

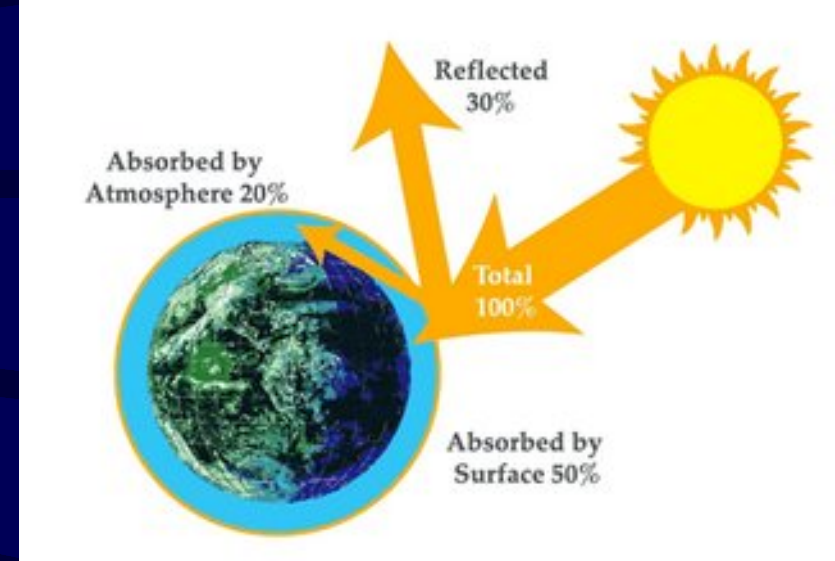
# Fizyka Pogody i Klimatu

## Wykład 2: Wprowadzenie do promieniowania w atmosferze

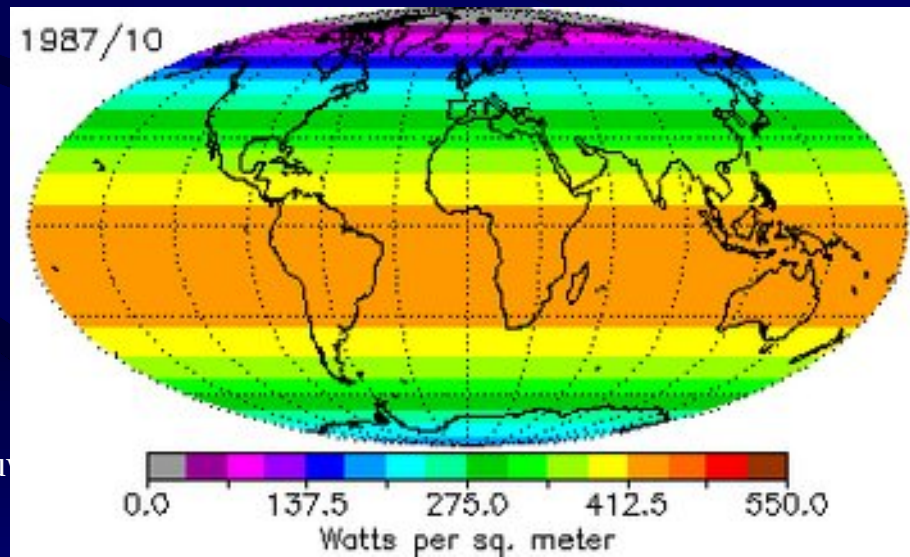
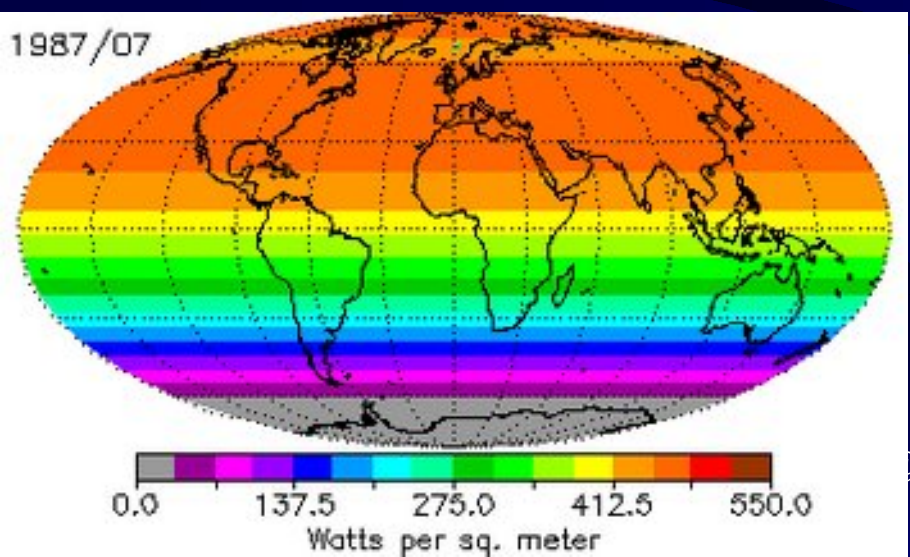
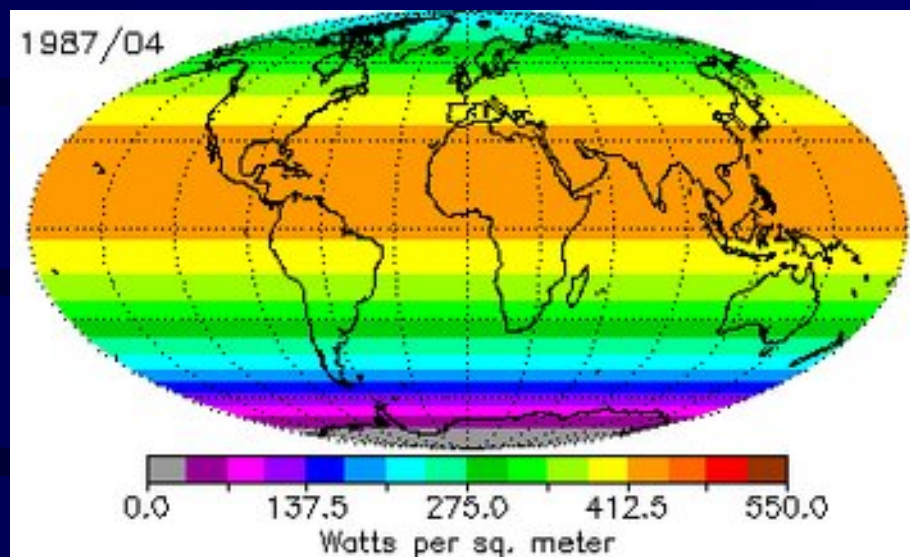
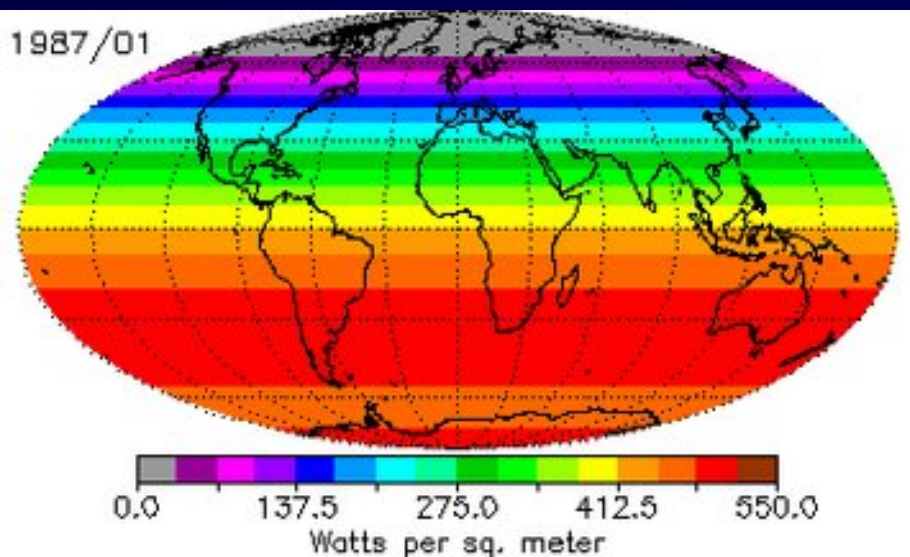
Krzysztof Markowicz  
Instytut Geofizyki  
Uniwersytet Warszawski  
[kmark@igf.fuw.edu.pl](mailto:kmark@igf.fuw.edu.pl)

# Słońce -główne źródło energii na Ziemi

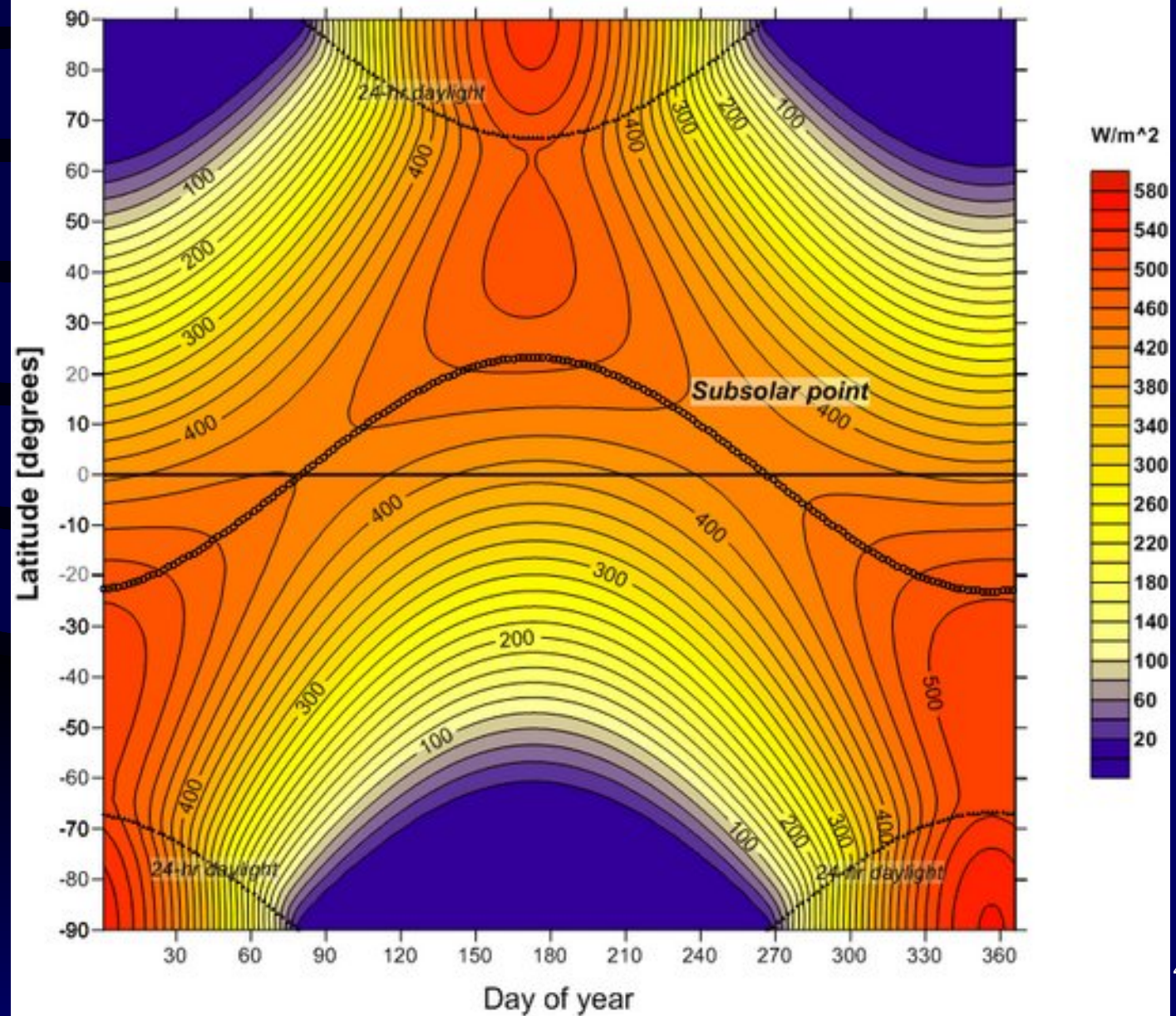
- Moc promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez fotosferę Słoneczną wynosi około  $3.827 \times 10^{26} \text{ W}$
- Tylko niewielka część tego promieniowania dociera do górnych granic atmosfery.
- Przy średniej odległości Ziemi od Słońca ( $149.6 \times 10^6 \text{ km}$ ) moc promieniowania słonecznego na górnej granicy atmosfery wynosi około  $1362 \text{ W/m}^2$ . Wielkość ta zwana jest **stałą słoneczną**.
- Ilość energii docierającą od Słońca zmienia się ze względu na zmiany odległości Ziemia-Słońce ( $\pm 3.3\%$ ) oraz aktywność Słońca ( $0.1\%$ ).



