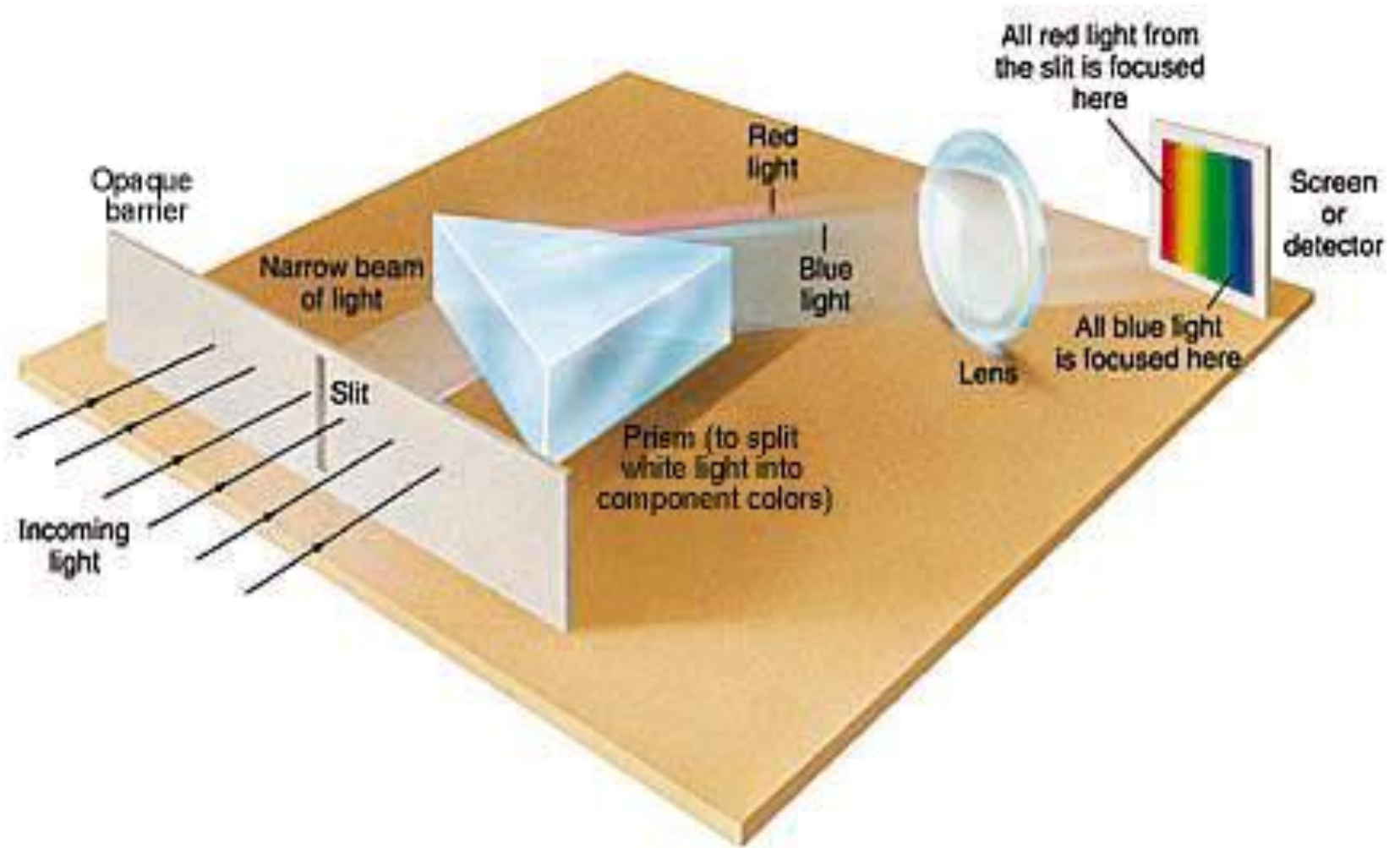
- [1] Liczne publikacje nt. detektorów promieniowania, katalogi producentów źródeł promieniowania i detektorów (np. Hamamatsu).
- [2] R.Nowicki, "Pomiary energii promienistej", WNT (1969).
- [3] D.A.Neamen „Semiconductor Physics and Devices”, ed. McGraw-Hill, 2012

