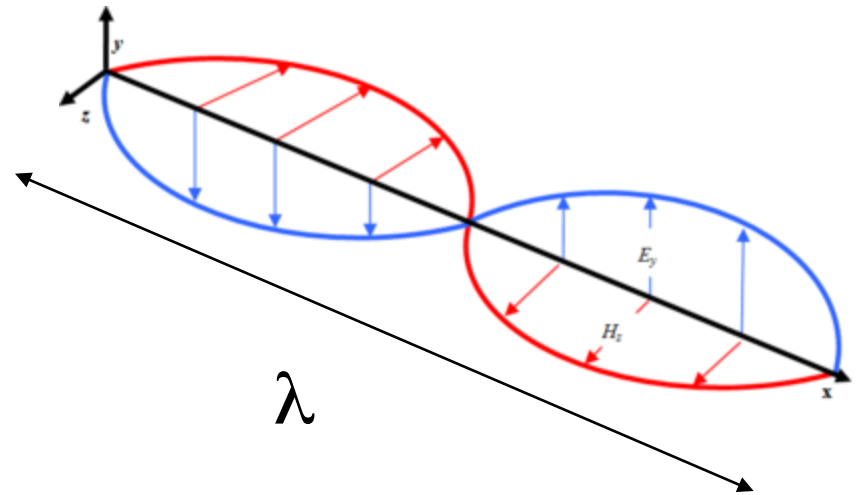


# Onde elettromagnetiche



Lunghezza d'onda  $\lambda$

Periodo T

Frequenza  $\nu = 1/T$

Pulsazione  $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$

Numero d'onda  $k = 2\pi / \lambda$

Celerità di propagazione (nel vuoto):  $c^* = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$

$$\lambda \cdot \nu = c^*$$

# Radiazione elettromagnetica e materia

Ogni molecola può assorbire o emettere energia sotto forma di onde elettromagnetiche.

Gli eventi di assorbimento/emissione possono essere interpretati in termini di assorbimento/emissione di fotoni associati all'onda.

L'energia associata ad ogni evento elementare di assorbimento/emissione di un fotone associato a un'onda di frequenza  $\nu$  è pari a:

$$W = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc^*}{\lambda}$$

dove  $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$  è la costante di Planck e  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ .

Una molecola isolata può assorbire/emettere solo multipli di un quanto di energia corrispondenti ai “salti” fra i livelli energetici degli orbitali elettronici, oppure a moti corrispondenti agli altri o gradi di libertà della molecola, come moti di vibrazione o rotazione.

Per questo lo spettro di emissione/assorbimento presenta delle caratteristiche “righe”. La combinazione degli scambi associati ai diversi gradi di libertà determina l’aggregazione di queste righe in bande (clusters).