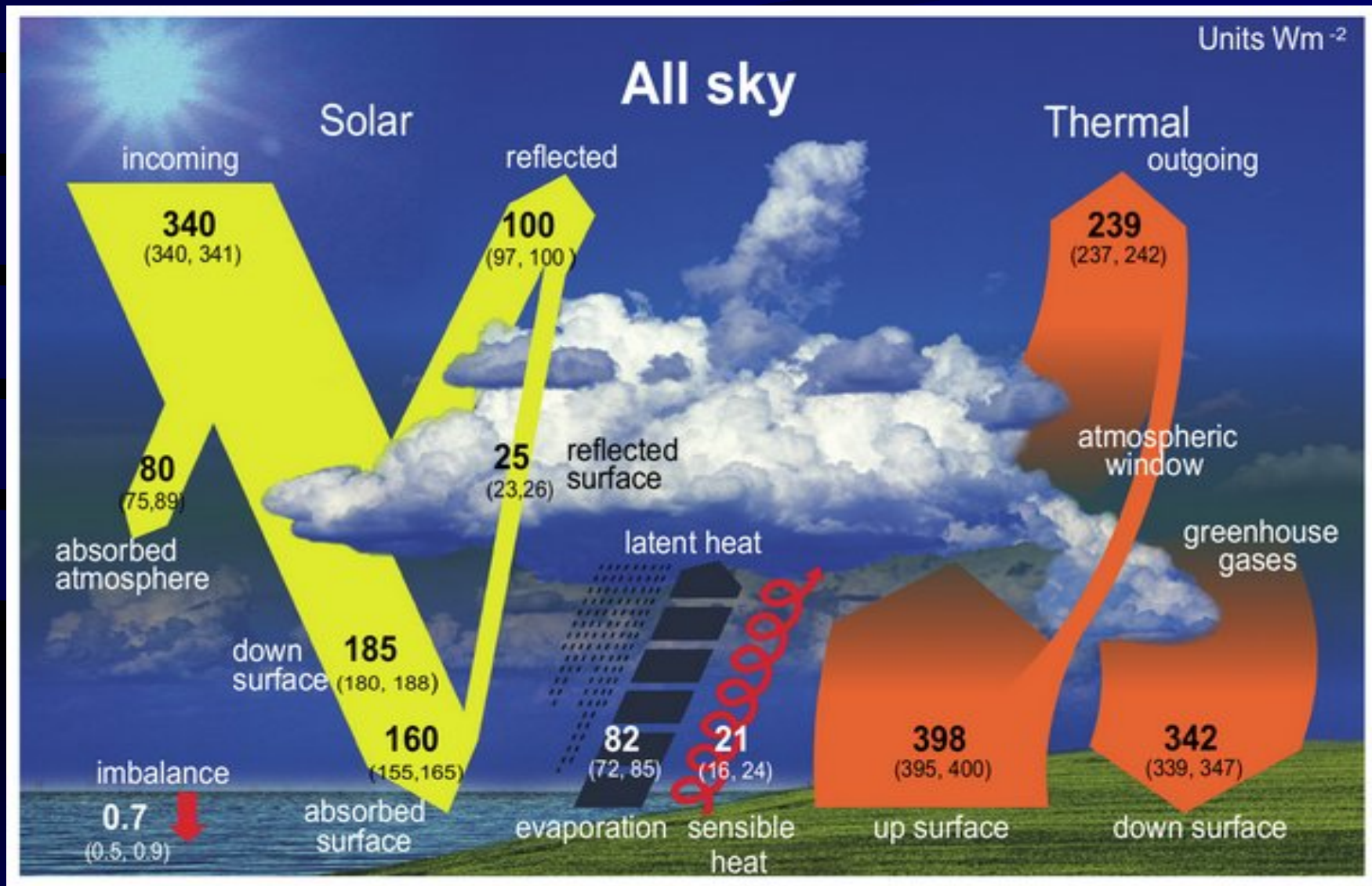
# Strumień promieniowania słonecznego dochodzący do atmosfery w różnych porach roku.

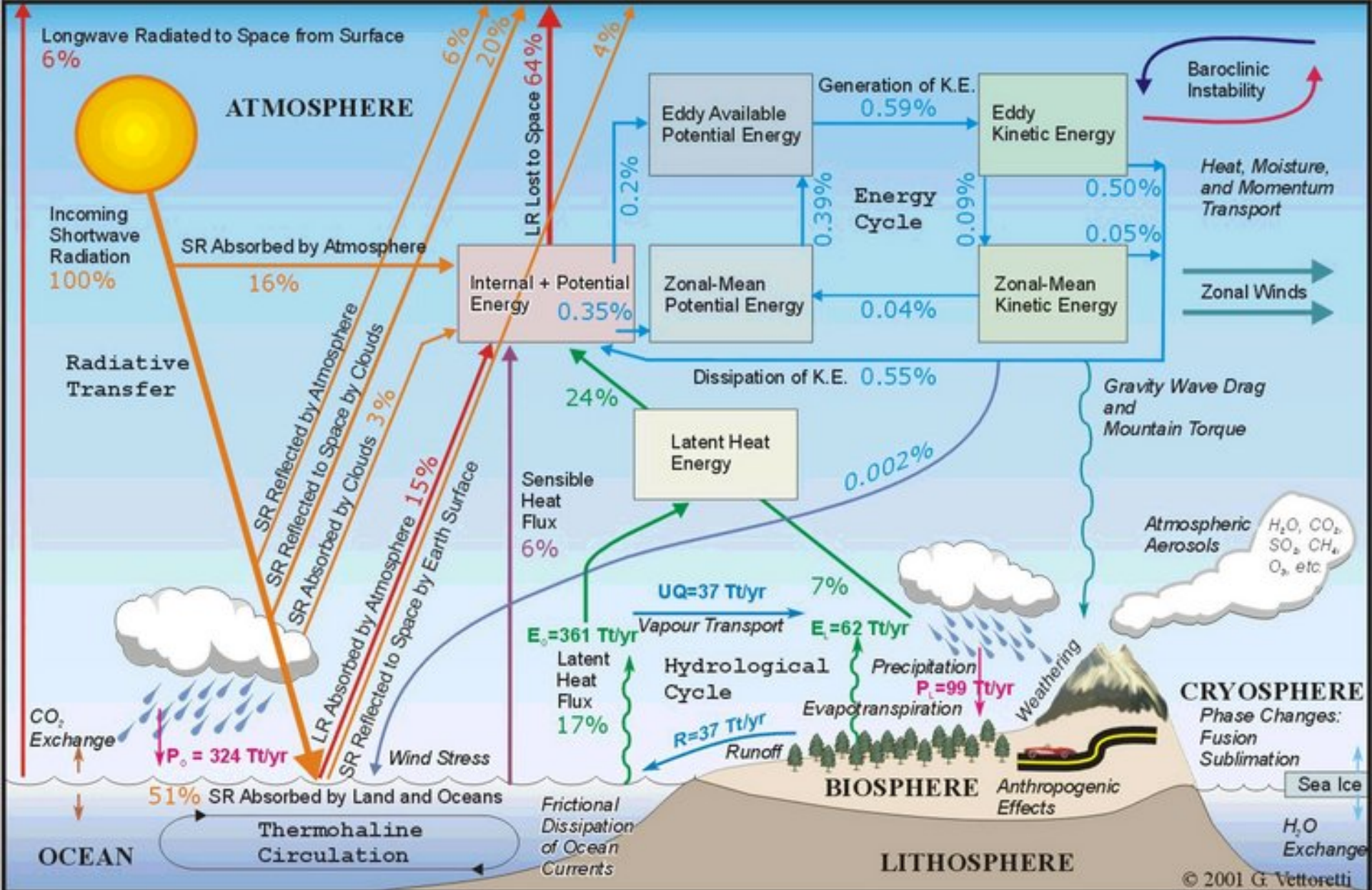


Extra-atmospheric irradiance in Watts per square meter  
as a function of season and latitude  
for a solar constant of  $1370 \text{ Wm}^{-2}$



# Uśredniony bilans energii systemu klimatycznego w latach 2005-2015. Wartości w $\text{W/m}^2$ .





Strumienie energii pomiędzy powierzchnią Ziemi, atmosferą oraz przestrzenią kosmiczną wyrażone w procentach przychodzącego promieniowania słonecznego

# Podstawowe wiadomości o promieniowaniu

- Radiometr – przyrząd do pomiaru promieniowania.
- Radiometria (aktynometria) nauka o promieniowaniu Słońca, Ziemi i atmosfery.
- Promieniowanie krótkofalowe (słoneczne)  $\lambda < 4 \mu\text{m}$  obejmuje promieniowanie
  - ultrafioletowe  $\lambda < 400 \text{ nm}$ 
    - UVA – 315-400 nm
    - UVB – 280-315 nm
    - UVC – 100-280 nm
  - widzialne  $400 < \lambda < 700 \text{ nm}$
  - bliska i środkowa podczerwień  $0.7 < \lambda < 4 \mu\text{m}$
- Promieniowanie długofalowe (ziemskie)  $4 < \lambda < 50 \mu\text{m}$

# Podział promieniowania słonecznego

- **Promieniowanie bezpośrednie** – promieniowanie pochodzące z obszaru tarczy słonecznej mierzone na powierzchni prostopadłej do kierunku jego propagacji. Promieniowanie bezpośrednie dochodzące do powierzchni ziemi stanowi część promieniowania, która przeszła przez atmosferę bez oddziaływania lub została rozproszona dokładnie w kierunku do przodu.
- **Promieniowanie rozproszone** – promieniowanie pochodzące z obszaru całego nieboskłonu i związane jest z procesami rozpraszania w atmosferze.
- **Promieniowanie całkowite** – suma promieniowania bezpośredniego oraz rozproszonego.

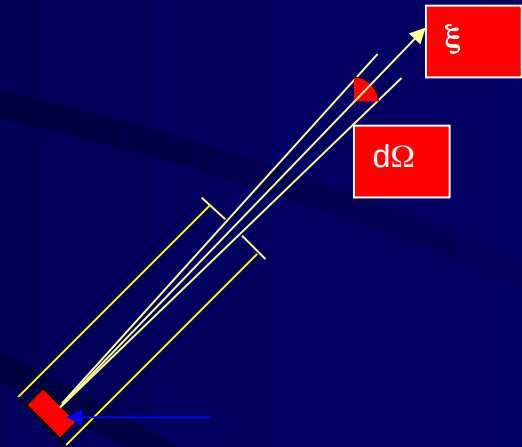
# Podstawowe wielkości związane z promieniowaniem

Wektor Poyntinga

$$\vec{S} = c^2 \varepsilon_0 \vec{E} \times \vec{H}$$

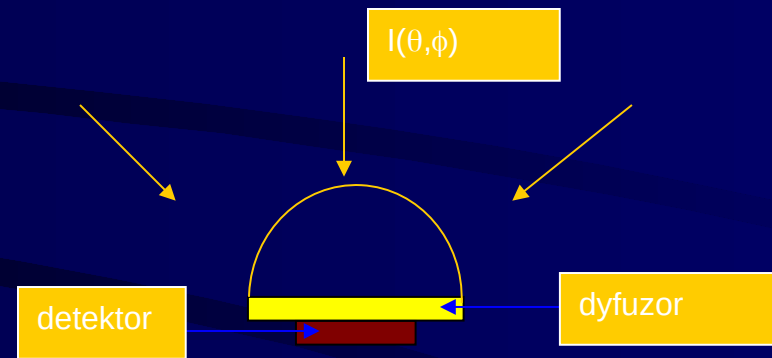
**Radiancja** – ilość energii mierzonej w określonym kierunku w jednostce czasu  $dt$  na jednostkę powierzchni  $dA$ , kąta bryłowego  $d\Omega$  oraz w wąskim przedziale spektralnym  $d\lambda$ .

$$I_\lambda = \frac{dE_\lambda}{\cos \theta d\Omega dA dt d\lambda} \quad \frac{W}{m^2 sr \mu m}$$



**Strumień, natężenie promieniowania** - ilość energii na jednostkę czasu przechodzącej przez jednostkową powierzchnię  $dA$  dla wąskiego przedziału spektralnego  $d\lambda$  promieniowania elektromagnetycznego.