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

Ewa Popko ewa.popko@pwr.edu.pl



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]		

Światłość

$$[\text{cd}] = [\text{lm}/\text{sr}]$$



- 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 światłość 20 000 cd
- Światłość latarni morskiej sięga milionów kandel

Gęstość widmowa

Gęstość widmowa jest zdefiniowana jako ilość strumienia, energii, luminancji etc., zawarta w jednostkowym przedziale częstości $d\nu = 1\text{Hz}$ (lub długości fali $d\lambda$) wokół częstości ν .

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

$$M = \int_0^{\infty} M_\nu d\nu$$

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

Fotony

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

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

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

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

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

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

Całkowity strumień fotonów
(ang. *photon flux*)

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

Przykład 1

Monochromatyczne źródło światła o mocy $P=100\text{W}$ wysyła $3 \cdot 10^{20}$ fotonów/sek. Oblicz długość fali odpowiadającą emitowanym fotonom.

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34}\text{Js}, c = 3 \cdot 10^8\text{m/s}.$$

Natężenie napromieniowania i emitancja

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

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

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

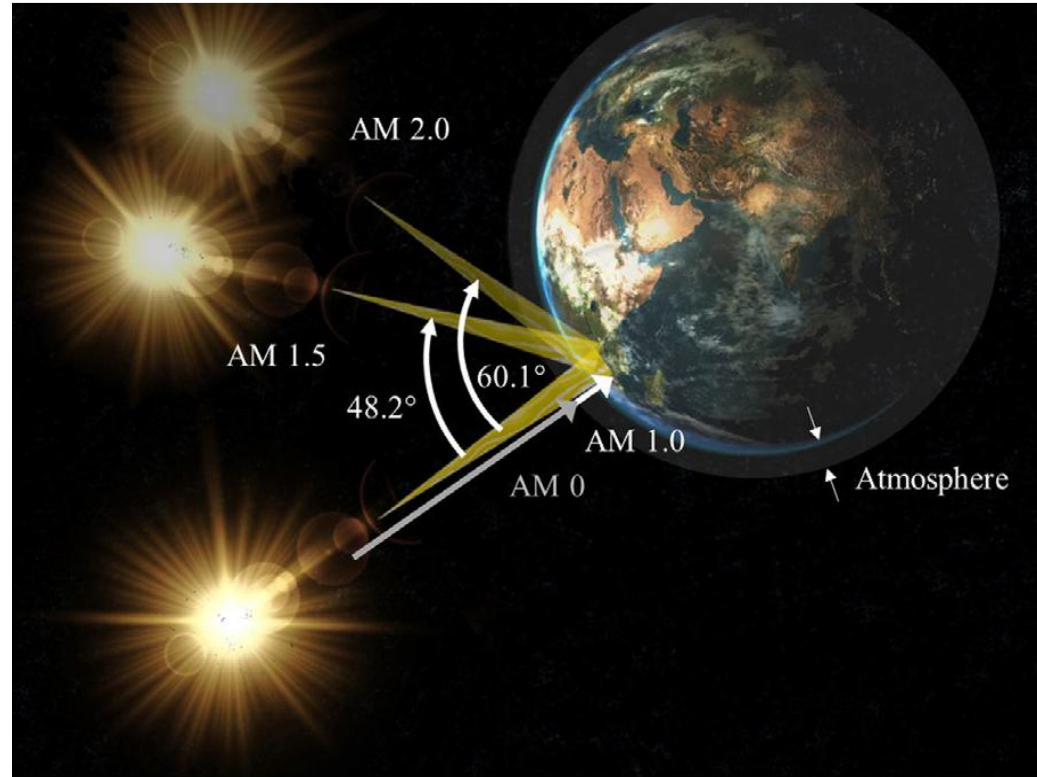
$$I_{e,\lambda} = \frac{\partial^2 P_\lambda}{\partial A} = \frac{\partial^2 \Psi_{ph,\lambda}}{\partial A} \frac{hc}{\lambda} = \Phi_{ph,\lambda} \cdot \frac{hc}{\lambda} = I_{e,\lambda}$$

