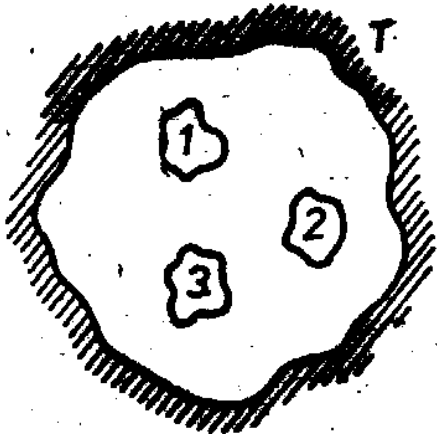


# Wykład II

## **Widmo promieniowania słonecznego**

# Prawo Kirchhoffa

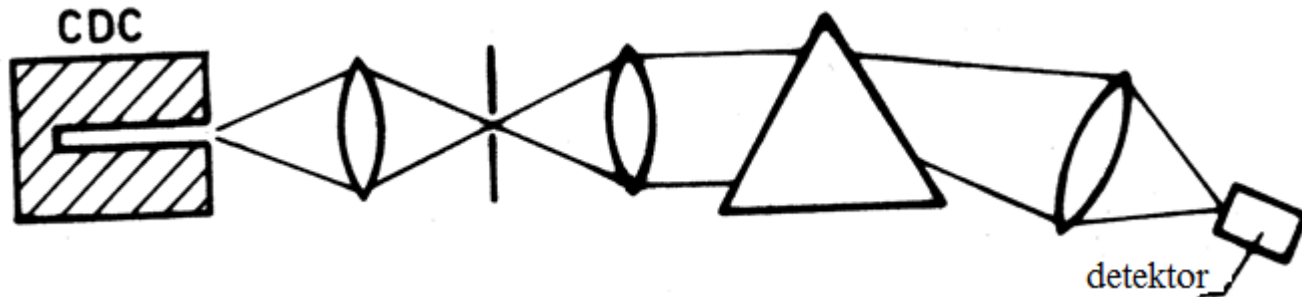


Stosunek spektralnej zdolności emisyjnej do spektralnej zdolności absorpcyjnej ciał jest taką samą funkcją długości fali i temperatury, niezależną od rodzaju ciała:

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

Dla CDC,  $a_{\lambda}(\lambda, T) = 1$  i zgodnie z prawem Kirchhoffa zdolność emisyjna CDC jest poszukiwaną funkcją  $f(\lambda, T)$ .

# Układ do pomiaru $f(\lambda, T)$

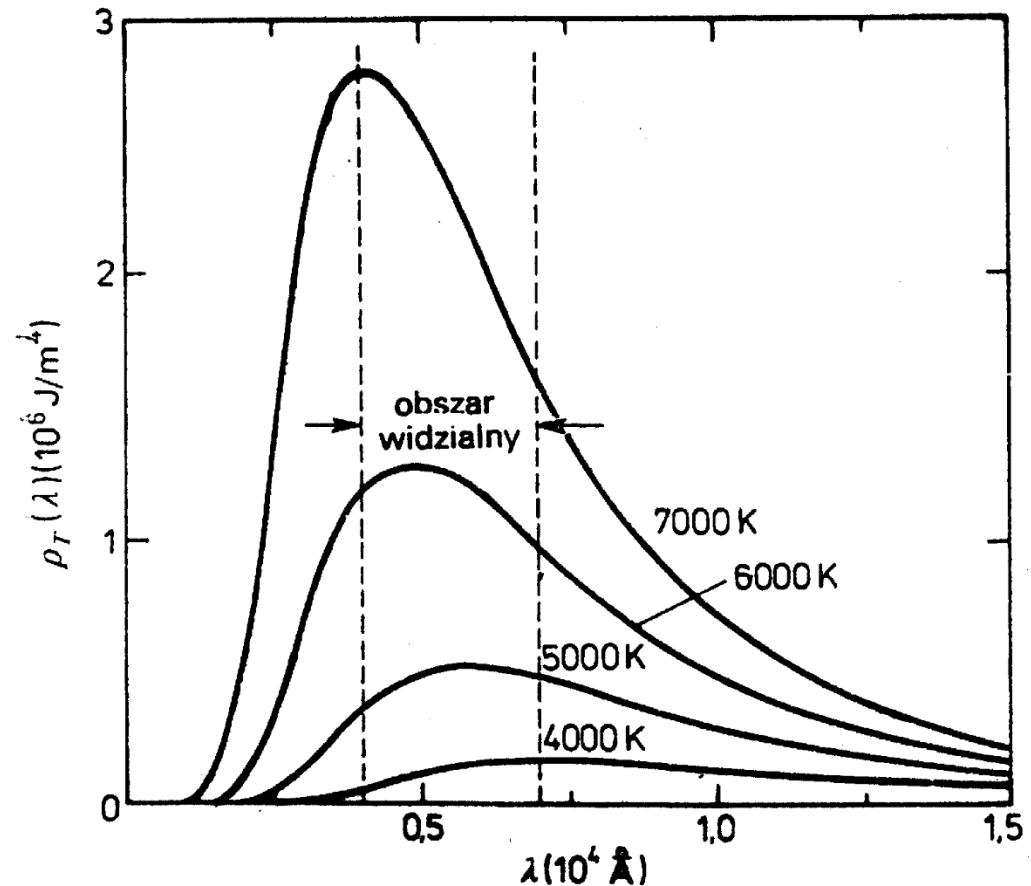


Pamiętamy, że

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

$e(\lambda, T)$ - 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-Boltzmannna:

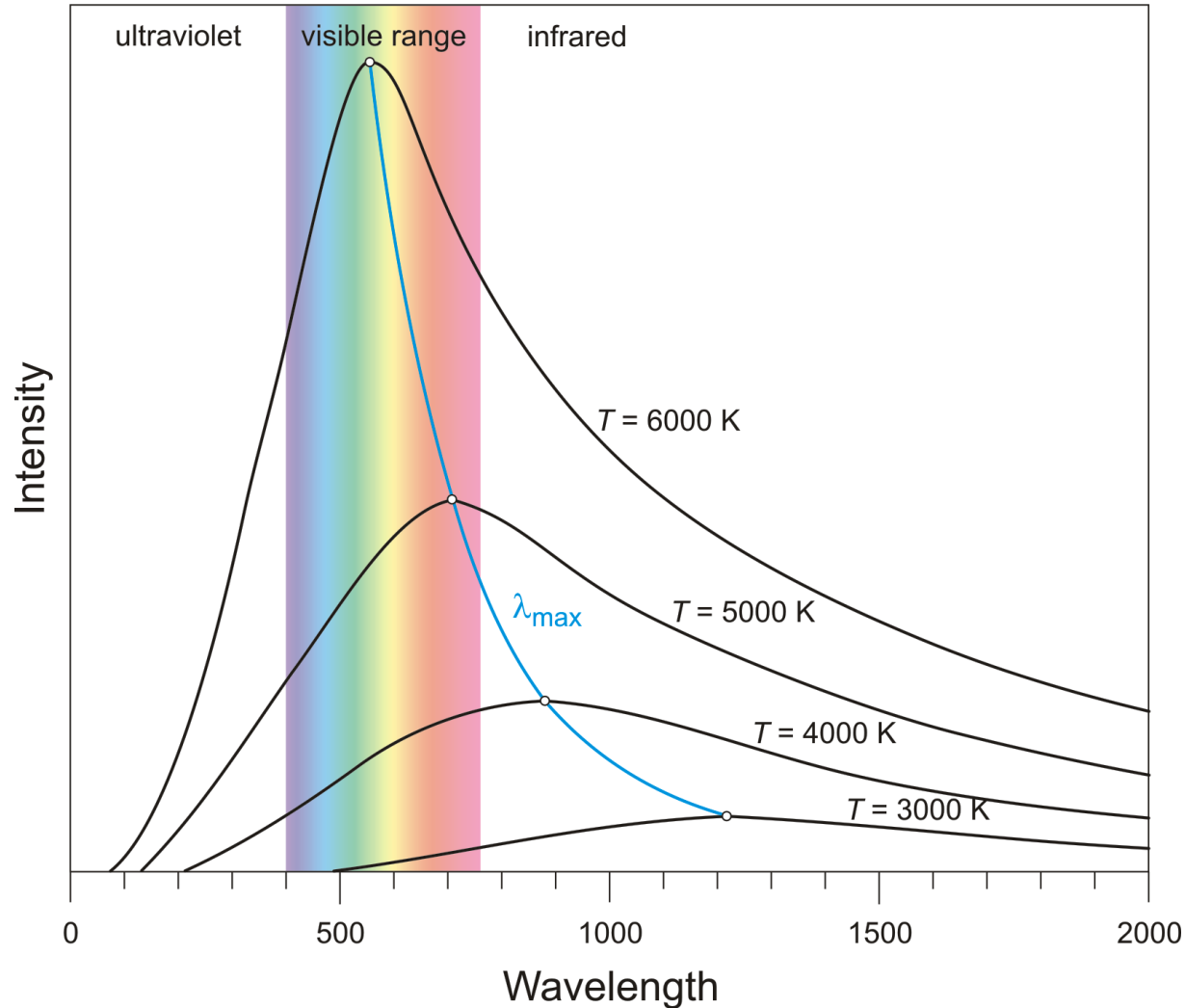
$$M(T) = \int_0^{\infty} e(\lambda, T) d\lambda = \sigma(T^4 - T_0^4)$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