$$F_{\lambda} = \frac{dE_{\lambda}}{dA dt d\lambda}$$



Związek radiancji ze strumieniem

$$F_{\lambda} = \int_{\Omega} d\Omega I_{\lambda} \cos \theta$$

# Promieniowanie ciała doskonale czarnego

- **Ciało doskonale czarne** - to ciało fizyczne, które pochłania całkowicie padające na niego promieniowanie oraz emituje energie zgodnie z równowadze prawem Plancka:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left( e^{hc/k\lambda T} - 1 \right)}$$

$$h=6.626 \times 10^{-34} \text{ Js,}$$

$$k=1.3806 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

Prawo Stefana-Boltzmannna

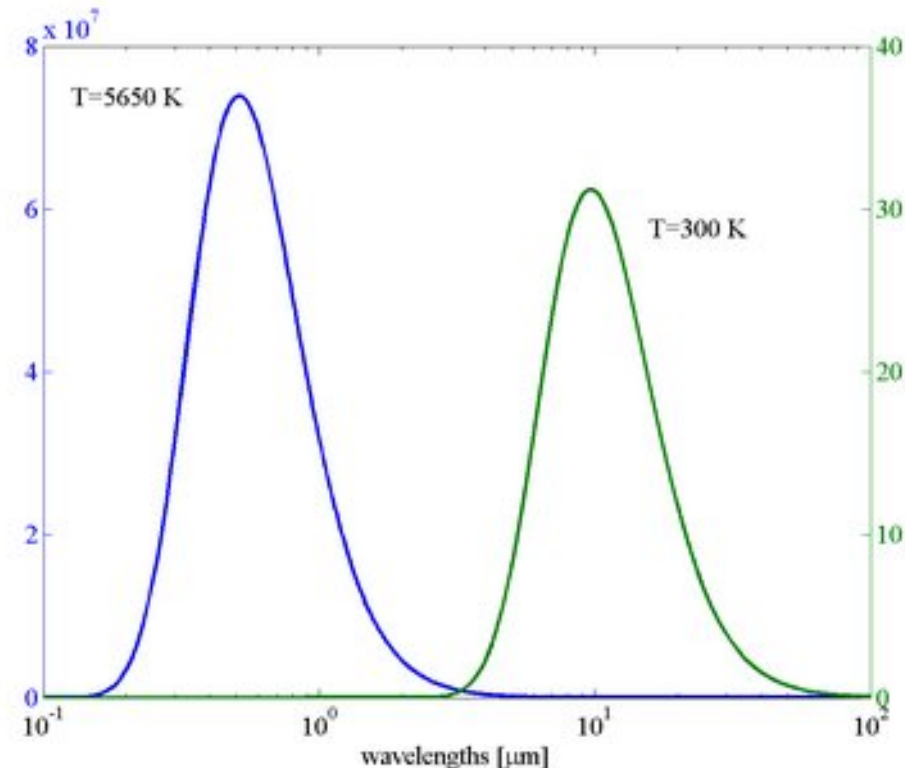
$$F = \pi B(T) = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

## Prawo Wien'a

$$\lambda_{\text{max}} = a/T$$

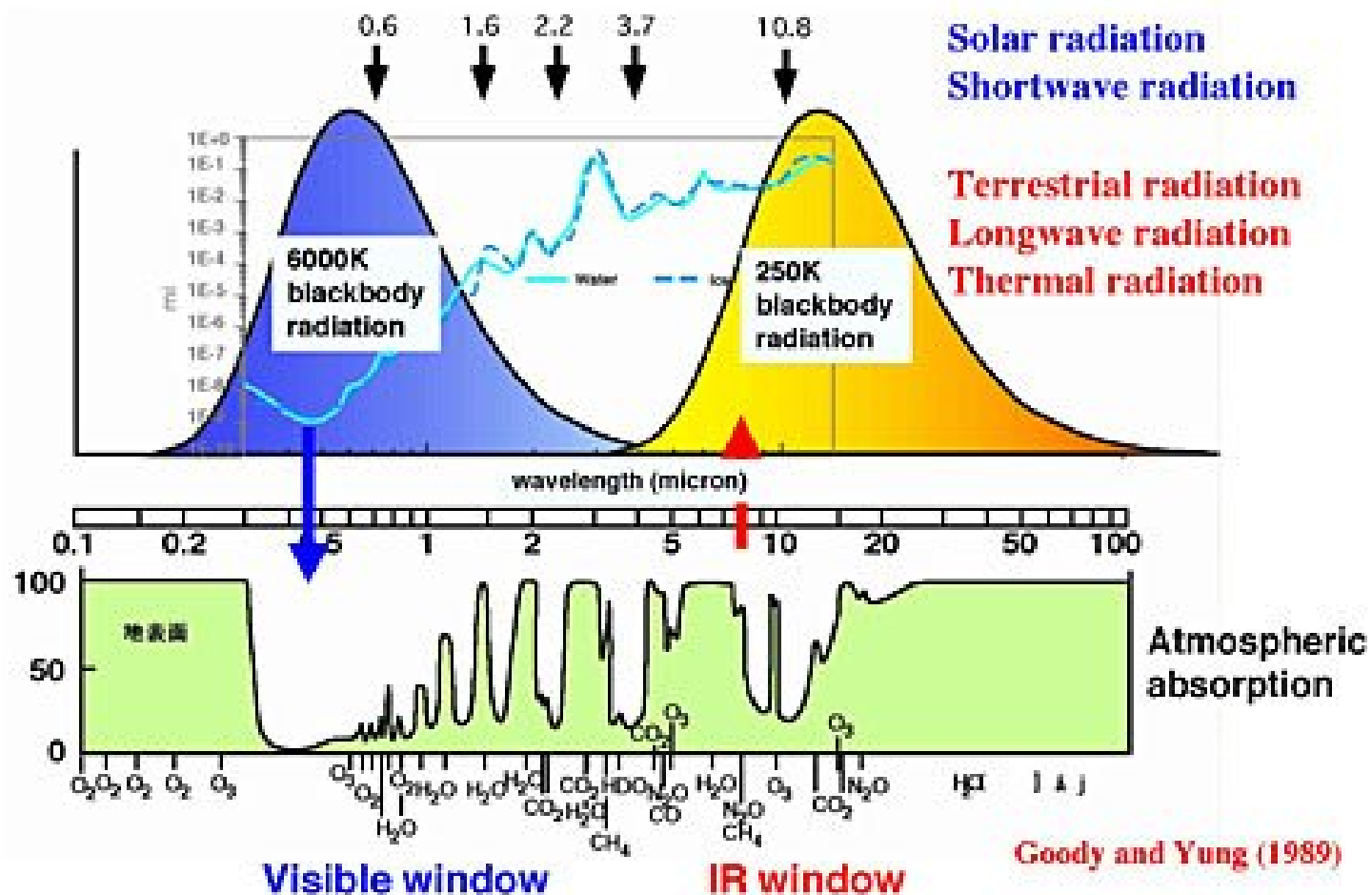
$$a = 2.897 \times 10^{-3} \text{ mK}.$$



**zdolność emisyjna  $\epsilon_\lambda$**  - stosunek emitowanej przez ciało radiancji do radiancji emitowanej przez ciało doskonale czarne (wzór Planck'a).

**zdolność absorpcyjna  $A_\lambda$**  – stosunek promieniowania absorbowanego przez ciało do funkcji Planck'a.

# Widmo promieniowania słonecznego i ziemskiego



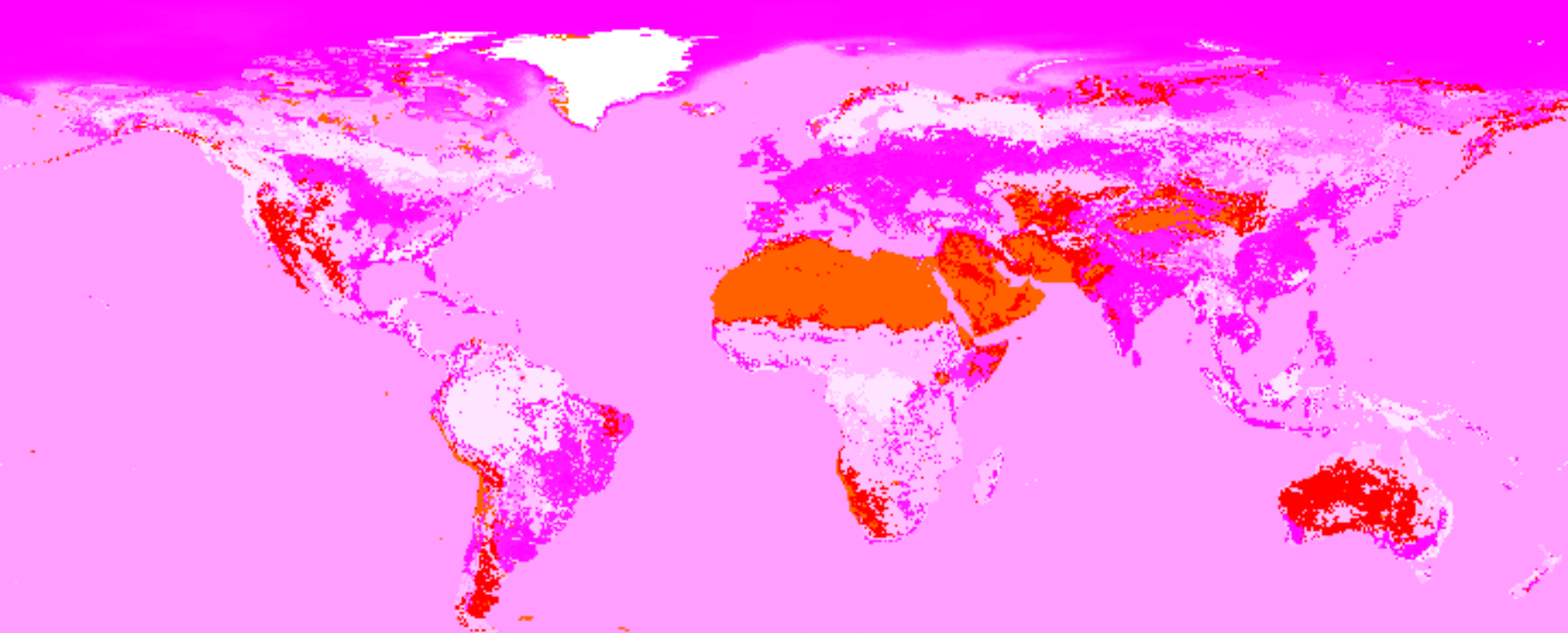
# Prawo Kirchhoff'a

W równowadze termodynamicznej mamy:

$$\varepsilon_{\lambda} = A_{\lambda}.$$

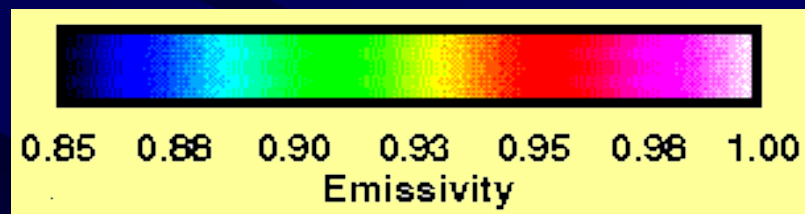
W przyrodzie ciała doskonale czarne nie występują, dlatego często definiuje się pojęcie **ciała doskonale szarego**, przez które rozumie się ciało, dla którego zdolność absorpcyjna  $A$  jest stałą mniejszą od jedności ( $A < 1$ ) i niezależny od długości fali. W tym przypadku całkowita energia emitowana przez ciało może być wyznaczana ze wzoru

$$F = \varepsilon \sigma T^4$$



## Zdolność emisyjna powierzchni Ziemi

| Surface     | Emissivity  |
|-------------|-------------|
| Water       | 0.993-0.998 |
| Ice         | 0.98        |
| Green grass | 0.975-0.986 |
| Sand        | 0.949-0.962 |
| Snow        | 0.969-0.997 |
| Granite     | 0.898       |