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

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

Air Mass (AM)

Promieniowanie słoneczne

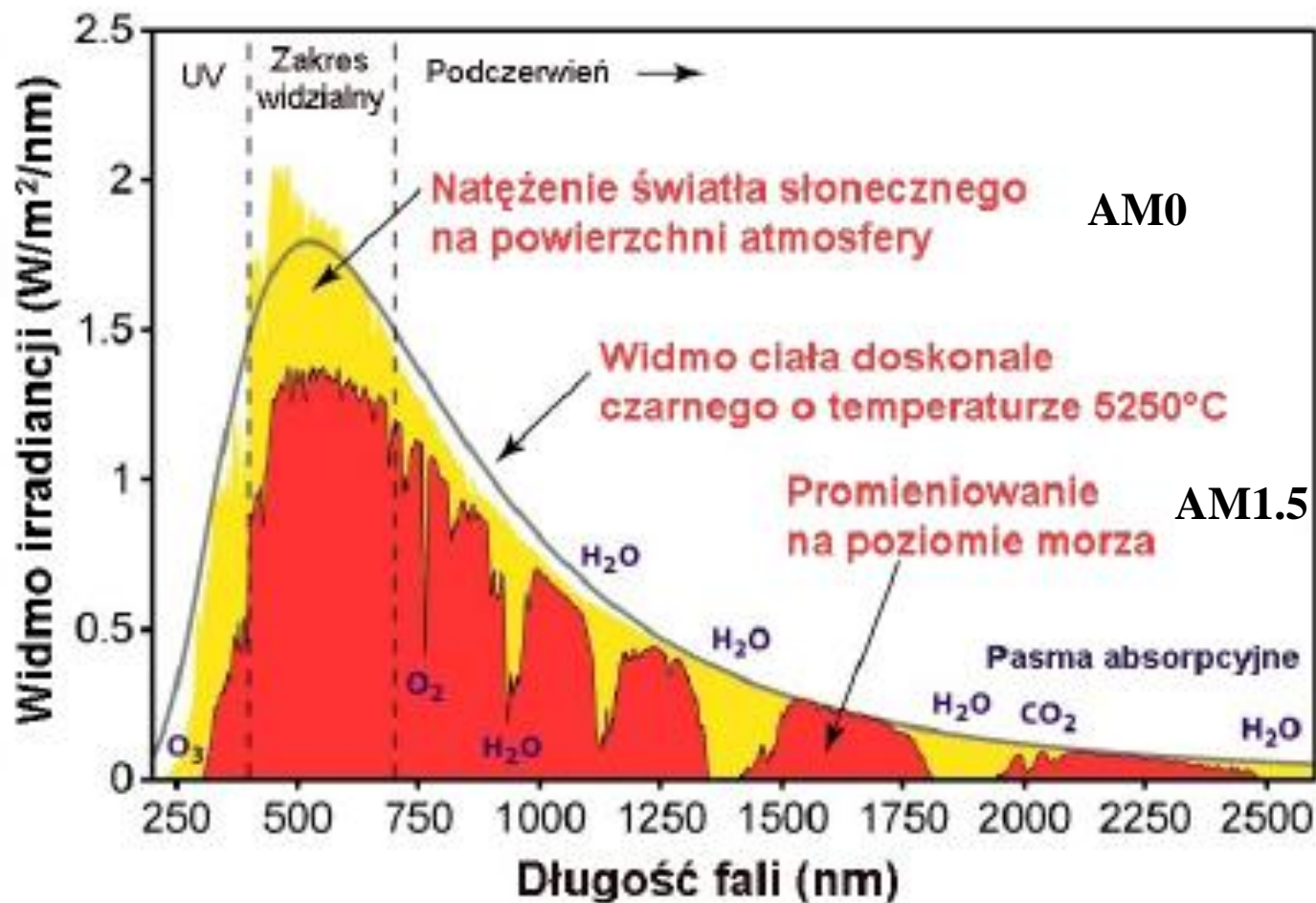