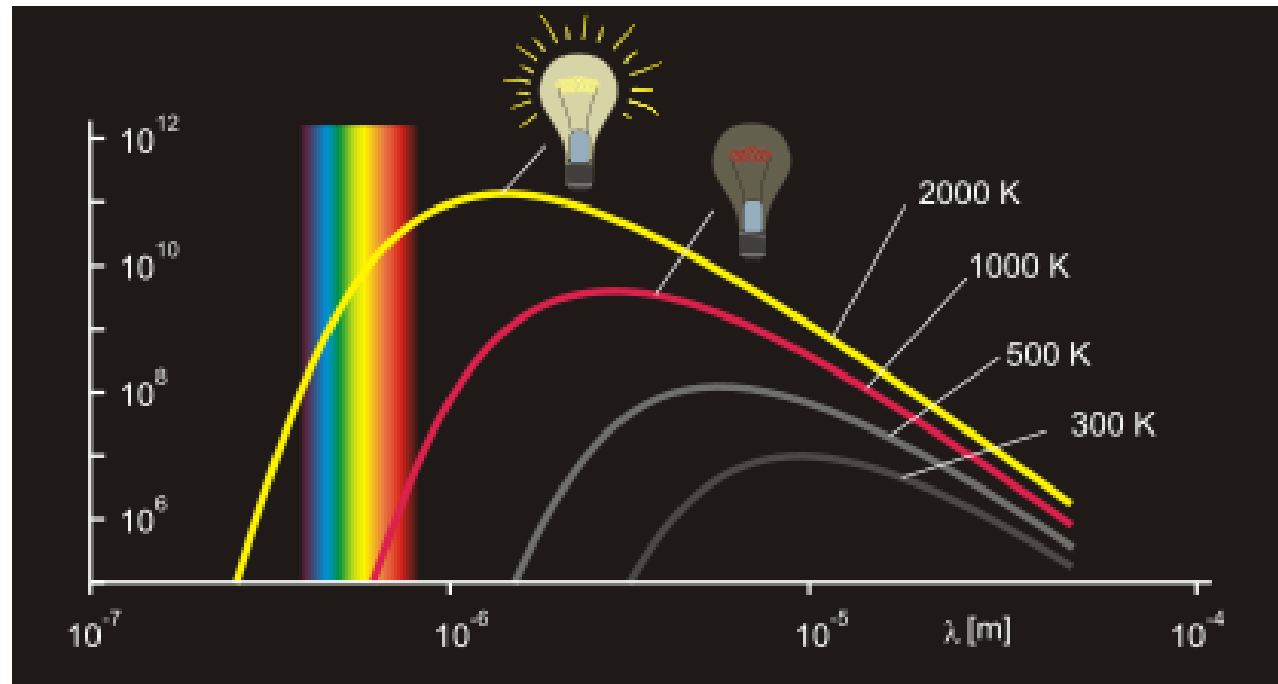
– stała Stefana-Boltzmannna

- Prawo Wiena:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 \mu m K$$



# CDC



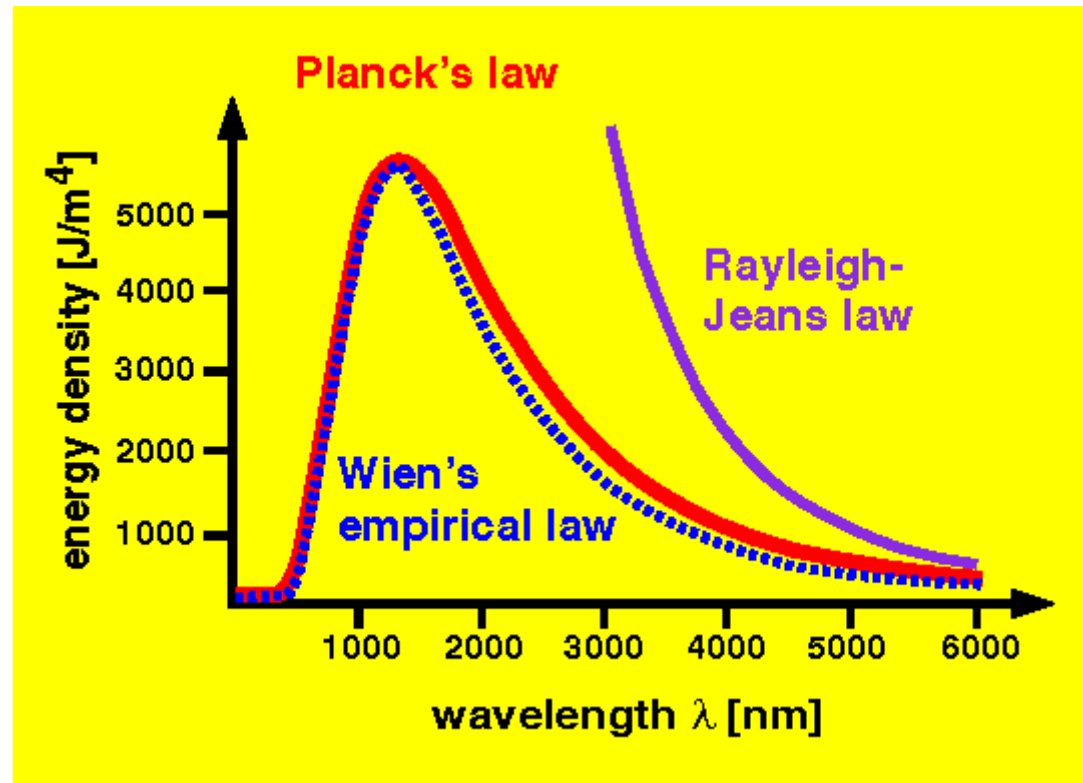
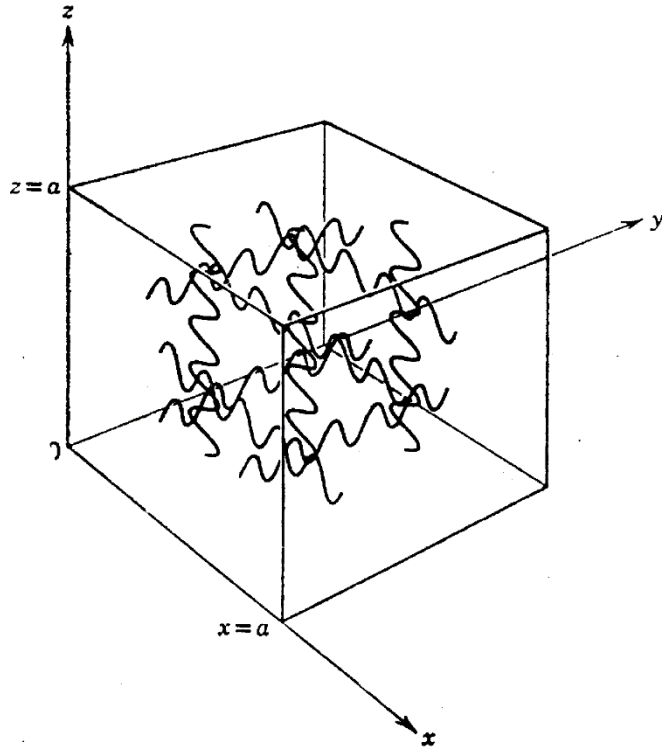
- Prawo Wiena:  $\lambda_{max} \cdot T = 2898 \mu\text{m K}$