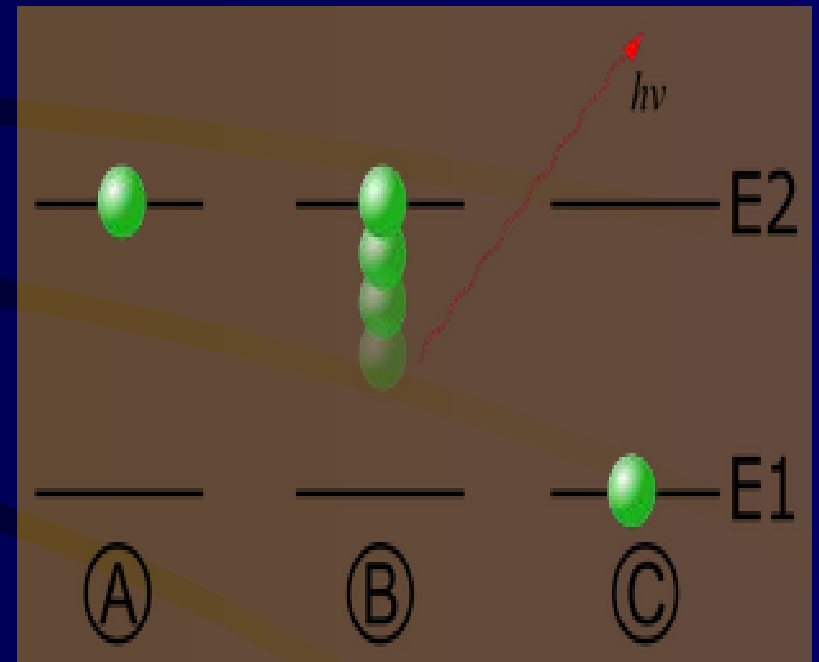
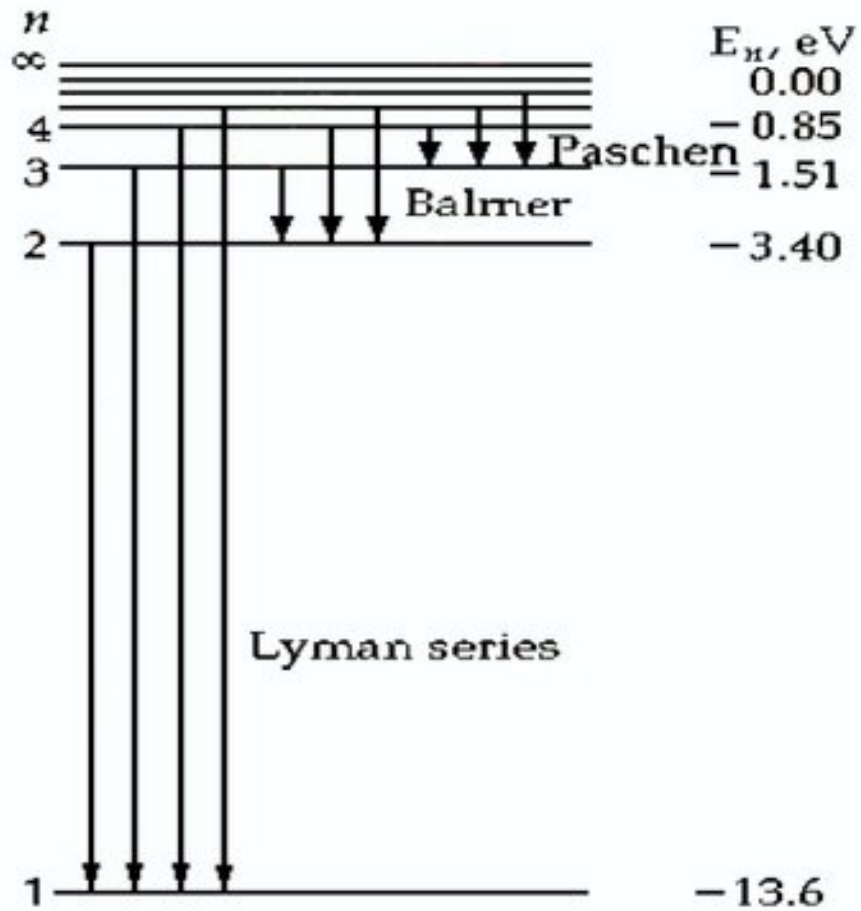
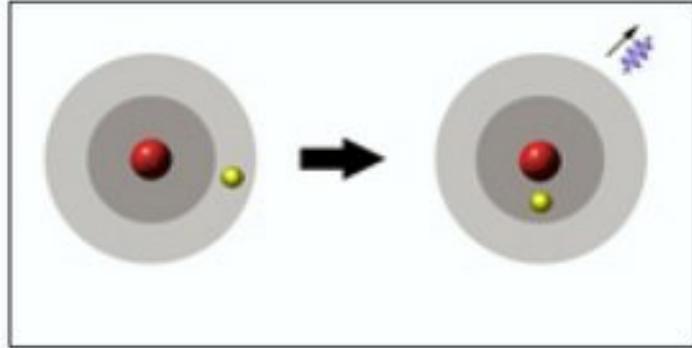
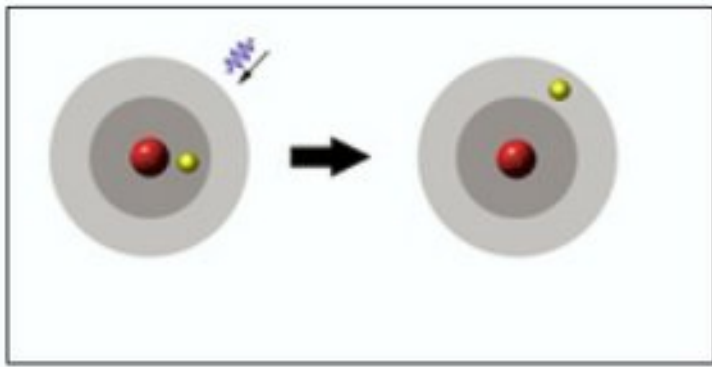


# Oddziaływanie promieniowanie z materią.

- **Absorpcja** – pochłanianie promieniowania
- **Emisja** – emitowanie promieniowania
- **Rozpraszanie** (dyfrakcja, refrakcja, odbicie) – zmiana kierunku propagacji promieniowania

# Absorpcja promieniowania

- Absorpcja (emisja) promieniowania występuje podczas przejść elektronowych, wibracyjnych i rotacyjnych w atomach oraz cząsteczkach.
- Ze względu na fakt, że największe zmiany energii występują w przejściach elektronowych następnie wibracyjnych i rotacyjnych. Z przejściami elektronowymi związane są linie widmowe w obszarze widzialnym i ultrafioletu, z przejściami wibracyjnymi absorpcja promieniowania od bliskiej do dalekiej podczerwieni, z przejściami rotacyjnymi absorpcja w dalekiej podczerwieni oraz w obszarze mikrofal.
- Struktura linii widmowych staje się coraz bardziej skomplikowana gdy przesuwamy się w kierunku fal dłuższych co jest związane z istnieniem coraz większej ilości przejść rotacyjnych i oscylacyjno-rotacyjnych.



N<sub>2</sub>  
O<sub>2</sub>



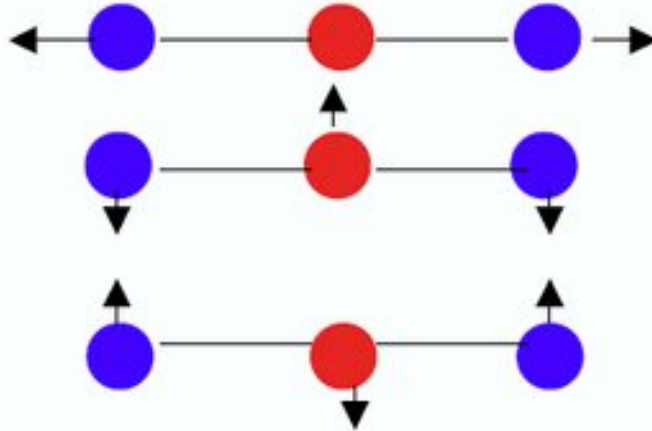
no vibrational transition  
(symmetric stretching mode)

CO



single vibrational mode

CO<sub>2</sub>



$\nu_1$  (symmetric stretching mode  
=> radiatively inactive)

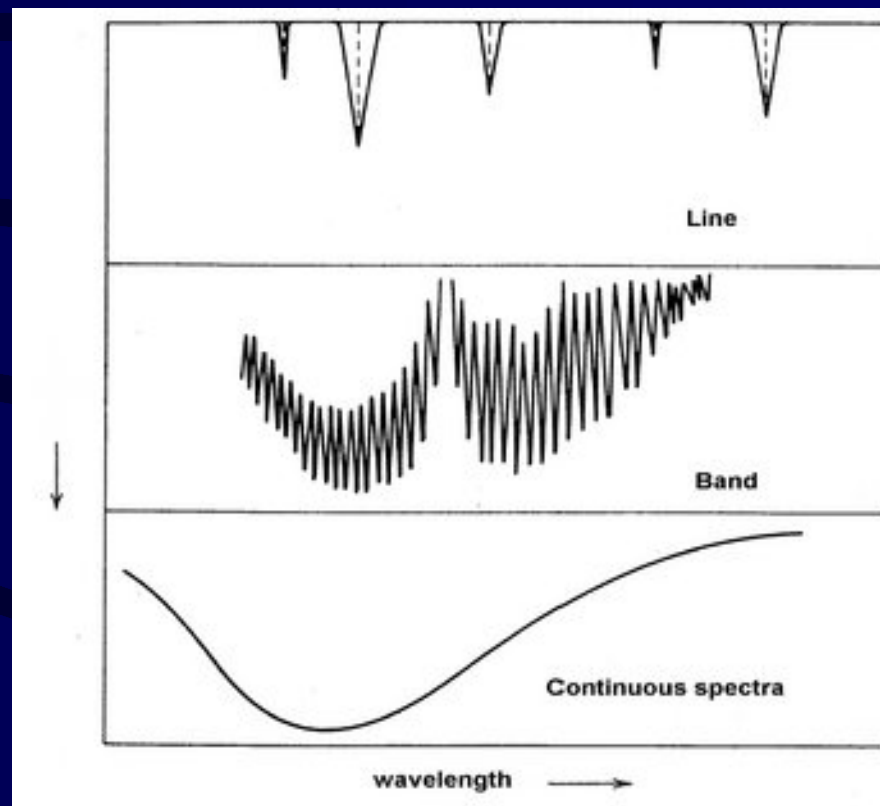
$\nu_{2a}$  } two bending modes  
have same energy  
 $\nu_{2b}$  } (degenerated modes)

$\nu_3$  (asymmetric stretching mode  
=> radiatively active)

# Kształt linii widmowych

Wyróżniamy następujące widma absorpcyjne:

- Liniowe
- Pasmowe
- Ciągłe (kontinuum)



# Wielkości związane z absorpcją

**Absorbancja** jest miarą absorpcji promieniowania i wyraża się wzorem

$$A = \ln \frac{I_0}{I}$$

gdzie

$I_0$  – natężenie promieniowania padającego,

$I$  – natężenie promieniowania po przejściu przez ośrodek.