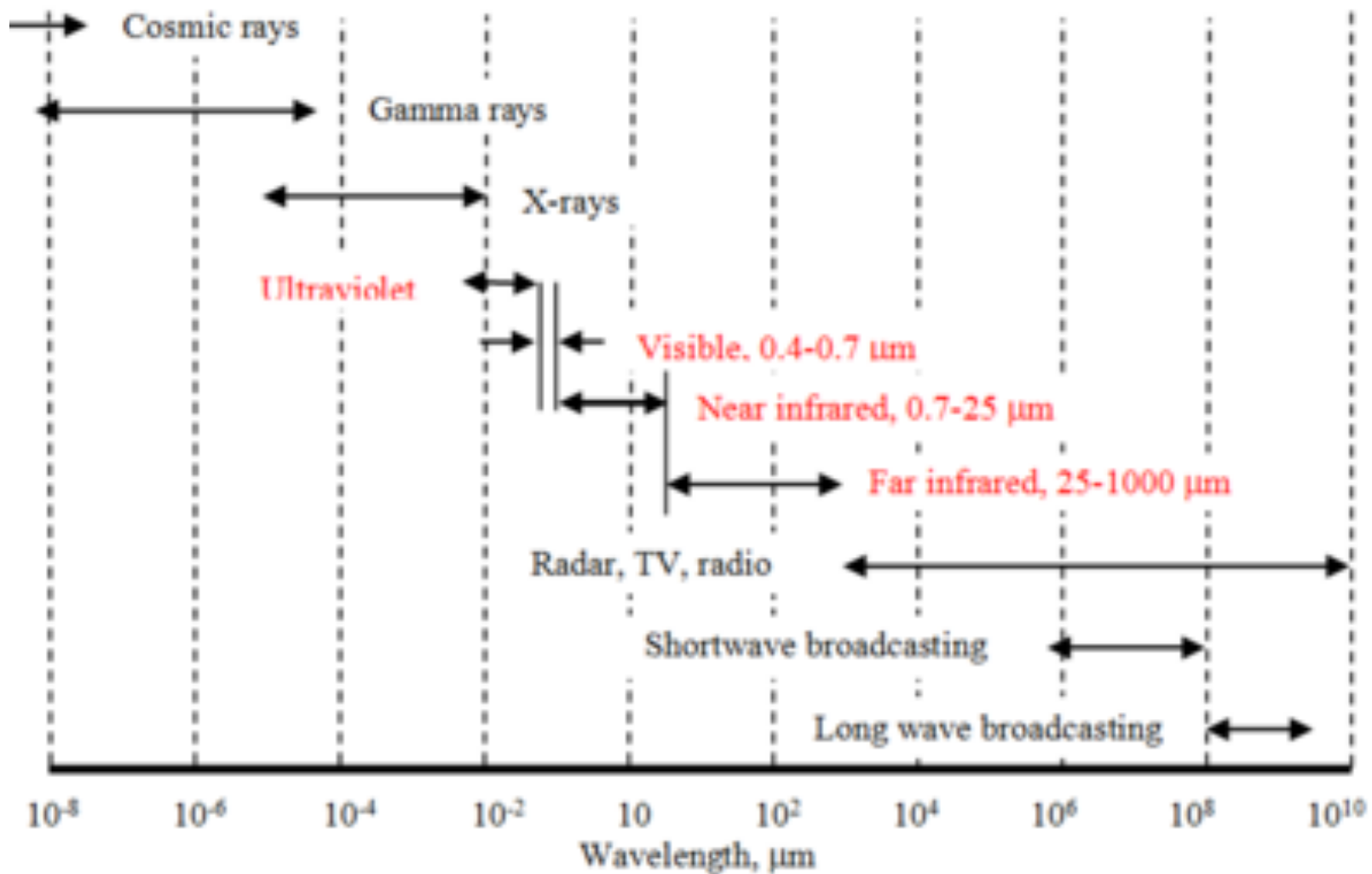
L’assorbimento di radiazione può anche produrre la scomposizione di molecole negli atomi degli elementi che le compongono.

Esempio: la fotodissociazione dell’ossigeno



La radiazione più energetica può anche “strappare” gli elettroni di un atomo dai livelli orbitali più esterni producendo uno ione (radiazione ionizzante)

# Lo spettro della radiazione elettromagnetica

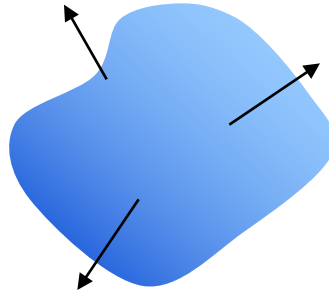


<b>Banda</b>	<b>Lunghezze d'onda <math>\lambda</math></b>
Raggi gamma	< 0.1 nm
Raggi X	0.1 - 10 nm
Ultravioletto	10 - 390 nm
Violetto	390 - 455 nm
Blu scuro	455 - 485 nm
Blu chiaro	485 - 505 nm
Verde	505 - 550 nm
Giallo-verde	550 - 575 nm
Giallo	575 - 585 nm
Arancio	585 - 620 nm
Rosso	620 - 730 nm
Rosso lontano	730 - 760 nm
Infrarosso vicino	760 nm - 3 $\mu\text{m}$
Infrarosso medio	3 - 8 $\mu\text{m}$
Infrarosso lontano	8 $\mu\text{m}$ - 1 mm
Microonde e onde radio corte	1 mm - 100 m
Onde radio lunghe	100 m - 10 km