# Prawo Wien

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

Temperatura		Długość fali [ $\mu\text{m}$ ]	Emiter
$^{\circ}\text{K}$	$^{\circ}\text{C}$		
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):**

$$\varepsilon_n = nh\nu \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

# Widmo Słońca

Widmo  
Słońca

Absorpcja  
światła

Kreacja  
par  
elektron  
- dziura

Dryft/dyfuzja  
nośników

Separacja  
nośników

Zbieranie  
nośników

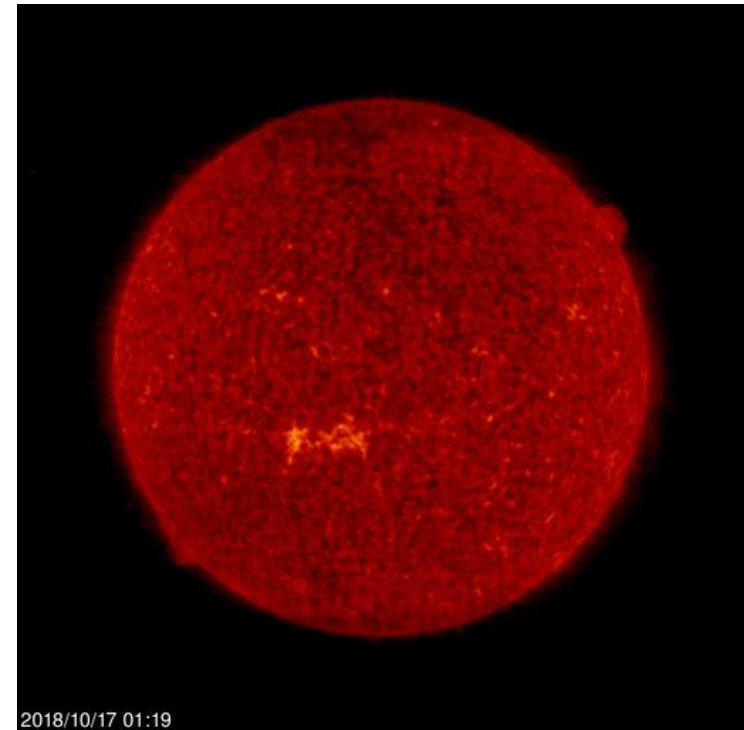
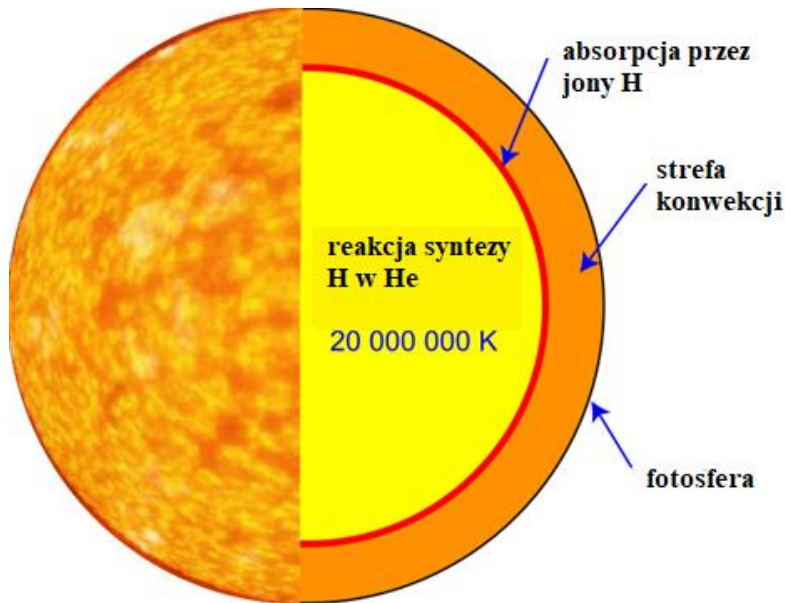
**Wydajność konwersji energii słonecznej:**

$$\eta = \frac{E_{wy}}{E_{we}}$$

$$\eta_{całkowite} = \eta_{absorpcja} \times \eta_{kreacja} \times \eta_{dryft/dyf} \times \eta_{separ} \times \eta_{zbierania}$$

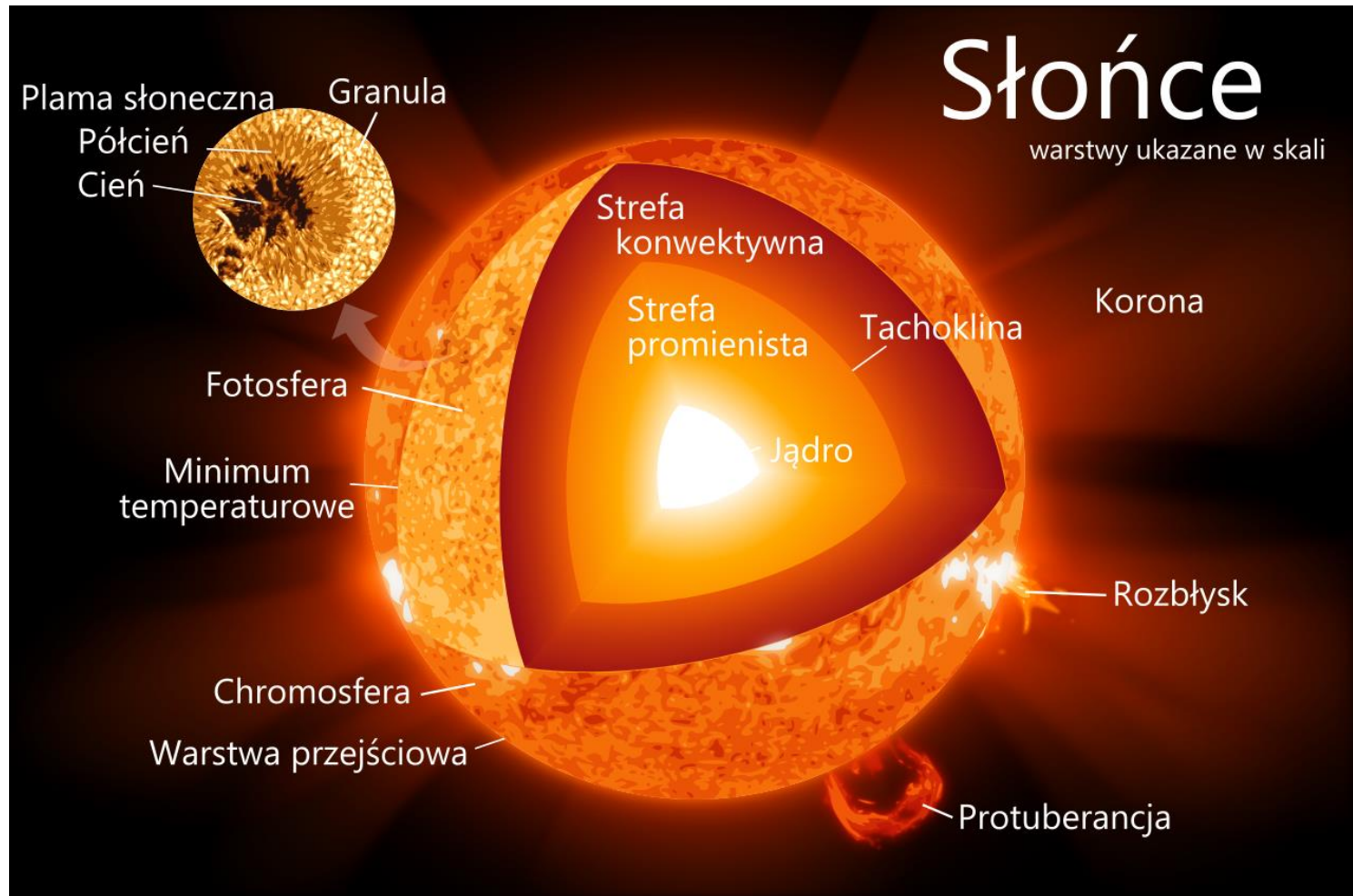


# Słońce



Gorąca sfera gazu, temp. we wnętrzu ok.  $20 \cdot 10^6$  K. Wysoka temperatura jest wynikiem reakcji syntezy wodoru w hel w jądrze Słońca. Promieniowanie z wnętrza Słońca nie wydostaje się na zewnątrz, ponieważ jest absorbowane przez warstwę jonów wodoru. Ciepło jest transportowane na zewnątrz drogą konwekcji cieplnej.

# Słońce



# Słońce

**Odległość Ziemia- Słońce - 149,600,000 km (jednostka astronomiczna, AU)**

**Średnica - 1,392,000 km ( $109 \times$  średnica Ziemi)**

**Masa -  $1.993 \times 10^{27}$  kg ( $332,000 \times$  masa Ziemi)**

**Gęstość - (w centrum)  $>105$  kg/m<sup>3</sup>**

**Ciśnienie - (w centrum)  $> 1$  miliard atm**

**Temperatura - (w centrum)  $\sim 20,000,000$  K**

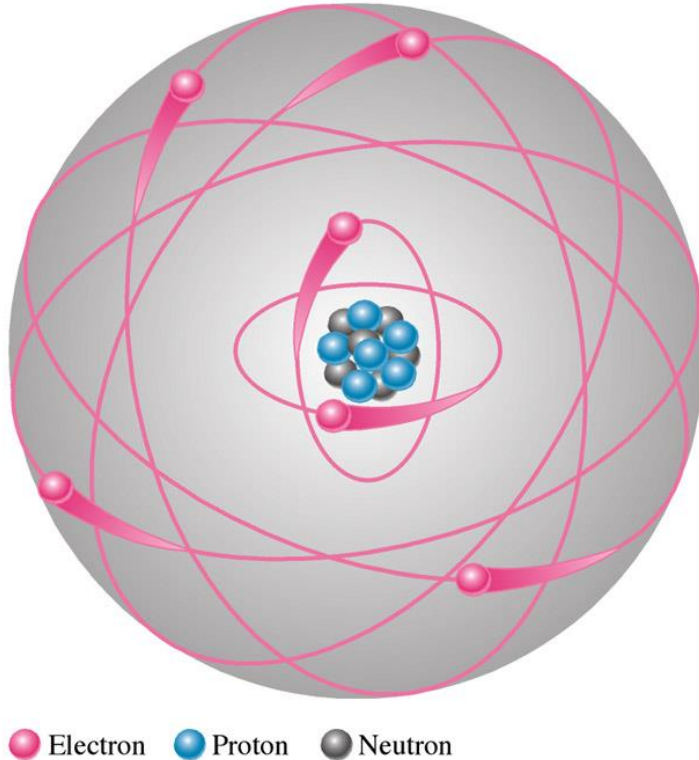
**Temperatura - (na powierzchni)  $\sim 6,000$  K**