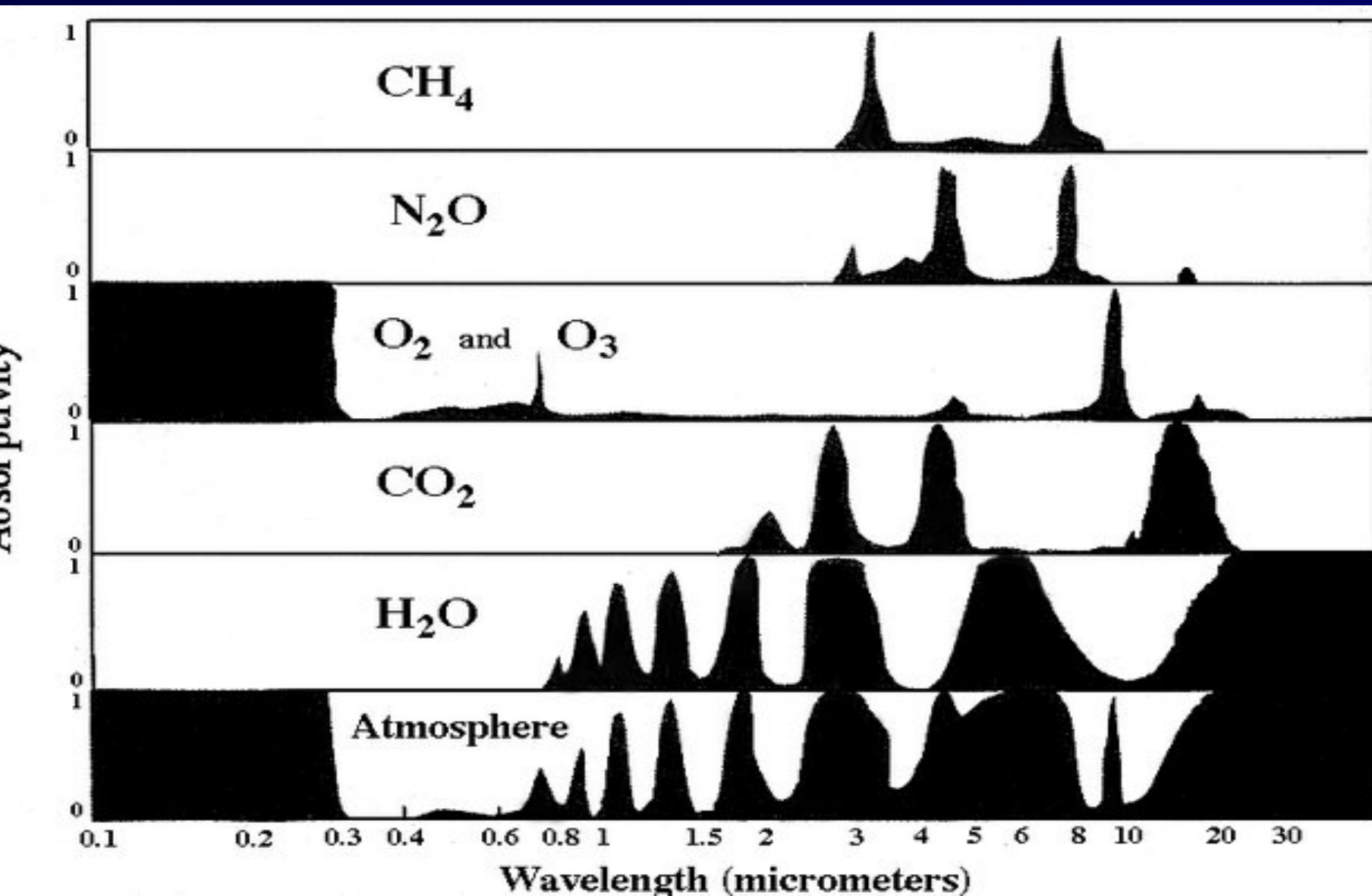
## **Transmitancja (transmisja)**

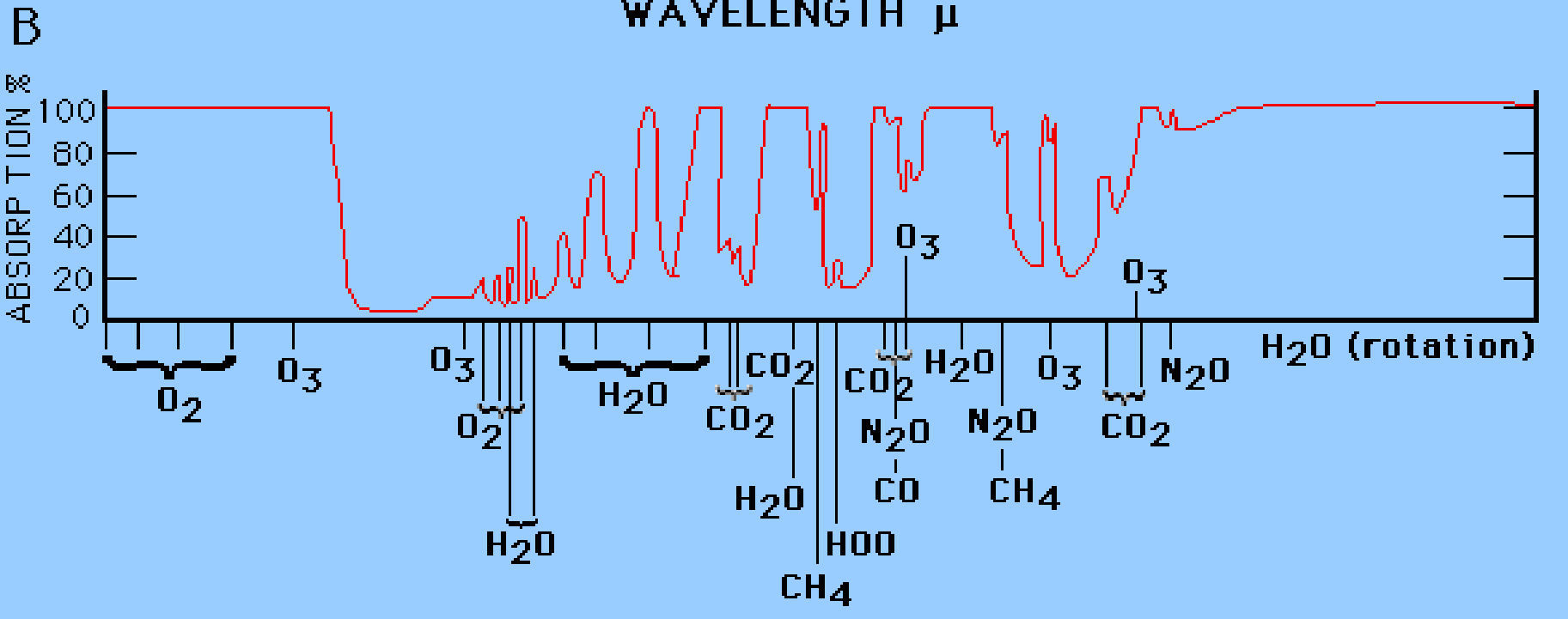
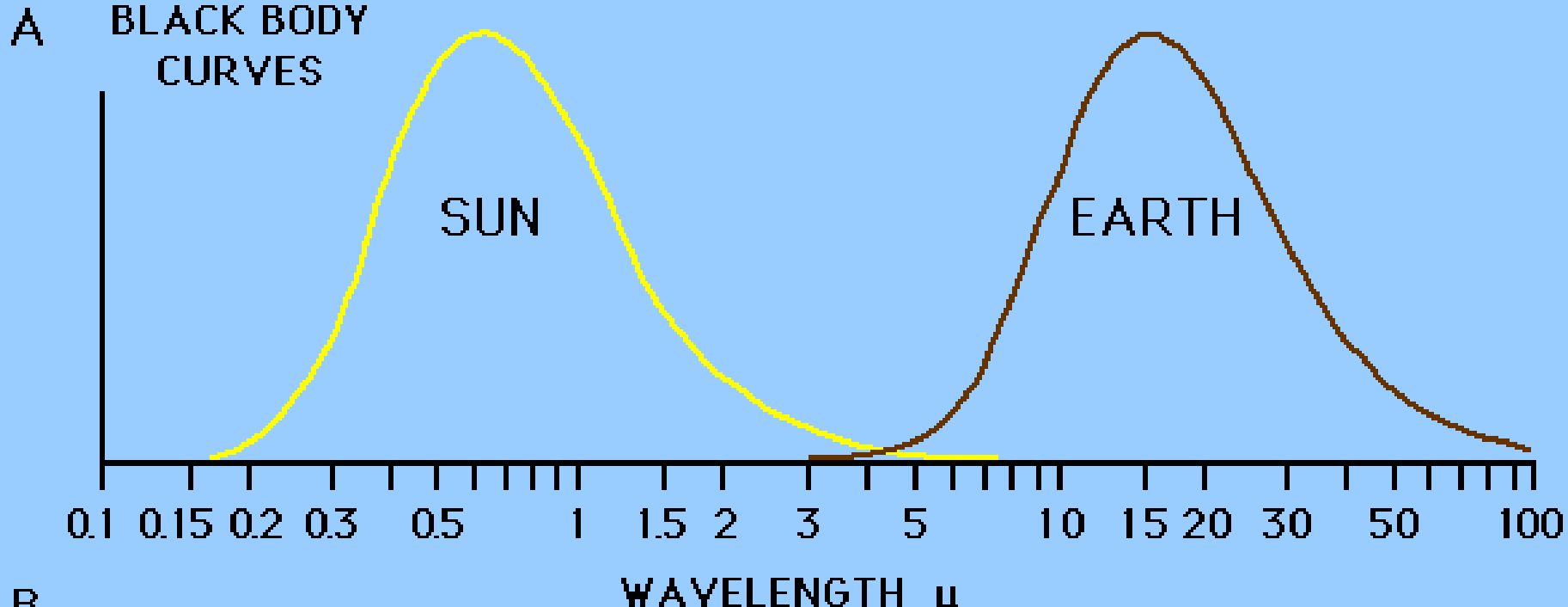
wskazuje, jaka część promieniowania padającego została przepuszczona przez substancję. Wyraża się ona wzorem

$$T = \frac{I}{I_0}$$

- Można ją również wyrażać w procentach

# Absorpcja promieniowania przez poszczególne gazy zawarte w atmosferze.





## Współczynnik rozpraszania $\sigma_s$

- Określa jaką część promieniowania jest usuwana z pierwotnej wiązki na jednostkowej drodze wskutek rozpraszania. Jednostką jest [1/m]

## Współczynnik absorpcji $\sigma_a$

- Określa jaką część promieniowania jest usuwana z pierwotnej wiązki na jednostkowej drodze wskutek absorpcji. Jednostką jest [1/m]

## Współczynnik ekstynkcji $\sigma_e$

- Jest sumą współczynnika rozpraszania i absorpcji

# Albedo pojedynczego rozpraszania

$$\omega = \frac{\sigma_s}{\sigma_e} = \frac{\sigma_e - \sigma_a}{\sigma_e} = 1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_e}$$

To stosunek współczynnika rozpraszania do współczynnika ekstynkcji. Opisuje prawdopodobieństwo rozpraszania fotonu. Wartości albeda pojedynczego rozpraszania zmieniają się od 0-1.

np. dla chmur w obszarze widzialnym wynosi 1

dla zanieczyszczeń powietrza (aerozoli) średnio od 0.9 do 1.

W przypadku wartości 0.9 na 10 fotonów 9 jest rozpraszanych a tylko jeden jest absorbowany.

# Grubość optyczna ośrodka $\tau$

parametr ośrodka, opisujący zmianę natężenia promieniowania elektromagnetycznego podczas jego przechodzenia przez ośrodki takie jak gazy, chmury itd. Grubość optyczna jest proporcjonalna do grubości fizycznej ośrodka oraz jego własności optycznych.

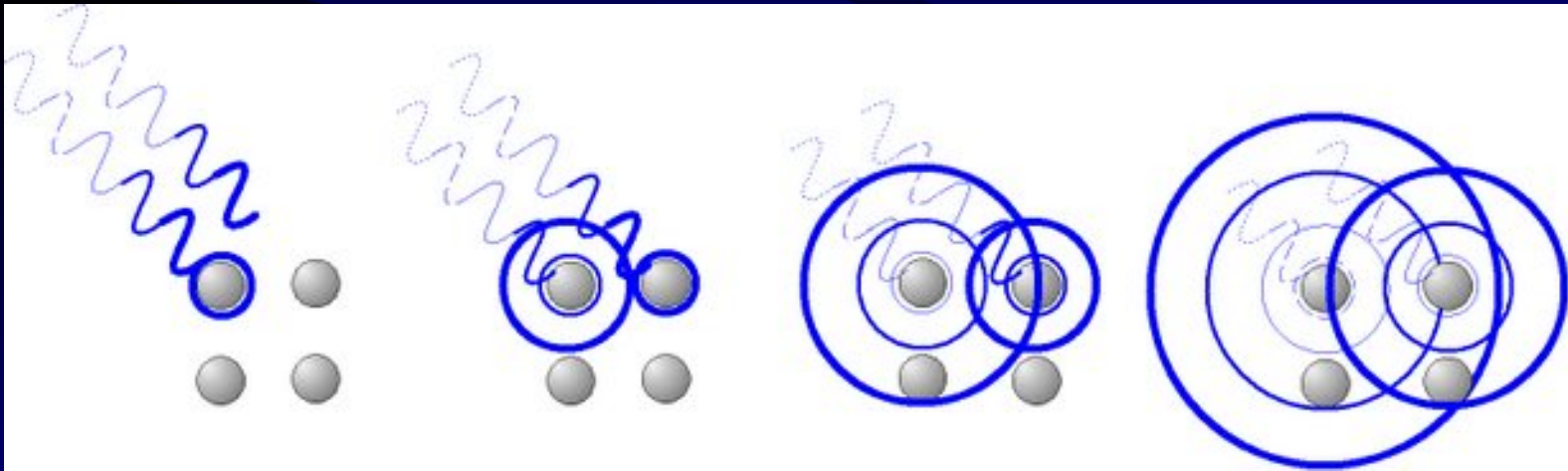
Grubość optyczna zależy od współczynnika ekstynkcji zgodnie ze wzorem

$$\Delta\tau = \sigma_e \Delta z$$

gdzie  $\Delta z$  jest grubością fizyczną ośrodka

# Rozpraszanie promieniowania

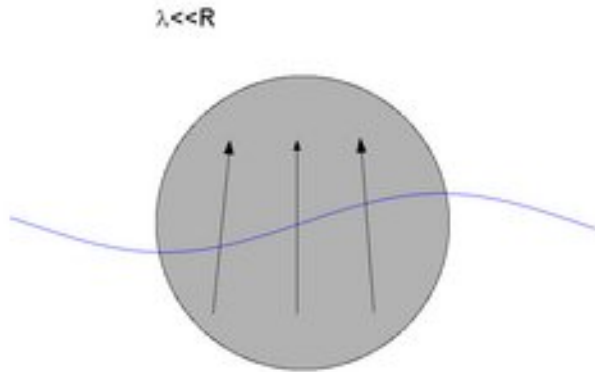
- zjawisko oddziaływania promieniowania z materią w wyniku którego następuje zmiana kierunku jego rozchodzenia. Rozróżnia się rozpraszanie światła:
- sprężyste – podczas rozpraszania nie następuje zmiana energii (częstotliwości) światła
- niesprężyste – podczas rozpraszania zmienia się energia (częstotliwość) światła.
- W atmosferze decydującą rolę odgrywa rozpraszanie sprężyste.