$$x = \frac{1}{\cos\theta}$$

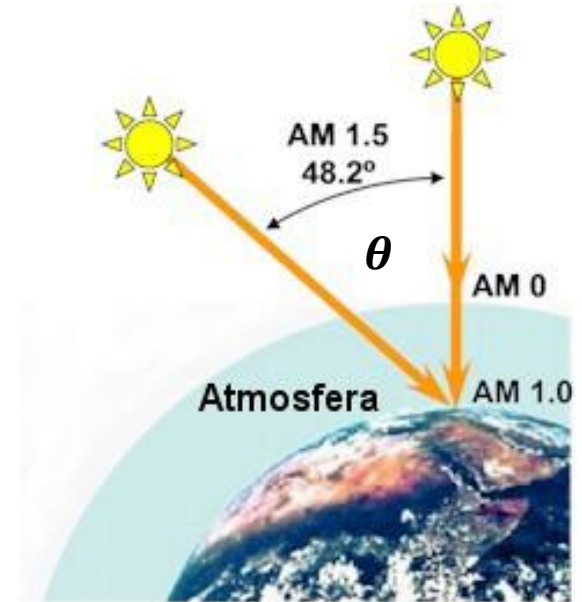
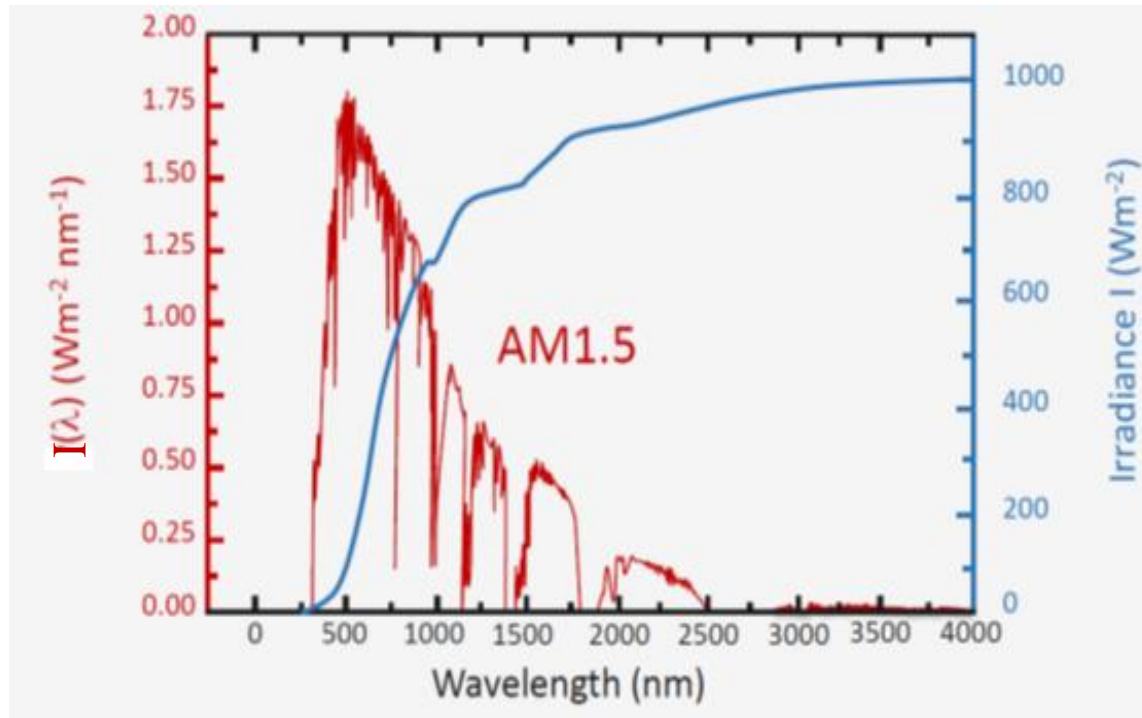
$$x = \frac{1}{\cos 0^\circ} = 1 \quad AM1$$