**Moc promieniowania -  $3.8 \times 10^{26}$  W**

**Emitancja Słońca –  $64 \times 10^6$  W/m<sup>2</sup>**

**Moc promieniowania, które dociera do Ziemi -  $1.7 \times 10^{18}$  W**

# Model atomu Bohra



**Niels Bohr - 1915**

- elektrony krążą wokół jądra
- jądro jest zbudowane z:
  - i) dodatnich protonów
  - ii) neutralnych neutronów

**Liczba atomowa = liczbie protonów w jądrze**

**Kolejność atomów w tablicy układu okresowego wynika z liczby atomowej**

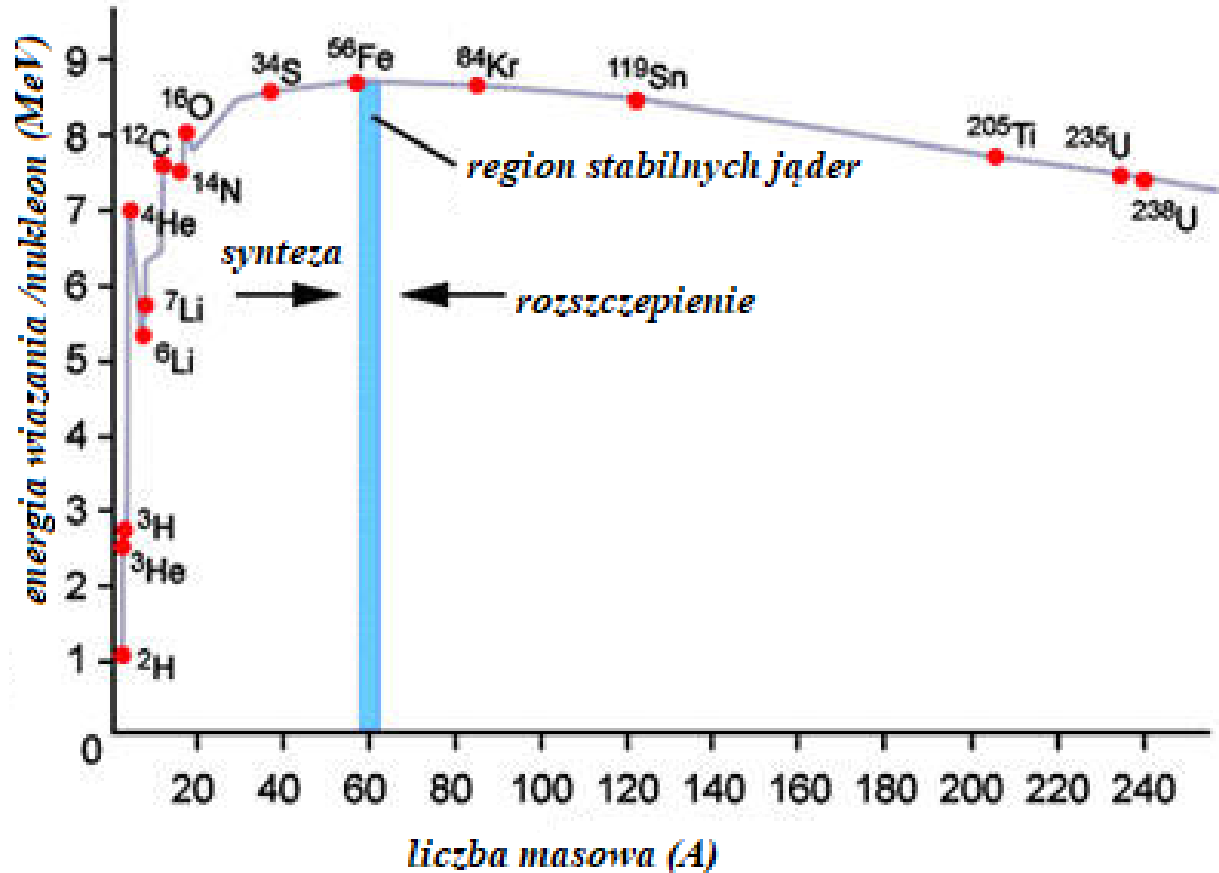
# Energia wiązania jądra



**A** – liczba masowa  
**Z** – liczba atomowa

$A$  = liczba protonów +  
liczba neutronów

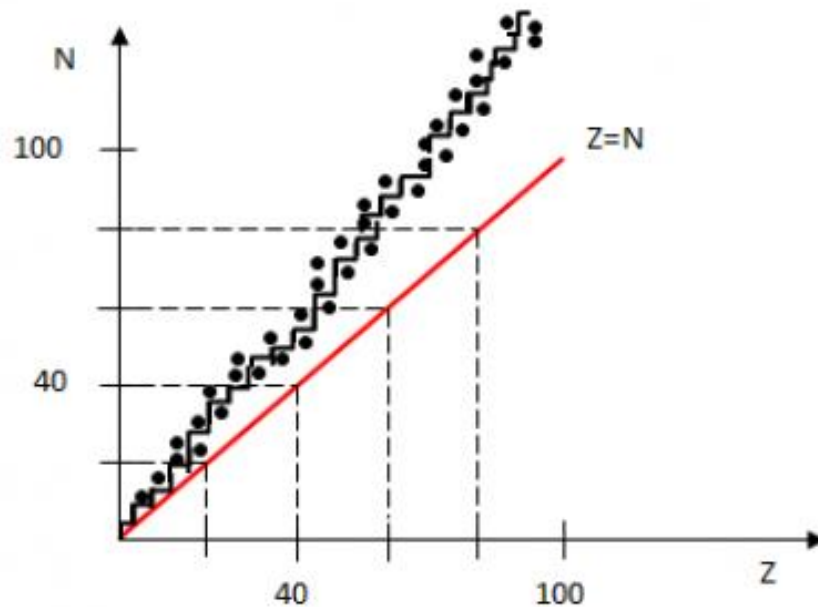
$Z$  = liczba protonów



**Zysk energetyczny:**

- reakcja syntezy jąder lekkich
- reakcja rozszczepienia jąder ciężkich

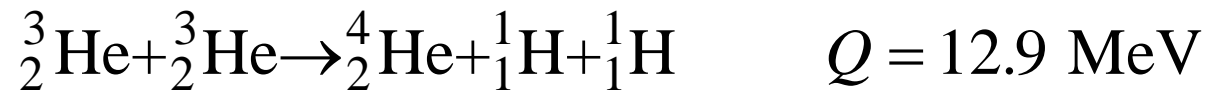
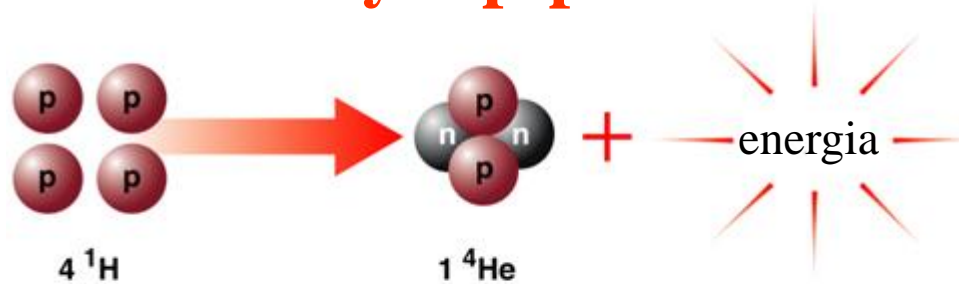
# Ścieżka stabilności jąder atomowych



Obecnie znanych jest ok. 2000 różnych **jąder atomowych**, jednak tylko niecałe 300 zalicza się do **jąder trwałych**. Wszystkie **jądra** o liczbie atomowej przekraczającej wartość **83** są nietrwałe.