# Grandezze che caratterizzano la radiazione

**Flusso radiante  $\Phi$**  [ $\text{J s}^{-1} = \text{W}$ ]

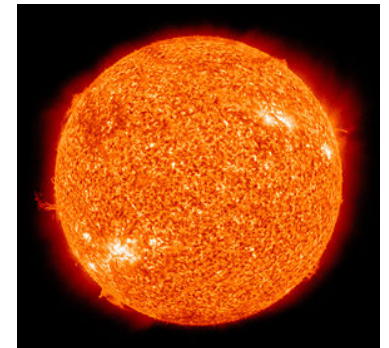
È l'energia radiante che attraversa una data superficie nell'unità di tempo



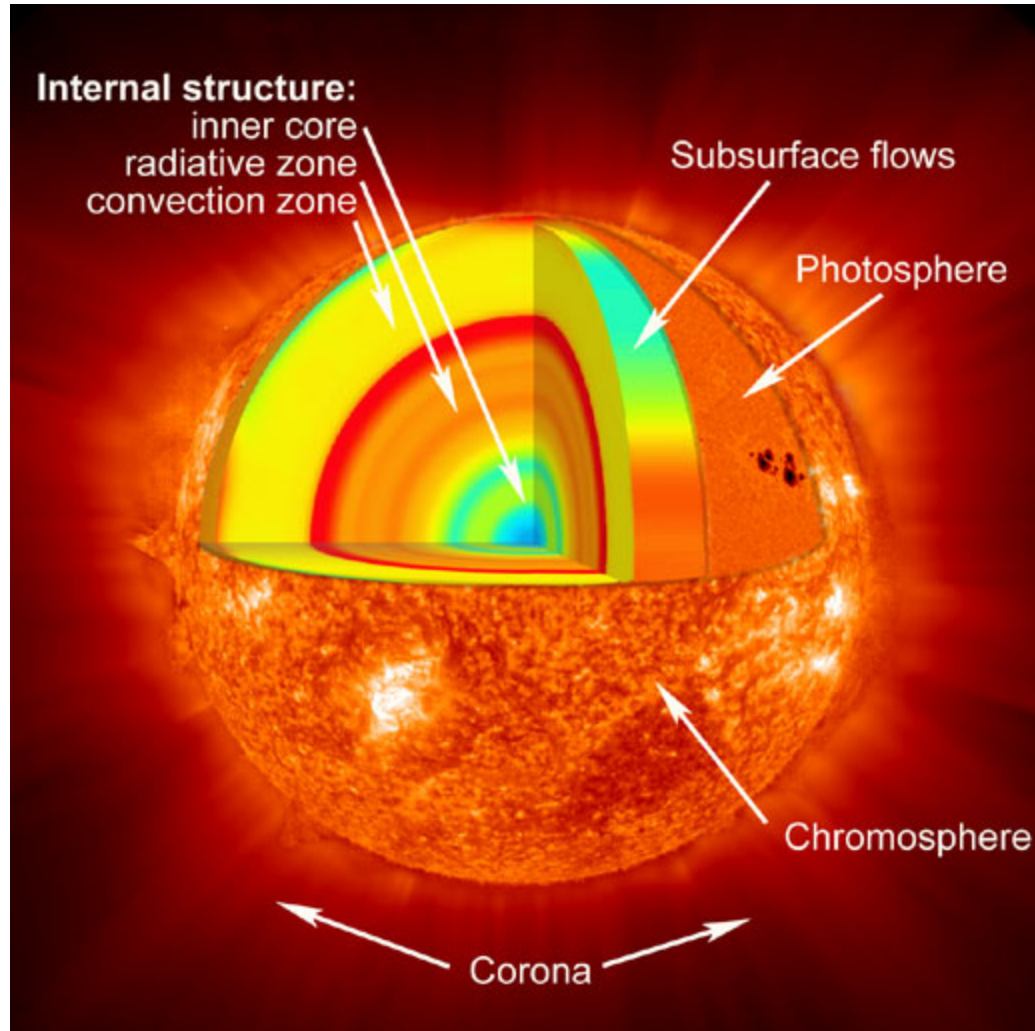
## Esempio

Il flusso radiante complessivo emesso attraverso la superficie solare è pari a