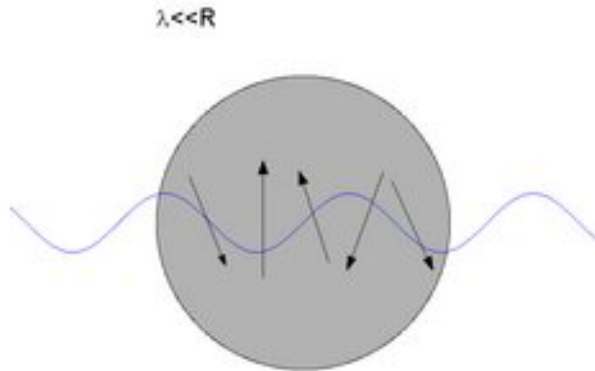
# Rozpraszanie ze względu na rozmiar cząstek

- Charakter rozpraszania zależy od bezwymiarowego parametru będącego stosunkiem rozmiarów cząstek rozpraszających do długości fali promieniowania na nie padającego zwanego parametrem wielkości:  $x=2\pi r/\lambda$ .
- **Rozpraszanie Rayleigha** na cząstkach małych w porównaniu z długością fali ( $x \ll 1$ )
- **Rozpraszanie geometryczne** na cząstkach dużych w porównaniu z długością fali ( $x \gg 1$ )
- **Rozpraszanie MIE** na cząstkach o rozmiarach porównywalnych z długością fali ( $x > 1$ )

# Reżimy rozpraszania

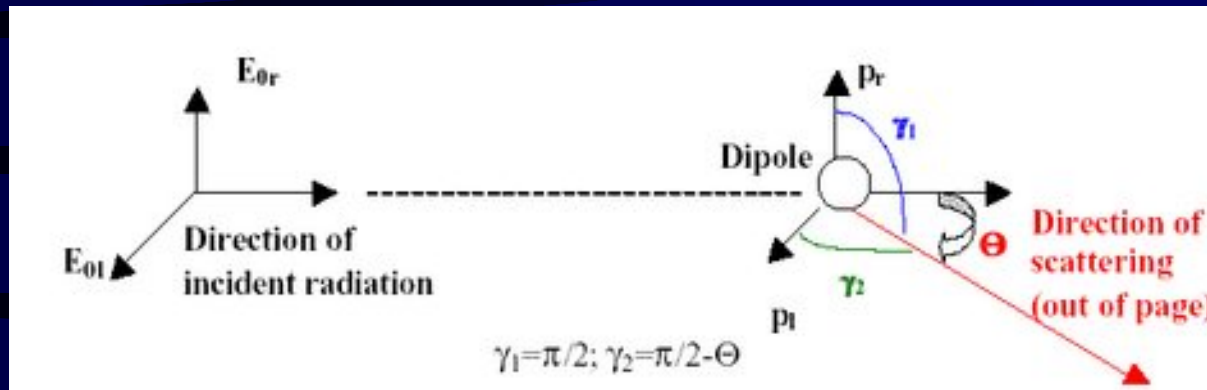


W przypadku małych cząstek (względem długości fali) pojawiające się dipole w cząsteczce są praktycznie tak samo zorientowane. Można je zastąpić jednym (efektywnym) dipolem



W przypadku dużych cząstek (względem długości fali) pojawiające się dipole w cząsteczce skierowane w różnych kierunkach.

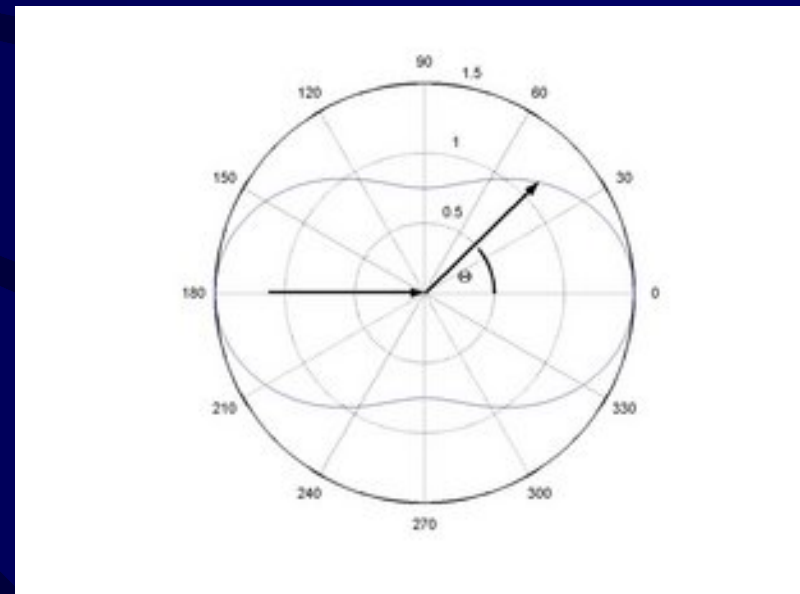
# Rozpraszanie Rayleigha



- Radiancja promieniowania po rozproszeniu

$$I = \frac{I_0}{r^2} \alpha^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \frac{1 + \cos^2 \Theta}{2}$$

gdzie  $\Theta$  - kąt rozproszenia,  
 $r$  - odległość od cząstki na której  
 nastąpiło rozproszenie,  $\alpha$  -  
 polaryzowalność ośrodka.



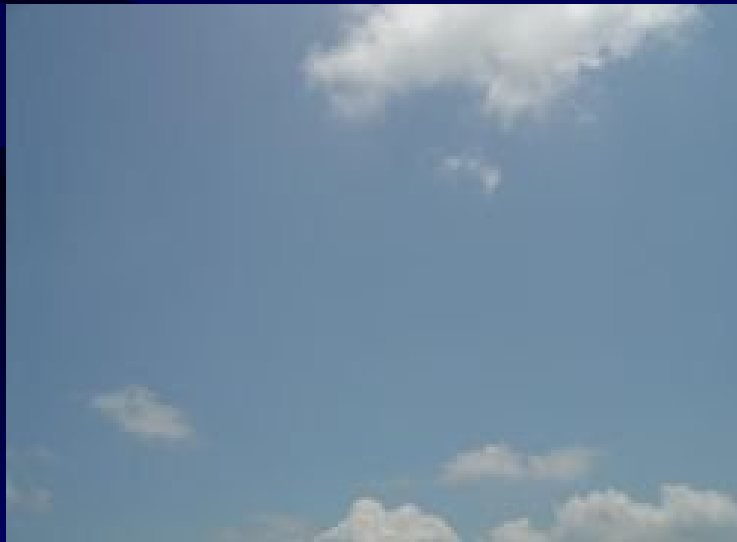
# Rozpraszanie Rayleigha c.d.

- Natężanie promieniowania rozproszonego jest odwrotnie proporcjonalne do czwartej potęgi długości fali.
- Tak, więc rozpraszanie promieniowania bardzo szybko zmniejsza się z długością fali i dlatego rozpraszanie Rayleigh'a ma istotne znaczenie w obszarze widzialnym oraz w ultrafiolecie.
- Ponieważ promieniowanie nieba (poza tarczą słoneczną) składa się tylko z promieniowania rozproszonego tak, więc rozpraszanie Rayleigh'a jest odpowiedzialne za błękitny kolor nieba.
- Rozpraszanie Rayleigh'a jest anizotropowe, jednak odstępstwo od izotropowości nie jest duże.
- Rozpraszanie Rayleigh'a jest symetryczne tzn. natężanie promieniowania rozproszonego do przodu i do tyłu jest takie samo.



# Rozpraszanie MIE

- Z rozpraszania typu MIE mamy do czynienia np. w przypadku chmur i promieniowania w zakresie widzialnym.
- W przypadku rozpraszania MIE natężenie promieniowania rozproszonego nie zmienia się silnie z długością fali. Stąd też chmury na ogół są białe gdyż składają się z mieszaniny fal o różnych długościach.

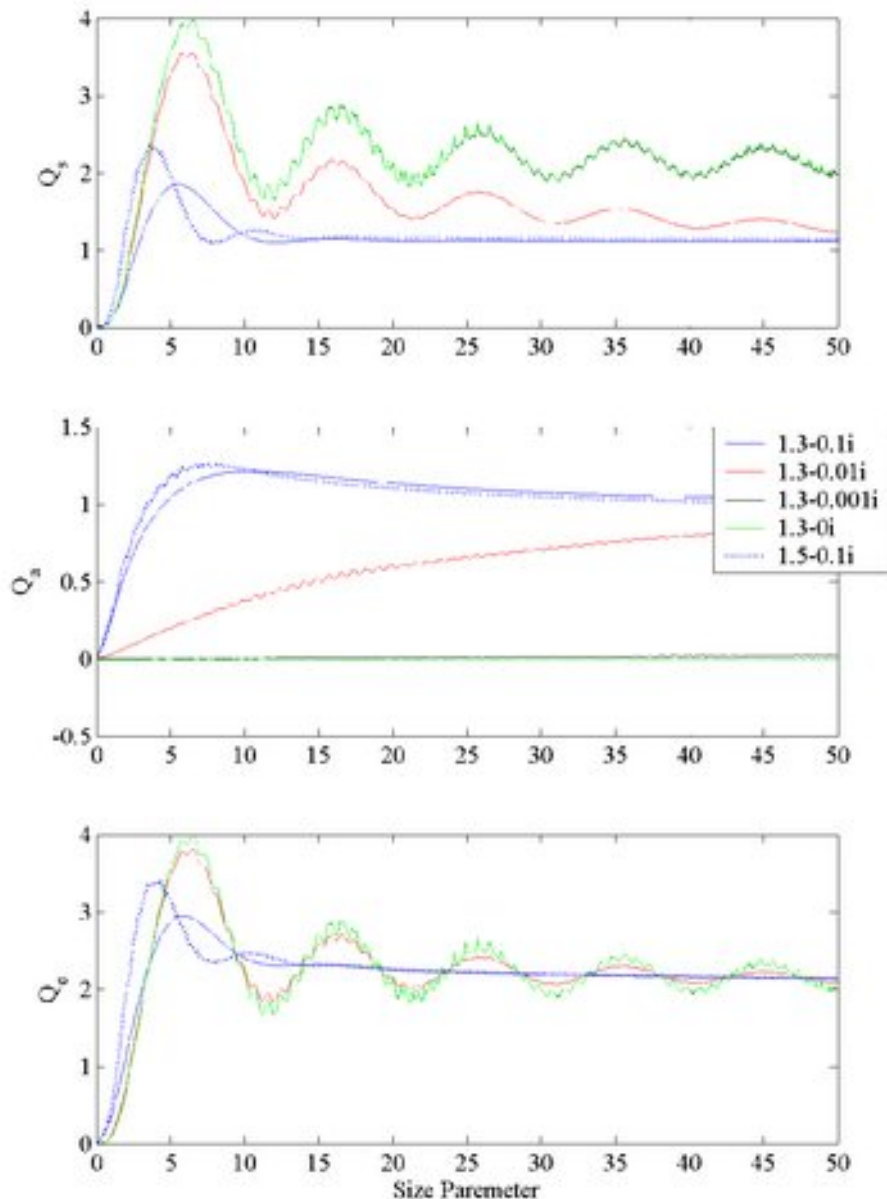


# Rozpraszanie MIE

- Efektywne przekroje czynne na rozpraszanie absorpcję oraz ekstynkcję.