# Synteza termojądrowa na Słońcu

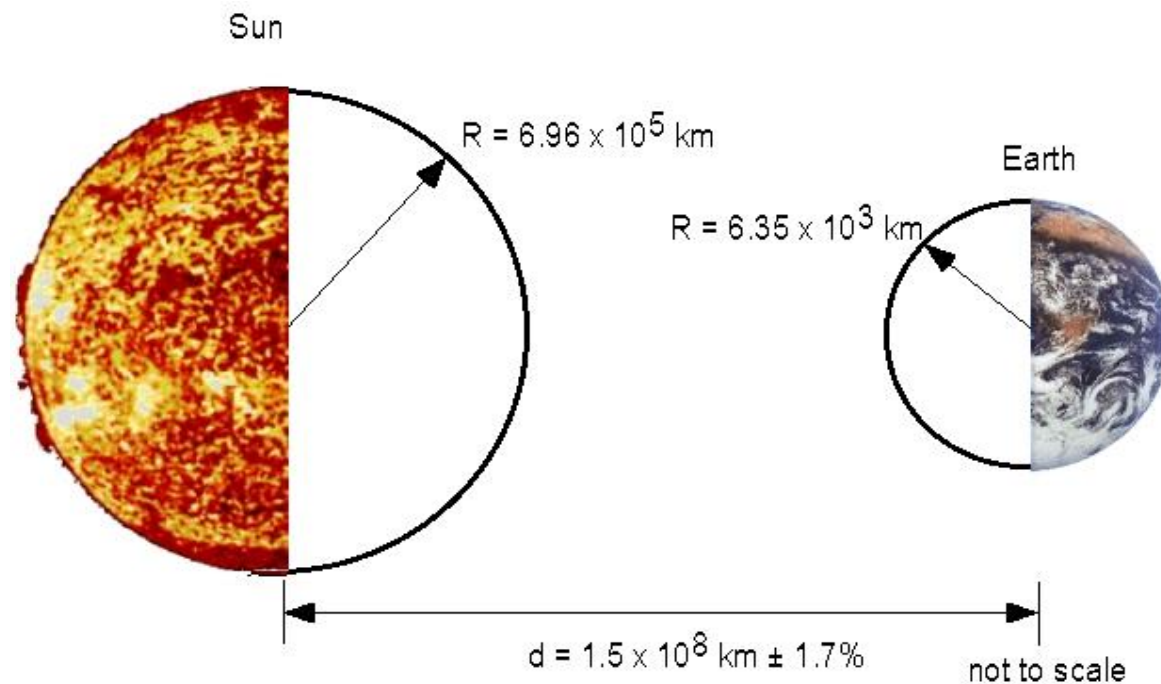
## Cykl p-p



Masa 4 protonów jest większa od masy jądra He - defekt masy  $\Delta m$

$$Q = E = \Delta mc^2$$

# Nateżenie napromieniowania w kolejnych dniach roku poza atmosferą (AMO)



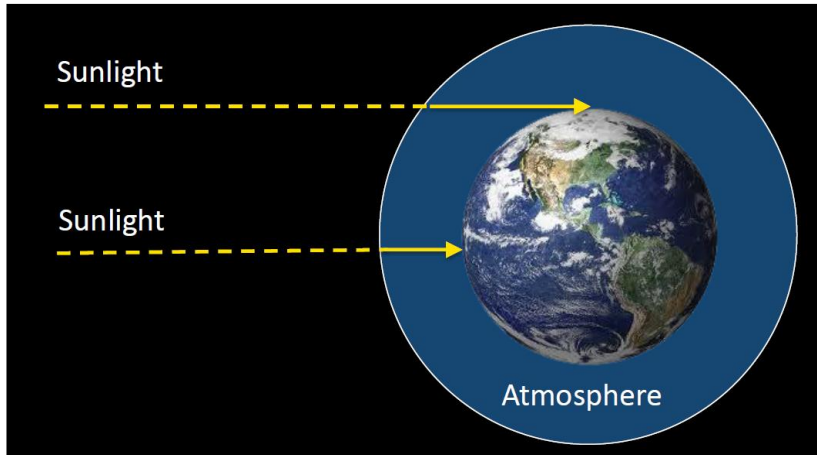
$$\frac{M}{M_Z} = 1 + 0.033 \cos\left[\frac{360(n-2)}{365}\right]$$

$$M_Z = 1363 \text{ W/m}^2$$

$n$  - kolejny dzień w roku



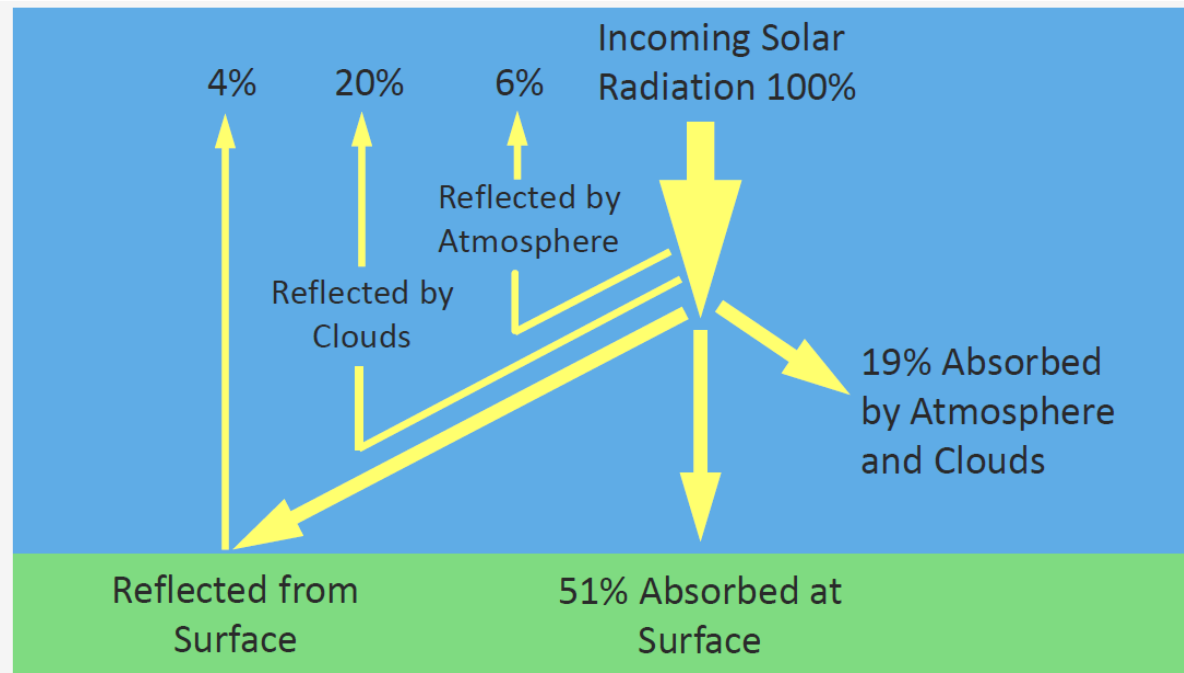
# Atmosfera



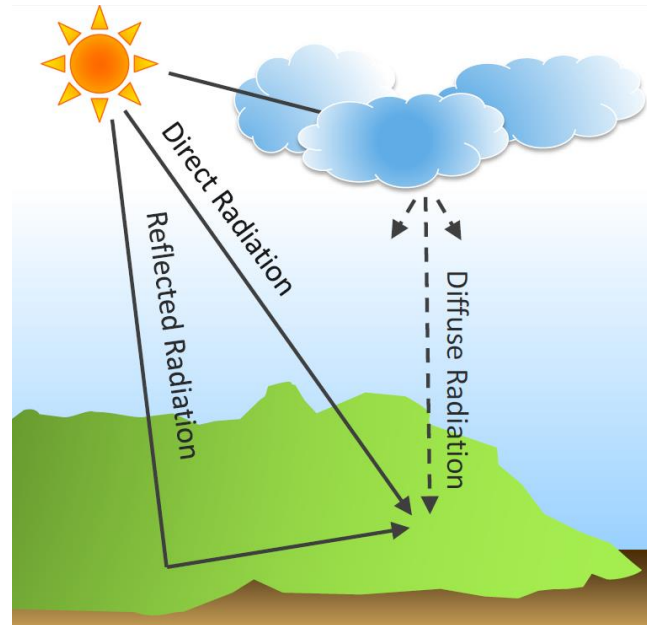
Niebieskie niebo w dzień: światło czerwone nie ulega rozproszeniu, niebieskie ma długość fali porównywalną z rozmiarami cząsteczek powietrza, dlatego jest rozprasane we wszystkich kierunkach.

## Zachód Słońca:

Czerwone niebo – światło musi pokonać grubszą warstwę atmosfery niż w dzień. Niebieskie światło ulega rozproszeniu, przez atmosferę przedostaje się tylko światło czerwone.