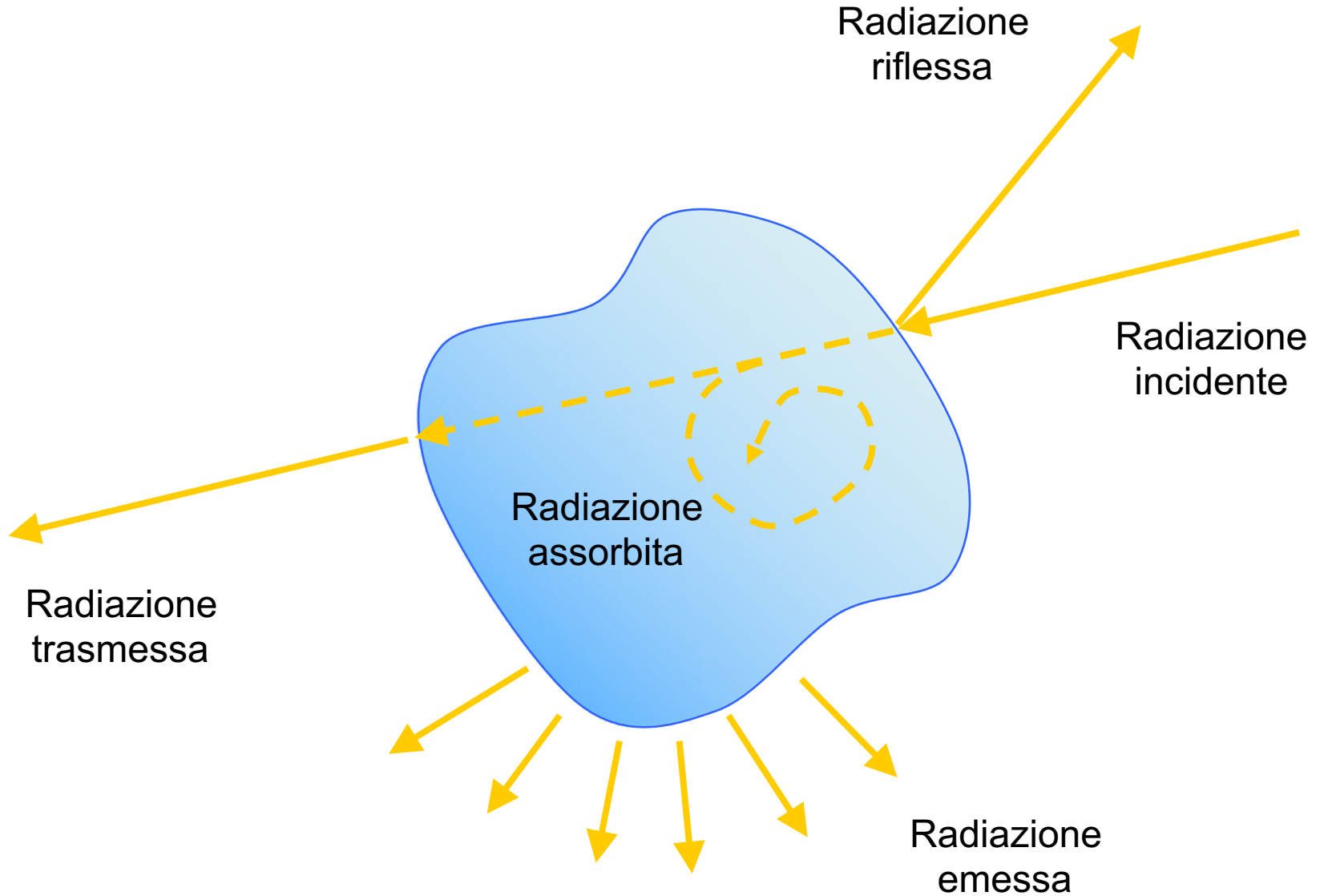
$$\Phi_s = 3.90 \cdot 10^{26} \text{ W}$$



# Struttura del sole



# Interazione radiazione-materia





## Irradianza $E$ [ $W m^{-2}$ ]

È il flusso radiante per unità di superficie

$$\Phi = \int_S E dS$$

## Esempio

La superficie del sole presenta un raggio  $r_s = 7 \cdot 10^8 m$ .