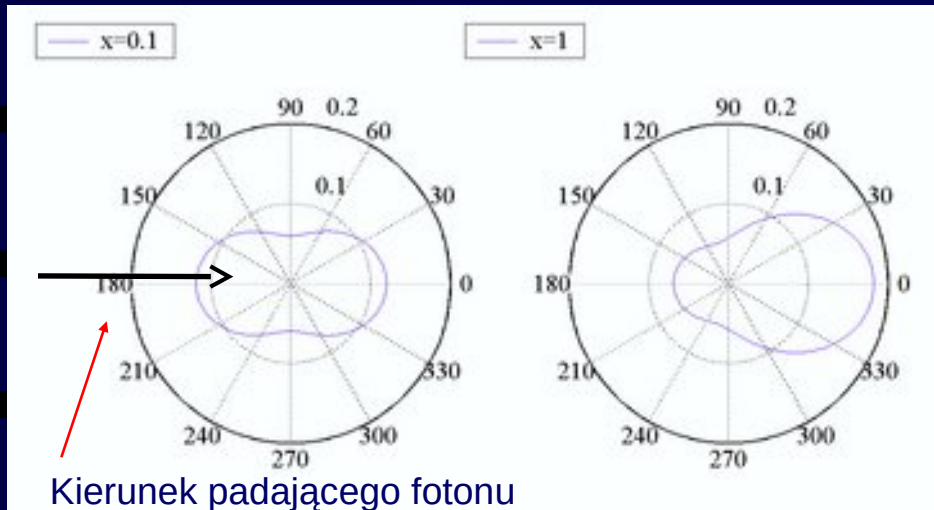
$$Q_{s,a,e} = \frac{C_{s,a,e}}{\pi r^2}$$

- gdzie  $C_{s,a,e}$  - jest przekrojem czynnym na rozpraszanie absorpcję oraz ekstynkcję



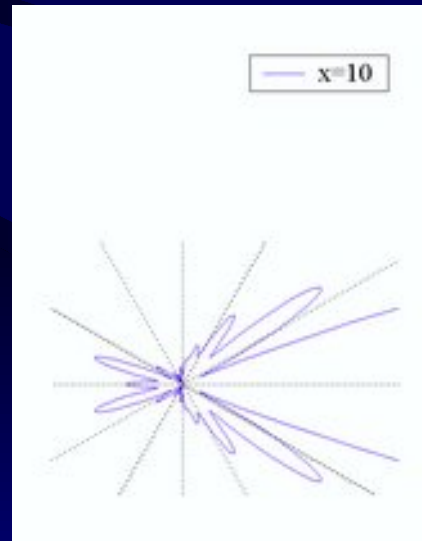
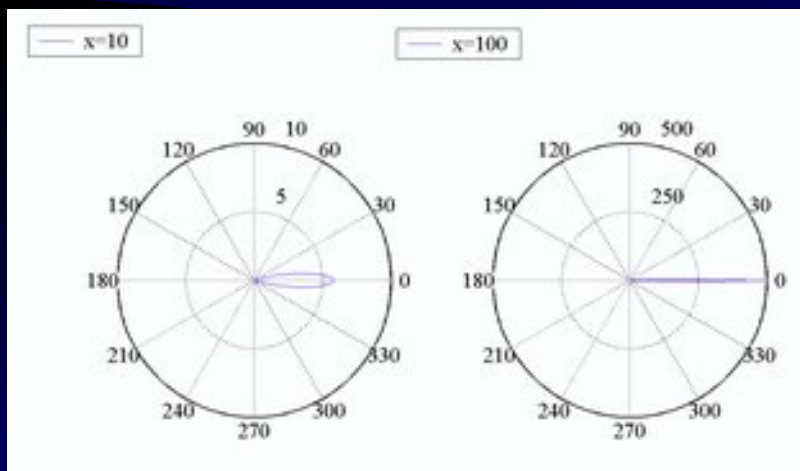
# Wielkości opisujące rozpraszanie

- Funkcja fazowa** – prawdopodobieństwo rozproszenia fotonu w kąt bryłowy.



małe cząstki

Im większe cząstki tym więcej fotonów rozpraszanych jest do przodu!



duże cząstki

# Rozpraszanie na cząstkach niesferycznych

- **Metody geometryczne:** dla cząstek lub niejednorodności znacznie większych od długości fali można światło traktować jako wiązkę nieulegających dyfrakcji promieni świetlnych, które ulegają odbiciu lub załamaniu przy przejściu pomiędzy ośrodkami o różnych własnościach optycznych. Przybliżenie to można użyć do opisu wielu zjawisk optycznych np. zjawisko tęczy.
- Zakres stosowania praw optyki geometrycznej można rozszerzyć na niejednorodności porównywalne z długością fali uwzględniając dyfrakcję promieni na niejednorodnościach.
- **Metoda dyskretnych dipoli:** polega na przybliżeniu cząstek dipolami, które oddziałują ze sobą i padającym promieniowaniem.

# Przybliżenie dyskretnych dipoli

- Metoda dokładnego rozwiązania problemu rozpraszania światła na niesferycznych i niejednorodnych cząstkach oraz na periodycznych układach cząstek.
- Przybliżenie dyskretnych dipoli (ang. discrete dipole approximation, w skrócie DDA) opiera się na założeniu, że cząstkę rozpraszającą można przybliżyć przez układ mniejszych elementów oddziaływających z falą elektromagnetyczną jak pojedynczy dipol.
- Metoda polega na uwzględnieniu jednoczesnych oddziaływań pomiędzy wszystkimi dipolami w układzie
- Umożliwia dokładne rozwiązanie równań rozpraszania światła na cząstkach o dowolnym kształcie i rozkładzie niejednorodności materiału (współczynnika refrakcji).
- Została zaproponowana przez Purcella i Pennypackera i istotnie rozwinięta w latach 1980-2000 przez Draine'a i Flatau'a.

- DDA jest dokładnym rozwiązaniem równań Maxwella na niesferycznych cząstkach i uzupełnia rozwiązanie MIE, które są ważne tylko dla cząstek sferycznych.
- Ograniczeniem metody jest zakres parametru wielkości  $x = 2\pi r / \lambda$  i wielkość współczynnika refrakcji.

Metoda dyskretnych dipoli jest ogólniejsza niż przybliżenie Rayleigha, które jest ważne dla jednego dipola i sprowadza się do rozwiązania Rayleigha dla małych parametrów wielkości.

Metoda jest wykorzystywana w szerokim zakresie problemów fizycznych, m.in. w zagadnieniach nanotechnologii, rozpraszaniu na pył międzyplanetarny, rozpraszaniu fal mikrofalowych (radar) przez kryształy lodu, ekstynkcji na cząstkach aerozoli atmosferycznych, detekcji zanieczyszczeń na powierzchni.

# Metoda DDA.

Pole elektryczne promieniowania rozproszonego jest sumą pola fali padającej oraz pola indukowanego przez każdy dipol.

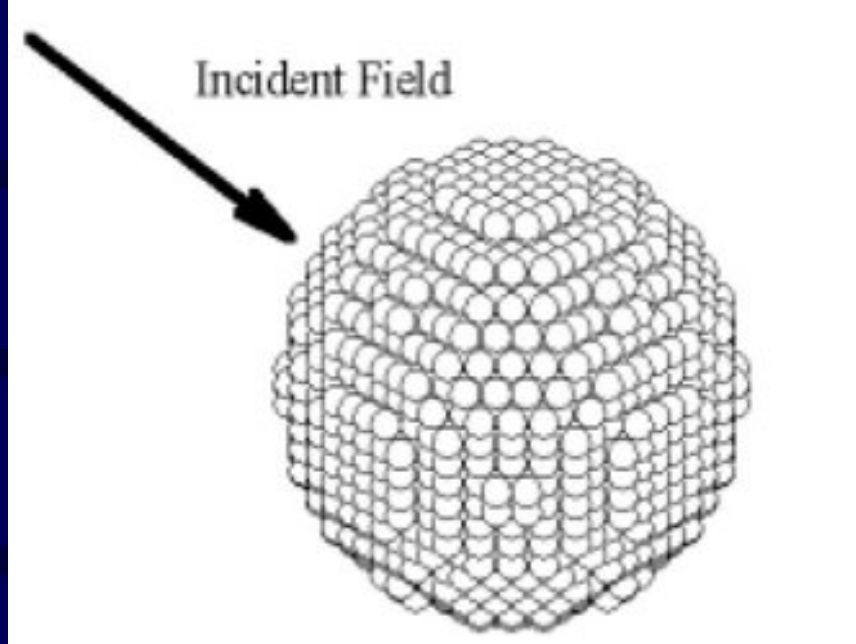
$$E_{sc} = E_{inc} + \sum E_{dipoles}$$

Moment dipolowy j-go dipola dany jest wzorem

$$p_j = \alpha_j E_{dipole, j}$$

$$p_j = \alpha_j [E_{inc, j} - \sum_{j \neq k} A_{jk} p_k]$$

gdzie  $\alpha_j$  jest polaryzowalnością dipola,  $E_{dipole, j}$  określa pole działające na dipol j, które jest superpozycją pola padającego oraz pola indukowanego przez inne dipole.



gdzie

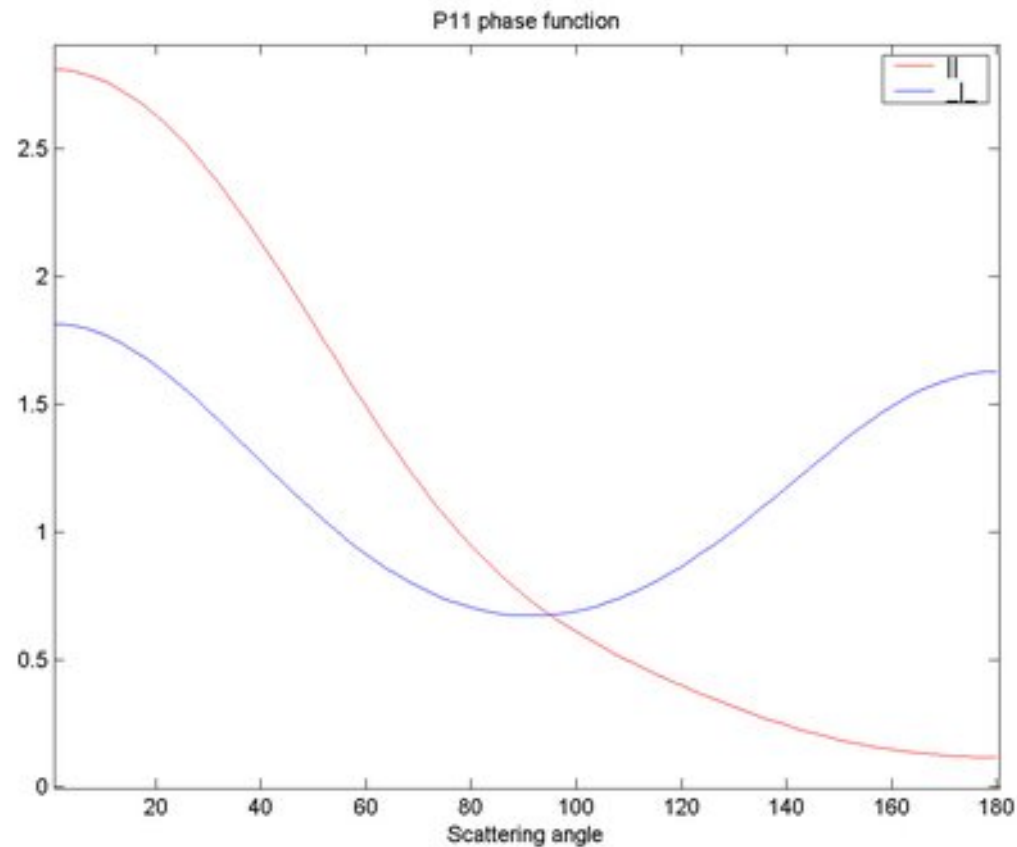
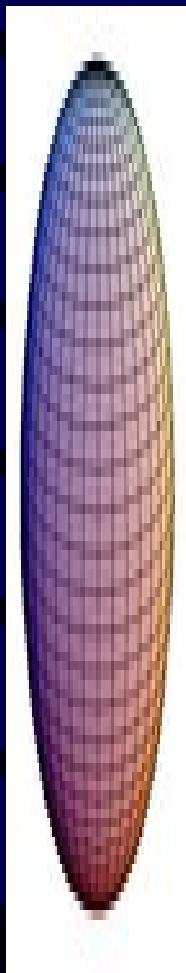
$$- \sum_{j \neq k} A_{jk} P_k$$

określa wkład do pola elektrycznego

w punkcie w którym znajduje się dipol j pochodzący od dipola k-tego.

Ze względu na ogromną liczbę dipoli (określoną przez minimalną odległość pomiędzy dipolami w stosunku do długości fali) bezpośrednie rozwiązanie tego układu równań jest niepraktyczne w związku z czym stosuje się metody przybliżone.