$$x = \frac{1}{\cos 48,2^\circ} = 1,5 \quad AM1,5$$

Charakterystyka spektralna (widmo) Słońca



Natężenie napromieniowania dla AM1.5



**Spektralne natężenie napromieniowania
(spectral irradiance):**

**Całkowite natężenie napromieniowania
(irradiance):**

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

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

Jak zamienić widmo $I(\lambda)$ na $\Phi(\lambda)$?

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

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

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

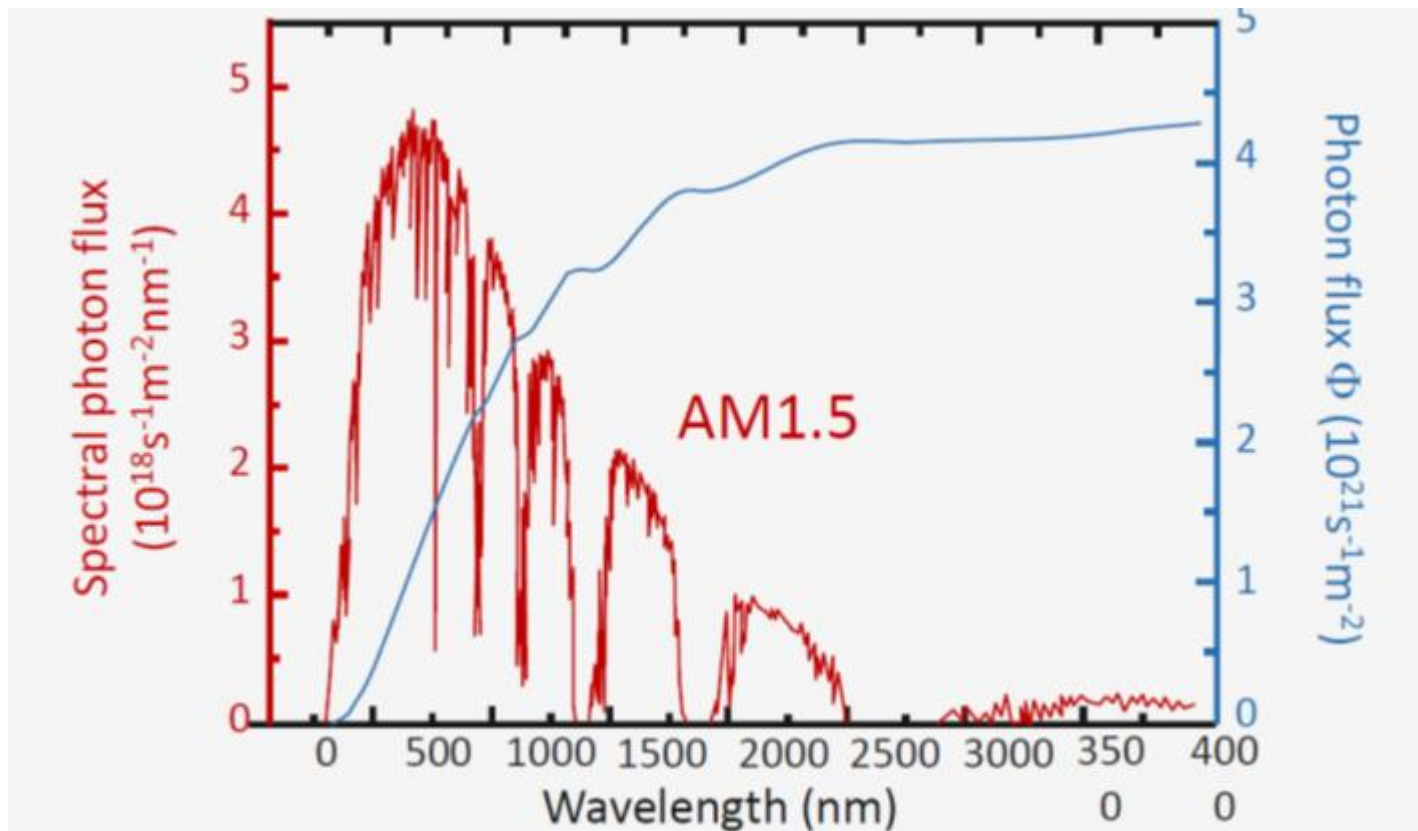
Widmowy i całkowity strumień fotonów dla AM1.5