L'irradianza emessa dalla superficie solare è pari a

$$E_s = \frac{\Phi_s}{4\pi r_s^2} = \frac{3.9 \cdot 10^{26} W}{4\pi (7 \cdot 10^8 m)^2} = 6.34 \cdot 10^7 W m^{-2}$$

**Irradianza monocromatica**  $E_\lambda$  [W m<sup>-3</sup>]

È il contributo della componente di lunghezza d'onda  $\lambda$  all'irradianza:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda$$

# Il corpo nero

Un corpo nero è una porzione di materia, contenente un sufficiente numero di componenti elementari (atomi o molecole) da poter trattare le loro interazioni in maniera statistica, che emette/assorbe su tutte le lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico in modo tale da:

- assorbire tutta la radiazione incidente sulla sua superficie (no riflessione, no trasmissione)
- realizzare su ogni lunghezza d'onda  $\lambda$  la massima emissione possibile.

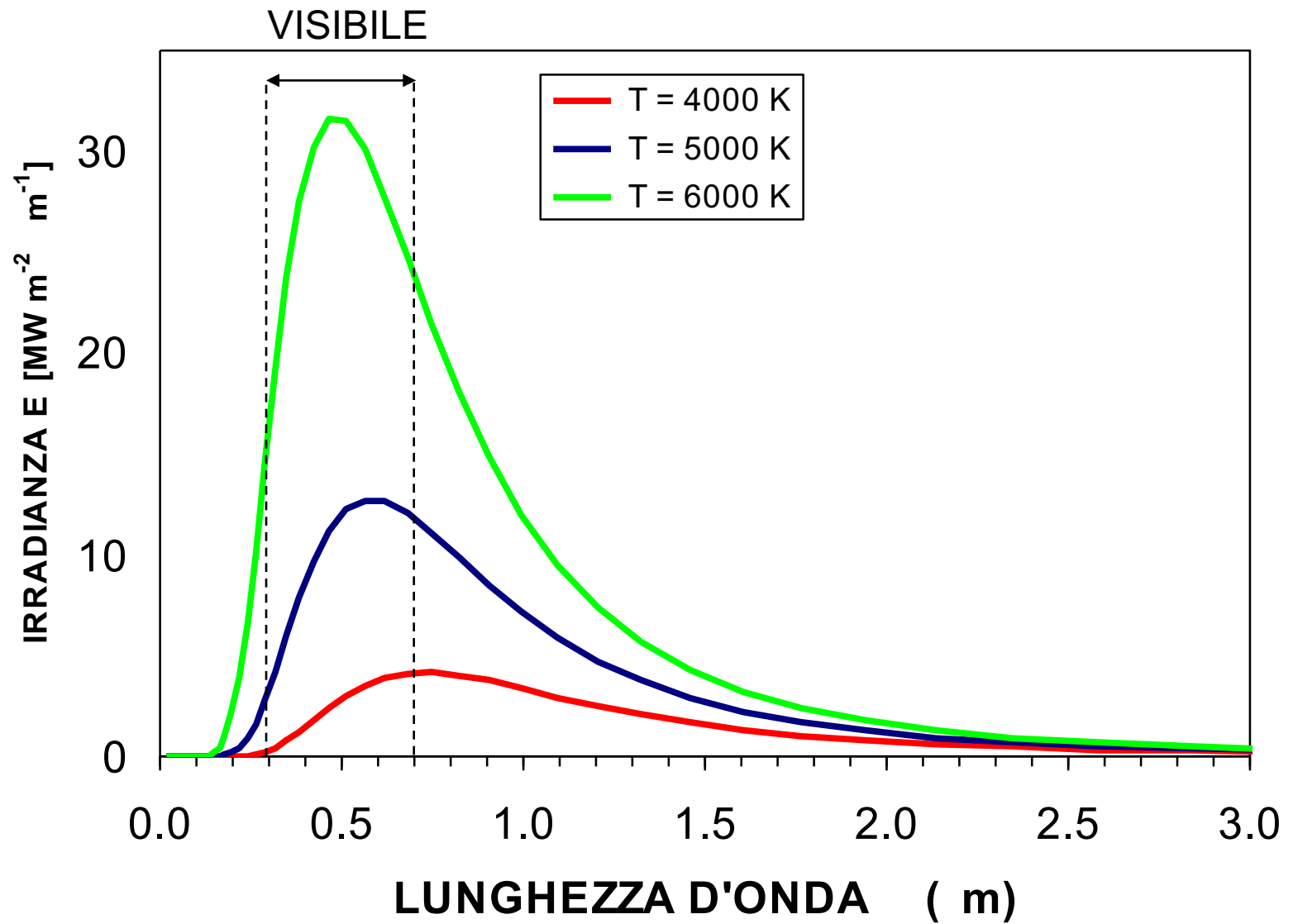
## Irradianza di corpo nero (legge di Plank)