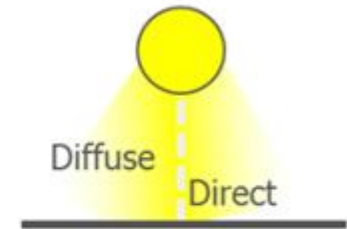
# Promieniowanie słoneczne padające na panel słoneczny



**Całkowite natężenie napromieniowania:**

$$G = G_{normalne} + G_{dyfuzyjne} + G_{odbite}$$

$$G_{odbite} = \text{albedo}$$



Globalne napromieniowanie horyzontalne GHI

$$GHI = DHI + DNI \cos(\vartheta_z)$$

Napromieniowanie dyfuzyjne horyzontalne DHI

Napromieniowanie normalne DNI

$\vartheta_z$  – Kąt między pozycją Słońca i zenitem

1. Piranometr – mierzy natężenie napromieniowania GHI FOV 180°
2. Piranometr z osłoną na część środkową – mierzy DHI
3. Pirheliometr – mierzy napromieniowanie normalne (kierunkowe) FOV 5°

FOV- pole widzenia (ang. *field of view*)

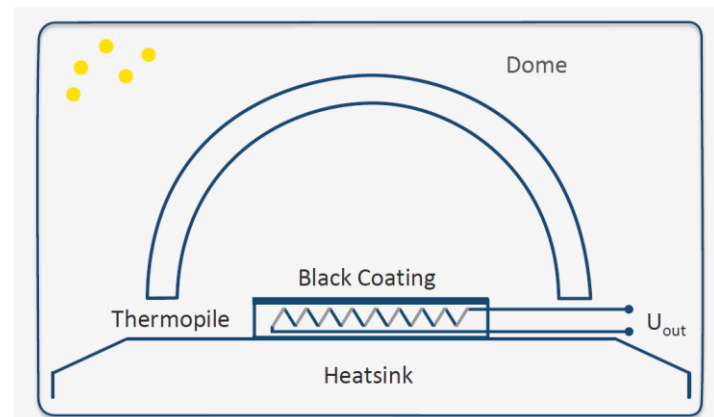
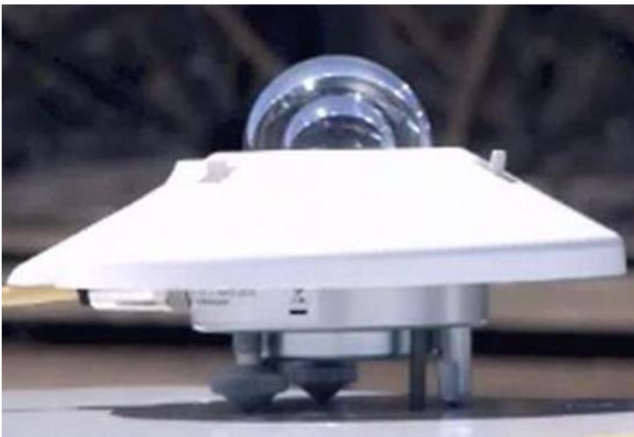
# Pirheliometr

FOV - 5°

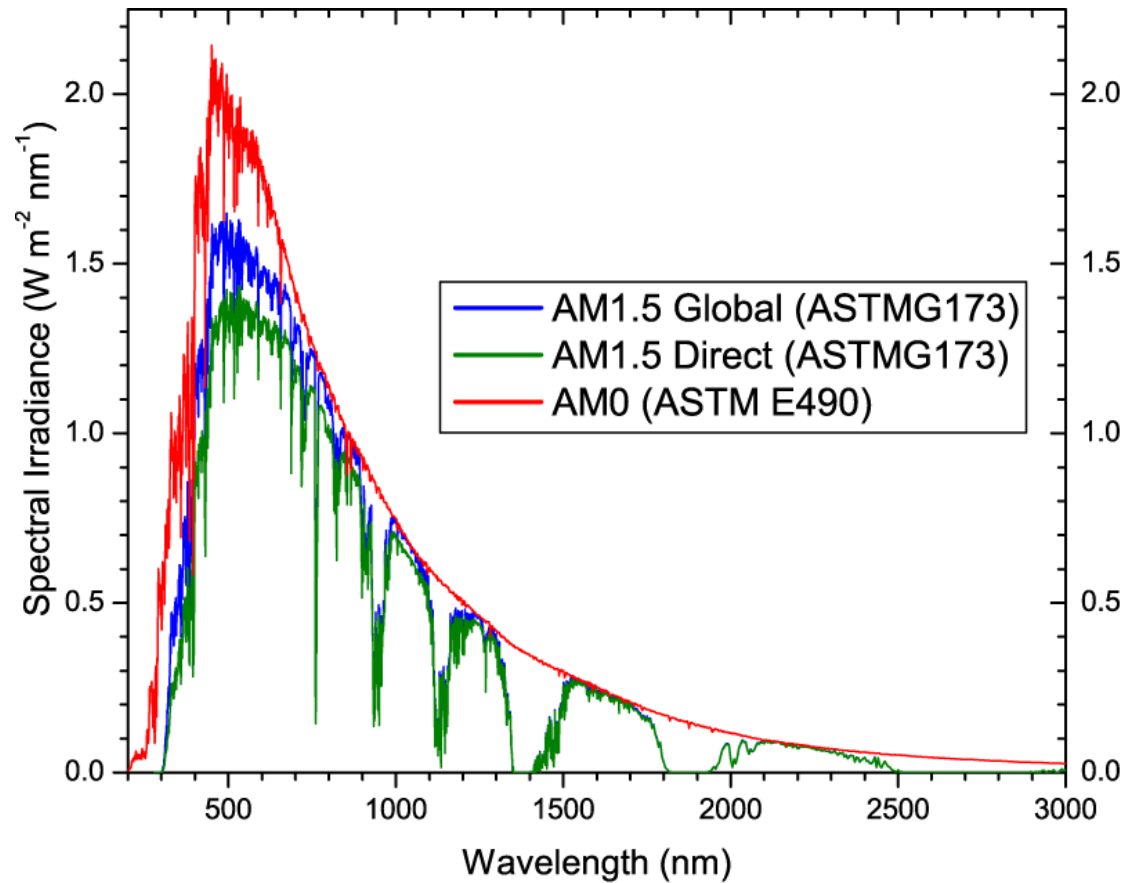


Służy do pomiaru promieniowania padającego pod określonym kierunkiem.  
Jest skierowany zawsze na Słońce: umocowany na dwuosiowym uchwycie, który śledzi Słońce.

# Piranometr



# Air Mass



Spectral irradiance – spektralne natężenie napromieniowania

ASTM - American Society for Testing and Materials

SMARTS: Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine

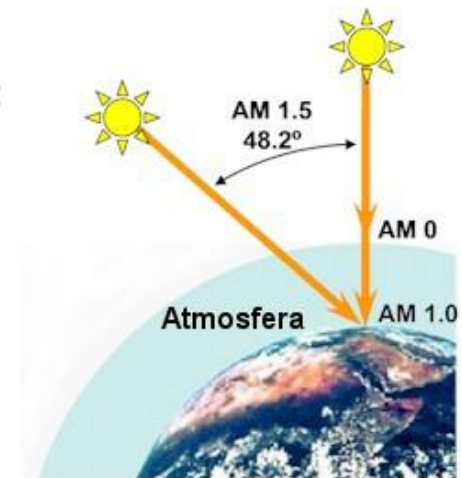
# ASTM

Standardowe rozkłady spektralne napromieniowania słonecznego Ziemi zostały opracowane przez Amerykańskie Towarzystwo ds. Testowania i Materiałów (ASTM), we współpracy z reprezentantami przemysłu PV, oraz laboratoriami rządowymi:

- **ASTM 1.5 Global** - rozkład spektralny standardowy całkowitego natężenia napromieniowania na płaską powierzchnię (pole widzenia  $\pi$ );

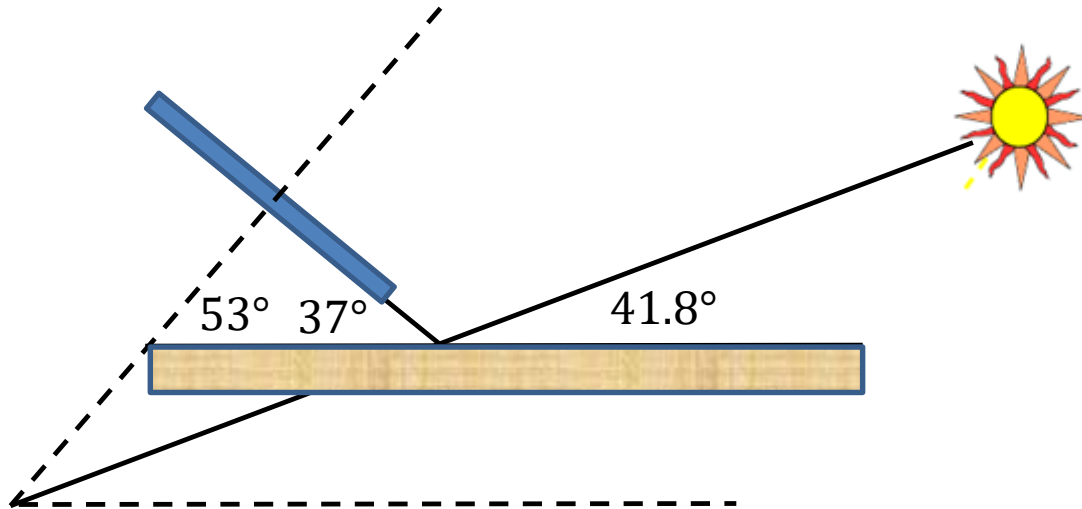
Wg tego standardu, powierzchnia, na którą pada światło, jest nachylona pod kątem  $37^\circ$  względem równika, ustawiona naprzeciw tarczy słonecznej (tzn. normalna do powierzchni jest skierowana na Słońce, pod kątem  $41.81^\circ$  względem normalnej do powierzchni Ziemi); całkowite natężenie  $\frac{1000W}{m^2}$ .