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

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

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

widmo $\Phi(\lambda)$ i Φ



Elektronovolt (eV)

Bardzo użyteczna jednostka energii w fizyce ciała stałego

1eV to energia potrzebna do przeniesienia elektronu w polu elektrycznym między punktami o różnicy potencjałów równej 1V

Aby zamienić 1eV na 1J korzystamy z równania:

$$1eV = 1.6 \cdot 10^{-19} C \cdot V = 1.6 \cdot 10^{-19} J$$

Aby obliczyć jakiej długości fali λ odpowiada foton o energii E , wyrażonej w eV, korzystamy z równania:

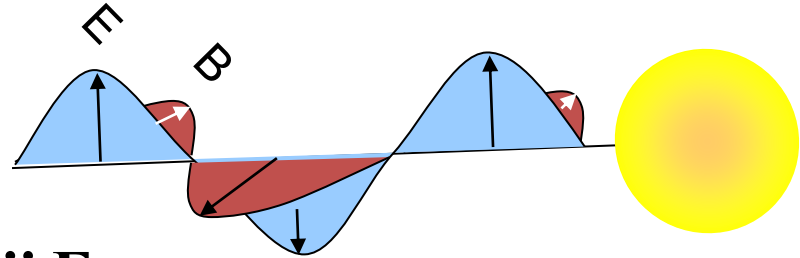
$$\lambda(\mu m) = \frac{1.24}{E(eV)}$$

$$\lambda(nm) = \frac{1240}{E(eV)}$$

Promieniowanie elektromagnetyczne

Dualizm korpuskularno-falowy światła

- Fala elektromagnetyczna
- Strumień fotonów o energii E_F :



$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$E_F = \frac{hc}{\lambda}$$