$$E_{\lambda}^* = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}$$

$$C_1 = 2\pi h c^*{}^2 = 3.74 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$C_2 = \frac{hc^*}{k} = 1.44 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

# IRRADIANZA DI CORPO NERO



# Caratteristiche dell'irradianza di un corpo nero

L'irradianza è indipendente dalla direzione di emissione (isotropia)

Per lunghezze d'onda non troppo grandi si può approssimare la formula con:

$$E_{\lambda}^* \approx c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$$

Il massimo dell'irradianza si realizza per:

$$\lambda = \lambda_m = \frac{2897 \mu m K}{T}$$

(Legge dello spostamento di Wien)

## Esempio

Il massimo dell'irradianza di emissione del sole di realizza per  $\lambda_m = 0.475 \mu m$ .  
Determinare la "temperatura di colore" del sole.

$$T = \frac{2897 \mu m K}{0.475 \mu m} = 6100 K$$

## Legge di Stefan-Boltzmann

$$E^* = \int_0^{\infty} E_{\lambda}^* d \lambda = \sigma T^4$$

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

## Esempi

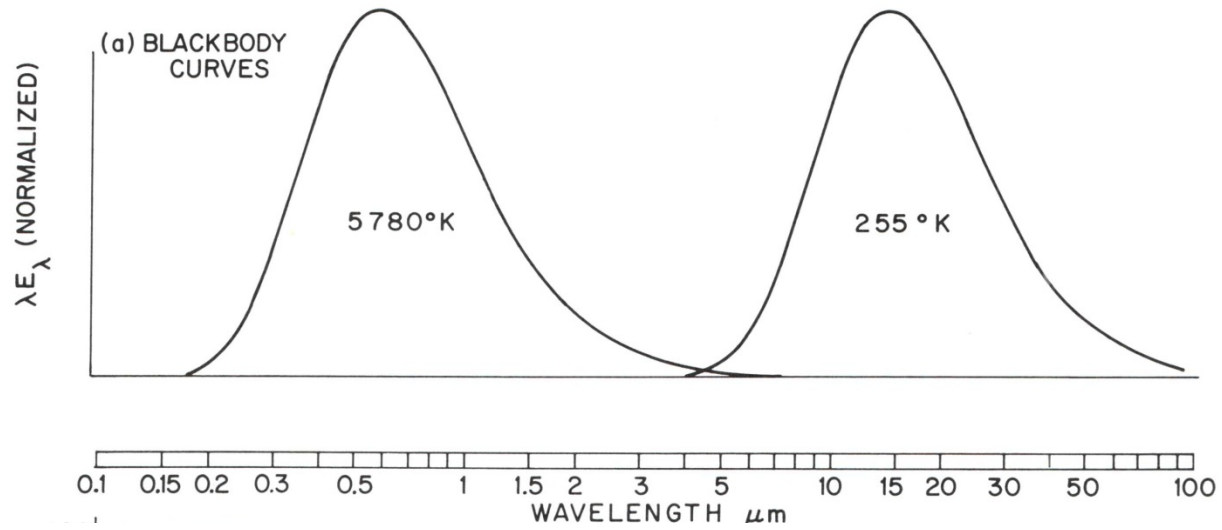
Nota il flusso radiante in uscita dal sole e la distanza media terra-sole  $d$ , si calcoli la costante solare:

$$S = \frac{\Phi}{4\pi d^2} = \frac{3.88 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4 \cdot 3.1416 \cdot (1.496 \cdot 10^{11} \text{ m})^2} = 1380 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Nota l'irradianza alla superficie solare, calcolare la temperatura equivalente di corpo nero del sole, cioè la temperatura che un corpo nero dovrebbe avere per presentare la stessa irradianza:

$$E_s = \sigma T_s^4 \quad \Rightarrow \quad T_s = \left( \frac{E_s}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = \left( \frac{6.34 \cdot 10^7 \text{ W m}^{-2}}{5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}} \right)^{\frac{1}{4}} = 5780 \text{ K}$$