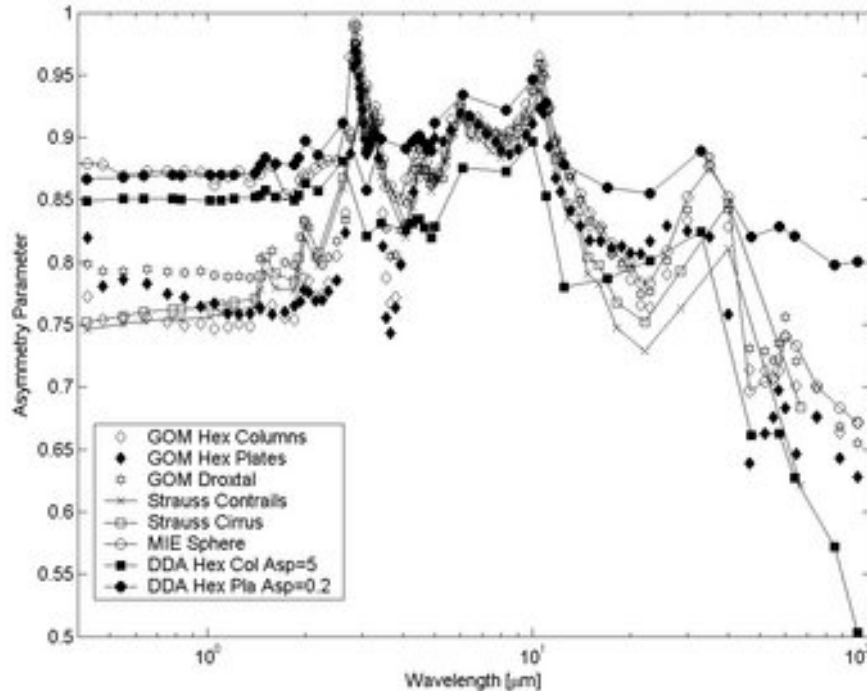
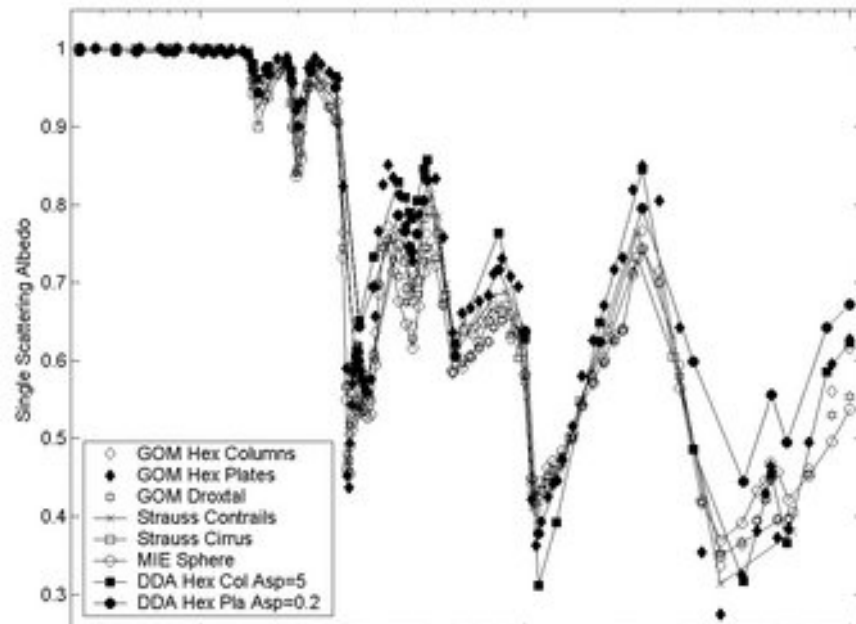
$g=0.02$   
 $x=0.63$   
asp. ratio= 5



$g=0.41$   
 $x=0.63$   
asp. ratio= 0.2



- Zmienność albedo pojedynczego rozpraszania oraz parametru asymetrii kryształów lodu z długością fali.

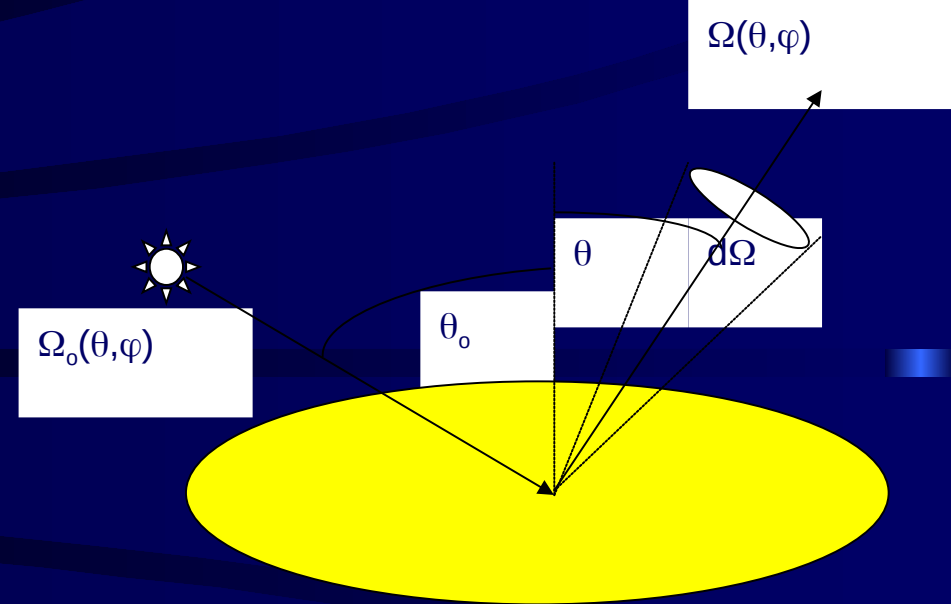


# Odbicie promieniowania

- zmiana kierunku rozchodzenia się fali na granicy dwóch ośrodków powodująca, że pozostaje ona w ośrodku, w którym się rozchodzi. Odbicie o takich obiektów jak chmura pokrywa śnieżna to niż innego jak rozproszenie na stosunkowo cienkiej warstwie innego ośrodka.
- Do opisu odbicia stosuje się pojęcie albedo  $A$  oraz współczynnika odbicia  $\rho$ .
- **Albedo – to stosunek natężania promieniowania odbitego do padającego na daną powierzchnię.**
- Okazuje się, że ta wielkość zależy nie tylko od własności samego podłoża ale również od warunków oświetleniowych (rozkładu promieniowania niebosłonu). Dlatego definiuje się dwukierunkowy współczynnik odbicia BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*)

## Definicja BRDF-u

powierzchni ziemi



$$R(\Omega', \Omega) \equiv \frac{dI^\uparrow(\Omega)}{I^\downarrow(\Omega') \cos \theta' d\Omega'}$$

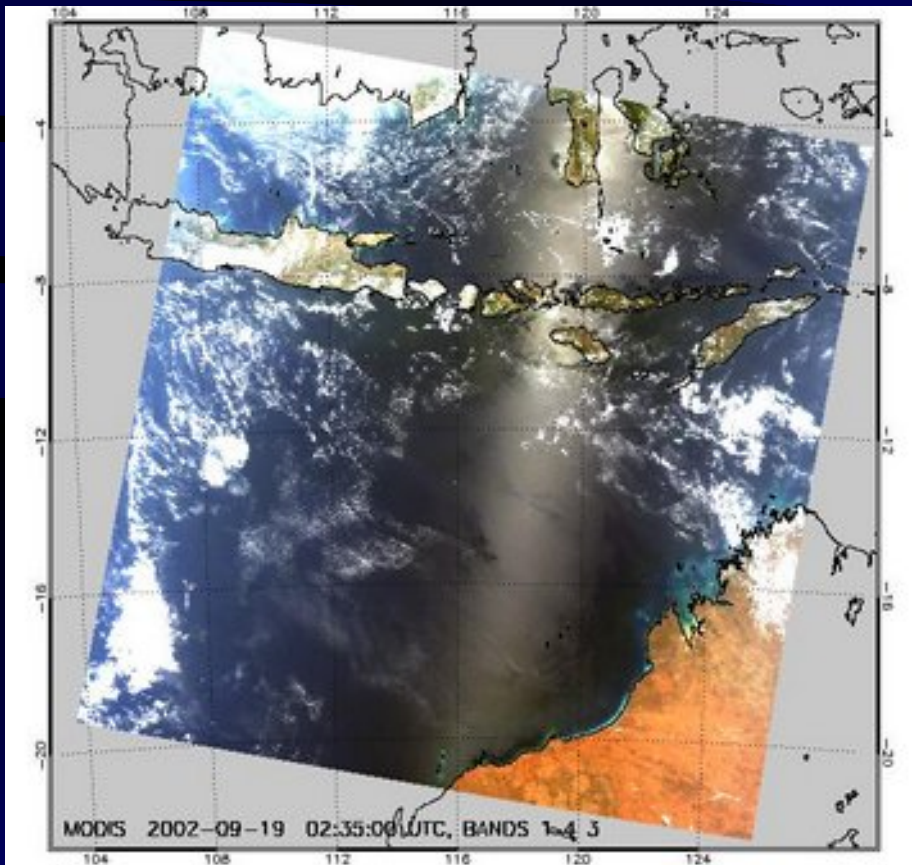
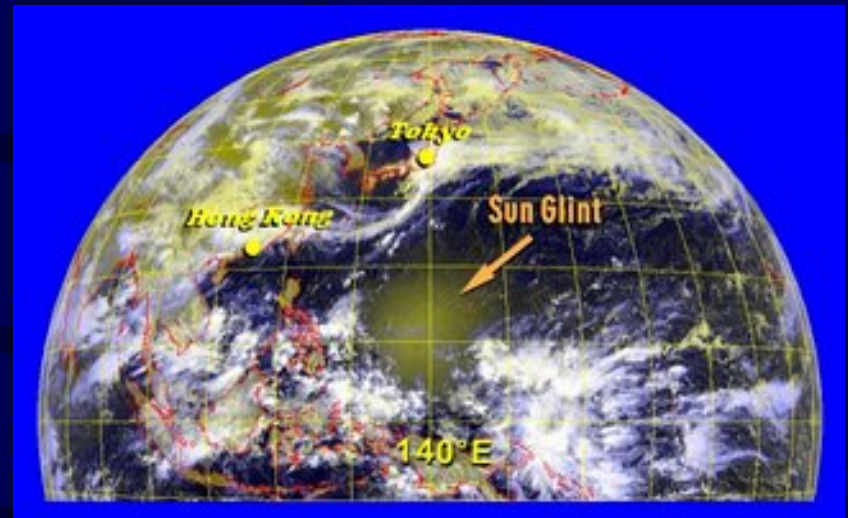
- Współczynnik 2-kierunkowego odbicia w przeciwieństwie od albeda zdefiniowanego dla strumieni promieniowania nie zależy od własności optycznych atmosfery a jedynie od własności samej powierzchni odbijającej.

- Większość typów powierzchni ziemi wykazuje własności optyczne pomiędzy dwoma skrajnymi typami: idealnie gładka (**odbicie zwierciadlane**) oraz powierzchnia szorstką (**Lambertsowska**)
- W pierwszym przypadku współczynnik odbicia jest niezerowy jedynie dla kąta padania równego kątowi odbicia (odbicie Fresnela)
- W drugim przypadku radiancja promieniowania odbitego jest izotropowa.
- Określenie **BRDF-u** powierzchni ziemi jest kluczowe dla większości metod teledetekcyjnych. Bezpośredni pomiar **BRDF-u** możliwy jest jedynie w pewnych obszarach spektralnych.

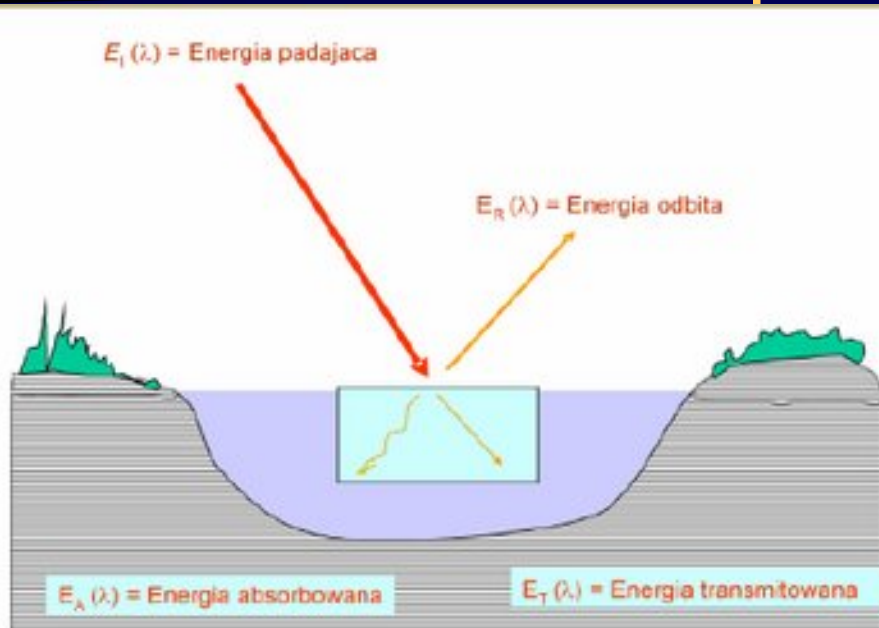
Zjawisko związane odbiciem  
zwierciadlanym  
(Fresnelowskim) od płaskiej  
powierzchni wody.

Zależy ono od wzajemnego  
położenia Słońca i satelity oraz  
stanu morza.

## Odblask - Sun Glint



# Odbicie promieniowania



$$E_i(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda)$$



$$\rho = \frac{E_R}{E_i} = \frac{\text{Energia fali o długości } \lambda \text{ odbijana od obiektu}}{\text{Energia fali o długości } \lambda \text{ padająca na obiekt}} \times 100$$

# BRDF

- Wartość funkcji BRDF w pełni charakteryzuje odbicie promieniowania od powierzchni ziemi.
- Funkcja BRDF jest zależna od kierunku padania promieniowania (określają go dwa kąty przestrzenne), kierunku odbicia promieniowania (kolejne dwa kąty) oraz długości fali padającego promieniowania.
- Funkcje BRDF znajdują zastosowanie w satelitarnych technikach teledetekcji (jasność zdjęcia zależy od własności podłoża, pozycji Słońca na nieboskłonie i od pozycji satelity).