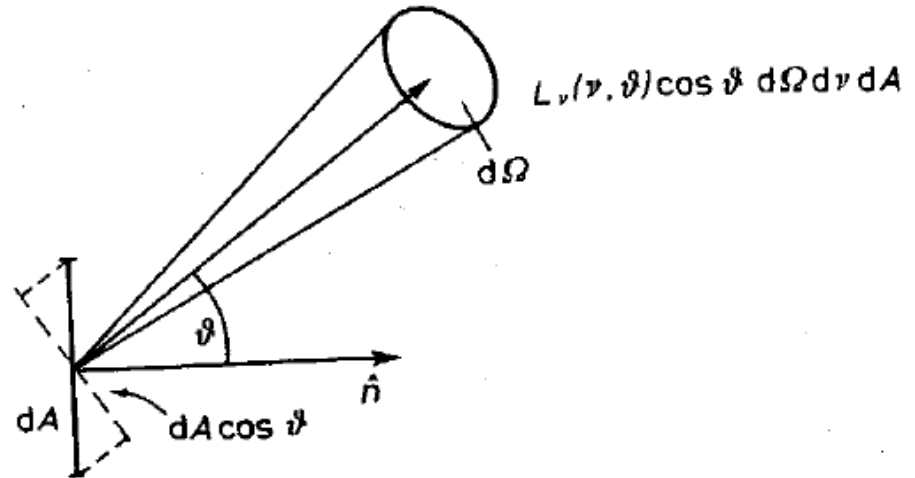
Przykład 2

Jaka jest energia fotonów światła, którego długość fali w szkle o współczynniku załamania $n = 1.5$ wynosi 450nm ? $h = 6.63 \cdot 10^{-34}\text{Js}$, $c = 3 \cdot 10^8\text{m/s}$.

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 \hat{n} do powierzchni źródła.

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

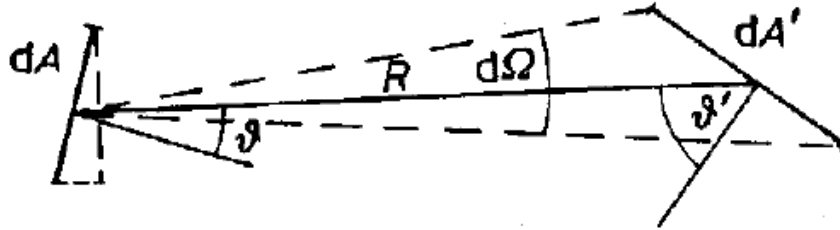


Powierzchnia źródła widziana pod kątem ϑ jest równa $dA \cos \vartheta$. Moc promieniowania dP emitowana przez to źródło do jednostkowego kąta bryłowego $d\Omega$:

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

Prawo Lamberta cd.

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



Element dA' jest widziany ze źródła w kącie bryłowym $d\Omega$. Zatem dla $R^2 \gg dA$, dA' moc promieniowania padającego na element dA' (po zsumowaniu po częstościach) 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/(m²sr)**
- **Ból oka i możliwość jego uszkodzenia – 10^6 W/(m²sr).**
- **Niebo w noc bezksiężycową - 10^{-4} W/(m²sr).**
- **Kartka papieru przy oświetleniu ok. 30 lx - 10 W/(m²sr).**
- **Włókno żarówki – 10^6 W/(m²sr).**
- **Tarcza słoneczna – 10^9 W/(m²sr).**

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 częstotliwościach światła ν oraz po pełnym kącie bryłowym:

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

Widmowa moc promieniowania emitowanego przez źródło :

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

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:

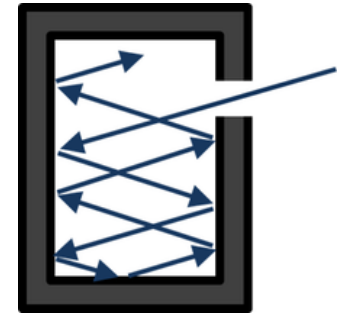
$$M = \pi L$$

- 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 ($\cos\theta = 1$)
- źródło o luminancji L
- detektor jest widziany ze źródła pod kątem aperturowym u .



Strumień promieniowania docierającego do detektora o powierzchni dA :

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

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

$$P = \frac{M dA dA_{\text{źr}}}{\pi x^2}$$

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 – Boltzmannna jest równa:

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

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

$$P = \frac{MdAdA_{\dot{z}r}}{\pi x^2} = \frac{\sigma(T^4 - T_0^4)dAdA_{\dot{z}r}}{\pi x^2}$$

$$S_D = \frac{U_D}{P} = \frac{U_D \cdot \pi x^2}{\sigma(T^4 - T_0^4)dAdA_{\dot{z}r}}$$