- **ASTM 1.5 Direct** - rozkład spektralny standardowy składowej prostopadłej natężenia + otoczenie Słońca (średnica dysku  $5^\circ$ , bez centrum Słońca o średnicy  $0.5^\circ$ ); całkowite natężenie  $\frac{900W}{m^2}$ .



# ASTM 1.5 Global

- AM1.5, Słońce jest pod kątem  $41.8^\circ$  do horyzontu
- Ogniwo jest nachylone pod kątem  $37^\circ$  do horyzontu; zatem Słońce świeci pod kątem  $11.2^\circ$  do normalnej do powierzchni ogniwa.



$$53^\circ - 41.8^\circ = 11.2^\circ$$

# Standardowe warunki

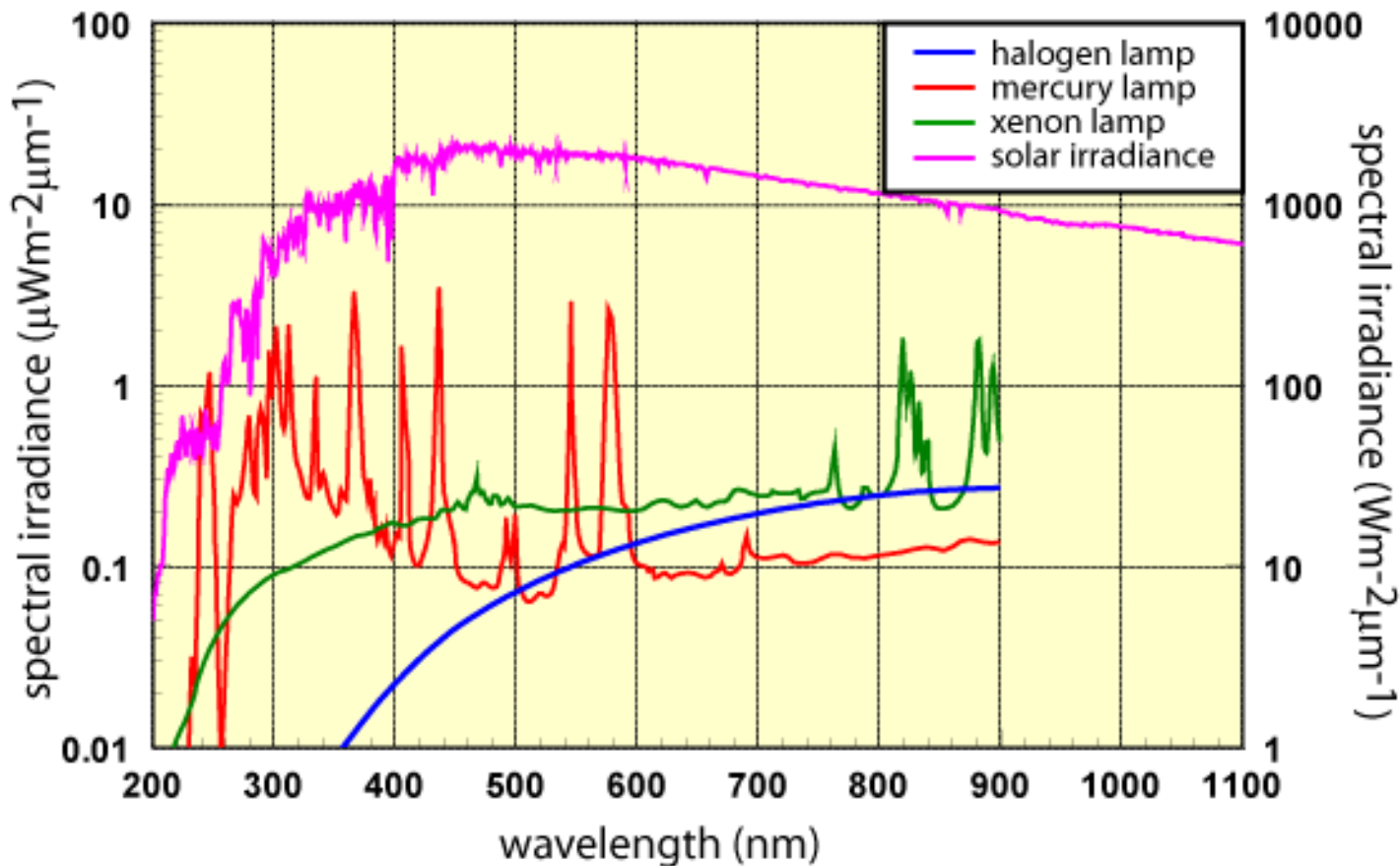
Ogniwa słoneczne i moduły fotowoltaiczne są produkowane przez wiele różnych firm i laboratoriów. Stosowane są różnorodne technologie wytwarzania fotoogniw. Dlatego jest niezwykle ważne aby zdefiniować warunki, które umożliwią porównanie różnych ogniw słonecznych i modułów fotowoltaicznych. Warunki te zwane są warunkami standardowymi (ang. Standard Test Conditions STC), dla których przyjęto:

- **Spektrum źródła światła AM1.5 i temperatura ogniwa 25°C. Spektrum AM1.5 jest zdefiniowane przez International Standard IEC 60904-3\*. To spektrum jest mierzone gdy kąt azymutalny wynosi 48.19°, przy czym brane jest pod uwagę światło słoneczne padające bezpośrednio, rozproszone oraz albedo. To ostatnie stanowi tę część promieniowania, która została odbita przez Ziemię.**
- **Całkowite natężenie napromieniowania spektrum AM1.5 wynosi 1000 W/m<sup>2</sup> i jest bliskie natężeniu które dociera do powierzchni Ziemi w bezchmurny dzień. STC i spektrum AM1.5 są używane na całym świecie w laboratoriach przemysłowych i badawczych. Moc generowana przez moduł PV w tych warunkach jest wyrażana w watach pik,  $W_p$ .**

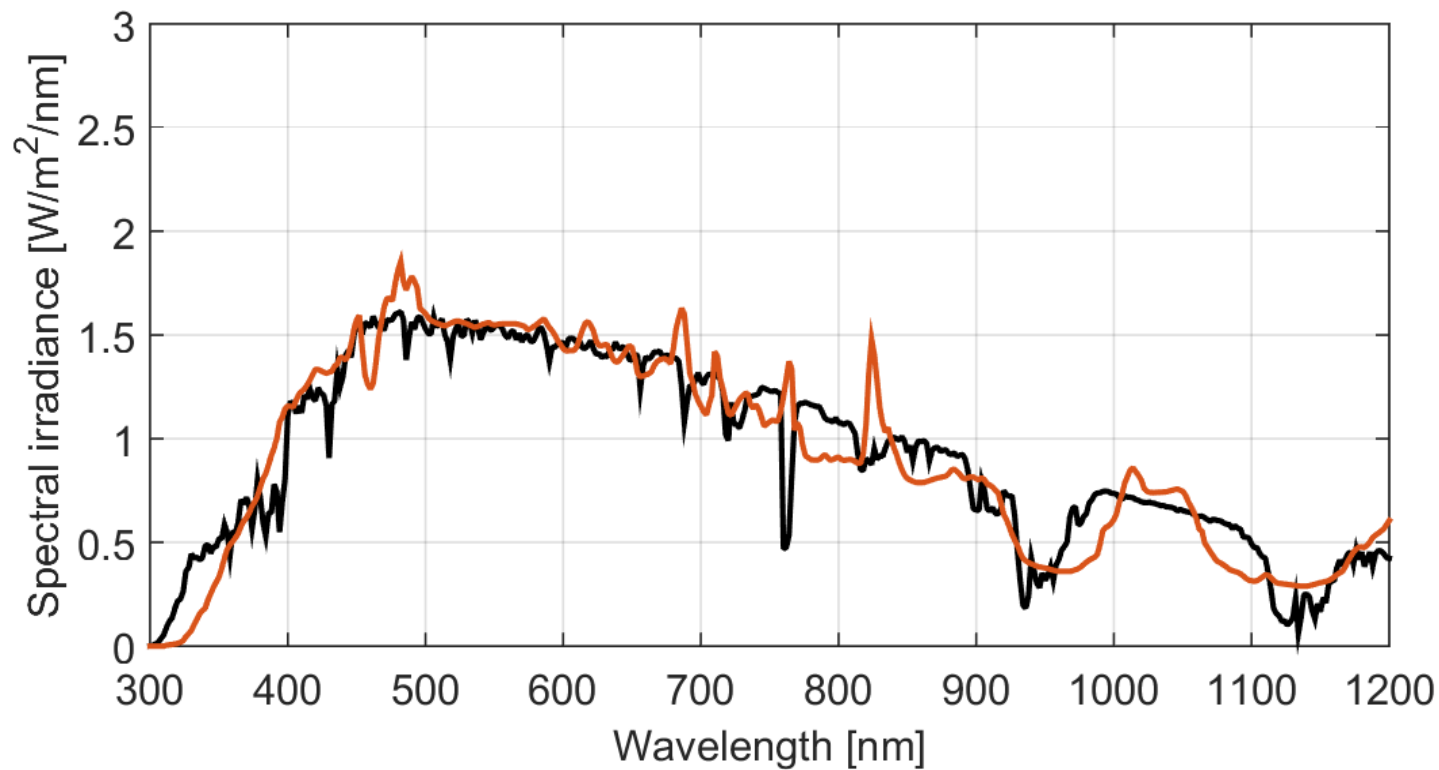
\* "IEC 60904-3, Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data." (2008).