# Corpi grigi

Emissione

$$E_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} E_{\lambda}^*$$

$\varepsilon_{\lambda}$  emissività monocromatica

$\varepsilon$  emissività

$$E = \varepsilon E^* = \varepsilon \sigma T^4$$

Assorbimento

$$E_{\lambda} = a_{\lambda} E_{\lambda}^*$$

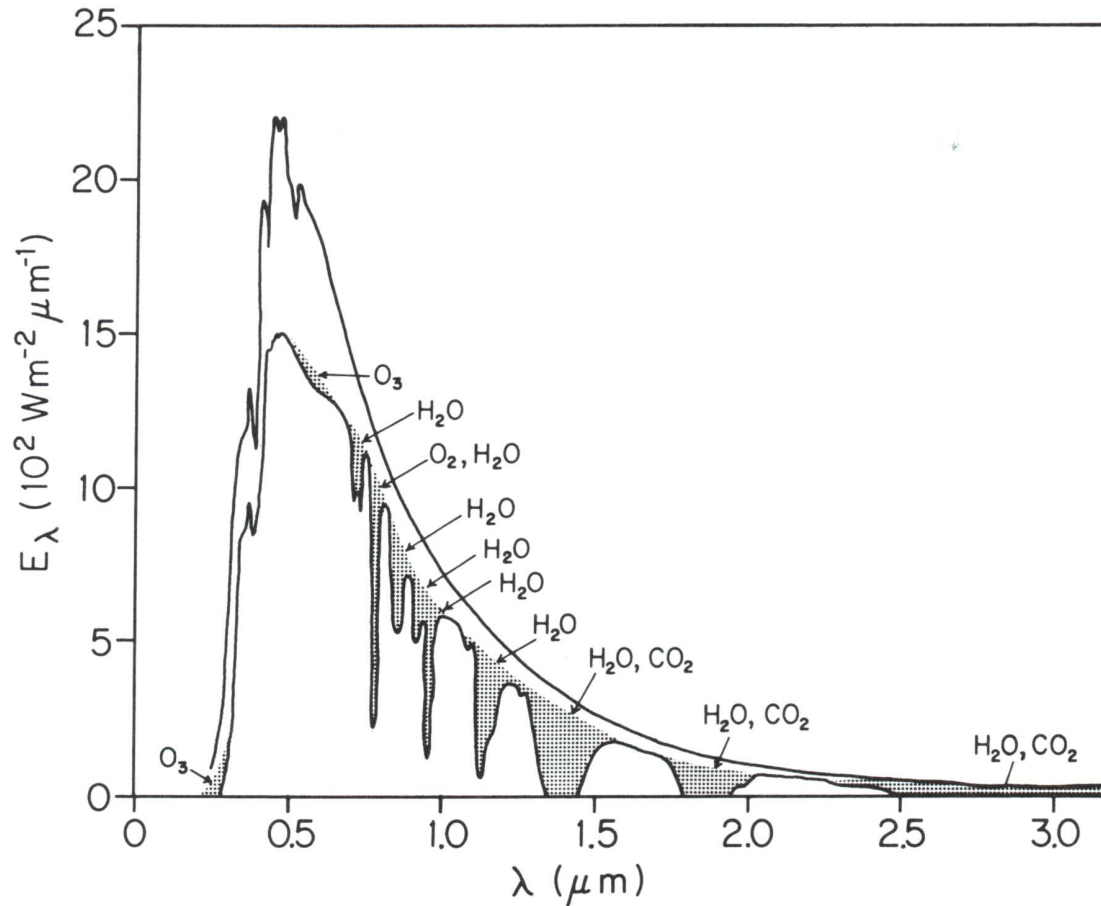
$a_{\lambda}$  assorbività monocromatica