# Widma zdolności emisyjnych różnych źródeł symulator Słońca



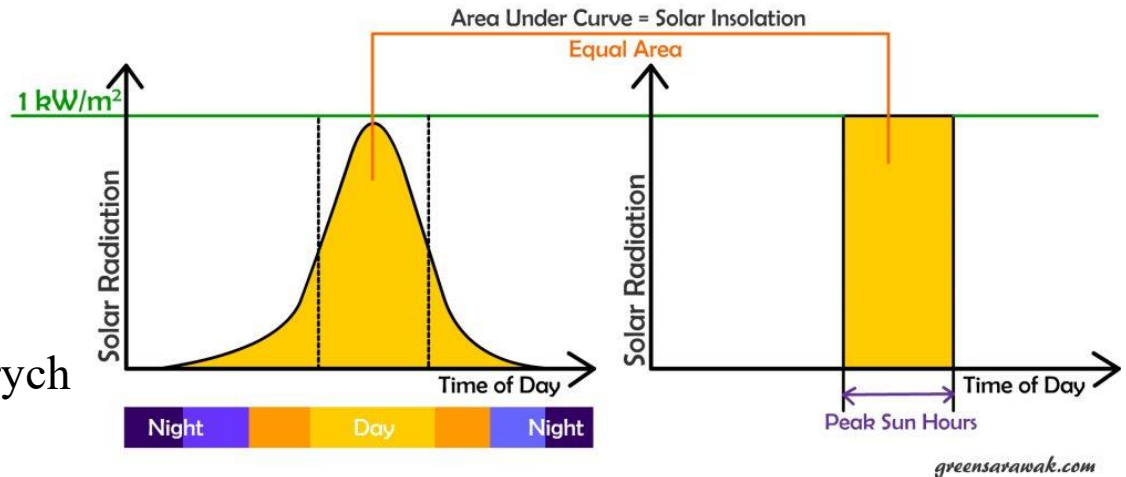
# Lampa ksenonowa z filtrami



# Nasłonecznienie ESH - Equivalent Sun Hour

$$ESH = \frac{\int_{\text{dzień}} Idt}{I_{AM1.5}} \left[ \frac{Wh}{\frac{m^2}{W}} \right] = [h]$$

ESH – ilość godzin, podczas których natężenie napromieniowania jest równe  $1000W/m^2$ .



ESH jest miarą ile energii słonecznej jest dostępne dziennie na danym obszarze. Na rysunku przedstawiono przykładowe natężenie napromieniowania na pewnym obszarze podczas jednego dnia. Pole pod wykresem odpowiada energii słonecznej przypadającej na metr kwadratowy na tym obszarze, inaczej – nasłonecznieniu. Aby obliczyć ESH, nasłonecznienie należy podzielić przez natężenie napromieniowania odpowiadające AM1.5, tj.  $1000 \frac{W}{m^2}$ . Pole pod wykresem, który przedstawia prostokąt o szerokości równej ESH, jest równe polu pod wykresem nasłonecznienia.

<https://footprinthero.com/peak-sun-hours-calculator>

- National Renewable Energy Laboratory PVWatts Calculator
- Polska – ESH = 2.67

# Jak obliczyć ESH

Przykład 1:

Roczne całkowite natężenie napromieniowania słonecznego w Johannesburgu jest równe  $\frac{2000kWh}{m^2}$  /rok. Oblicz ekwiwalentne dzienne nasłonecznienie (ESH).

$$ESH = \frac{\frac{2000kWh}{m^2 \cdot rok}}{1000W/m^2} = \frac{2000}{365} \left[ \frac{h}{dzień} \right] \cong 5,5 \left[ \frac{h}{dzień} \right]$$

Przykład 2: dzienne nasłonecznienie w Holandii = 2.7h

Jeśli moduł PV ma moc nominalną  $100W_p$  to

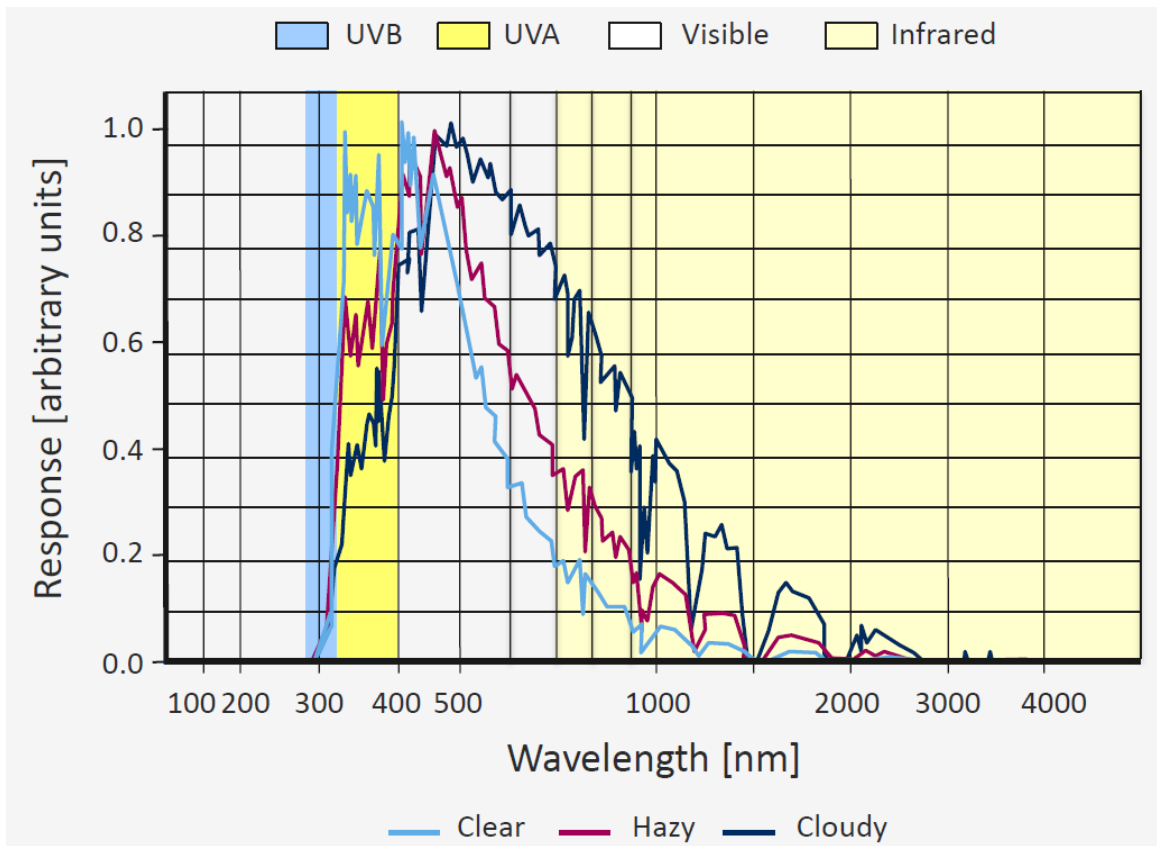
$$100W_p \cdot 2.7 h = 270 Wh$$

Wówczas moc generowana przez panel w ciągu roku jest równa

$$270 \cdot 365 \cong 98.6kWh$$

**Polska – ESH = 2.67h**

# Światło słoneczne w różnych warunkach atmosferycznych



czyste niebo    mgła    chmury

Jeśli są chmury, światło o krótszych falach jest silniej rozpraszane. Dlatego widmo w tym zakresie fal ma mniejszą intensywność.