$a$  assorbività

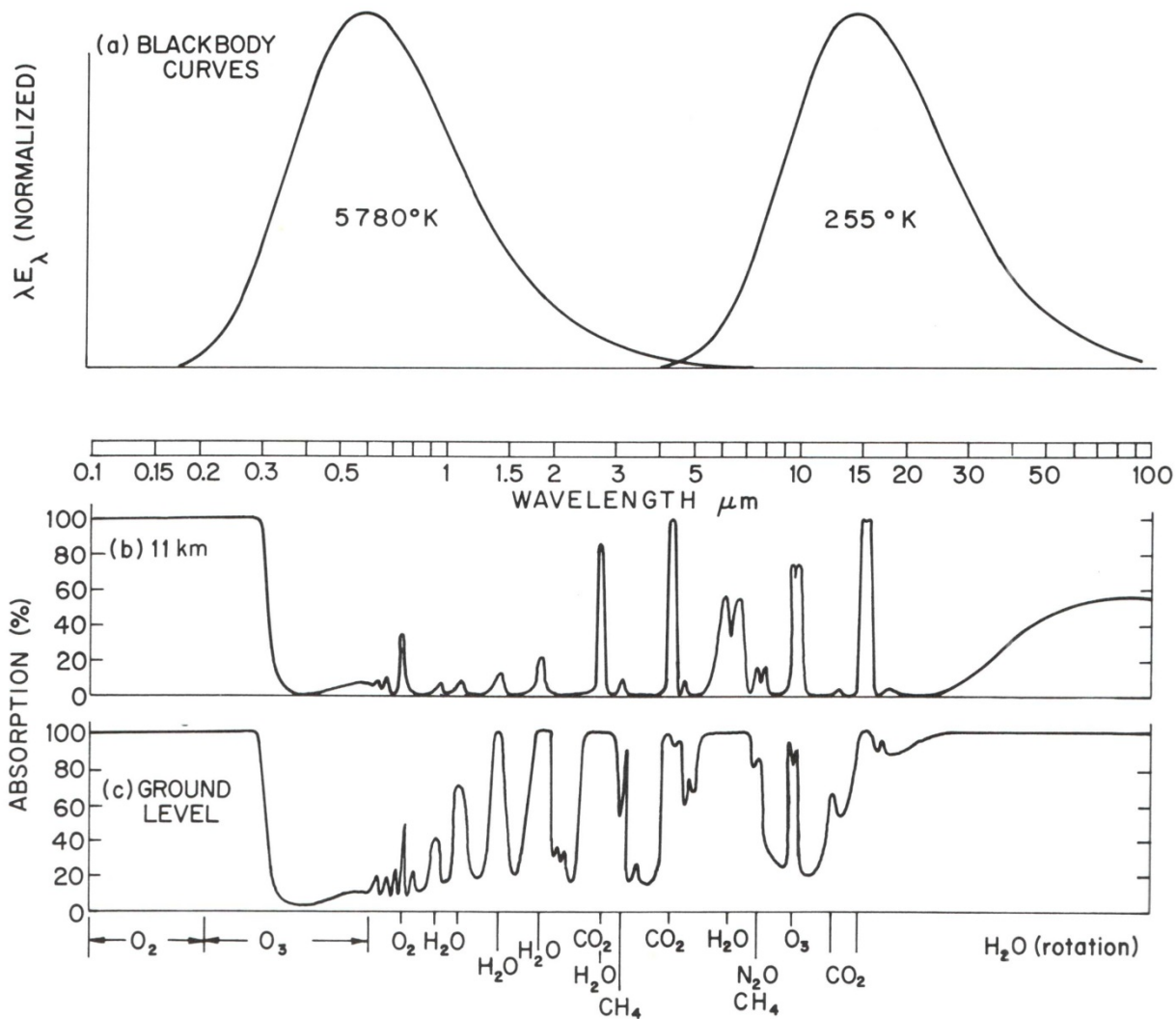
$$E = a E^* = a \sigma T^4$$

Legge di Kirchhoff

$$\varepsilon_{\lambda} = a_{\lambda}$$

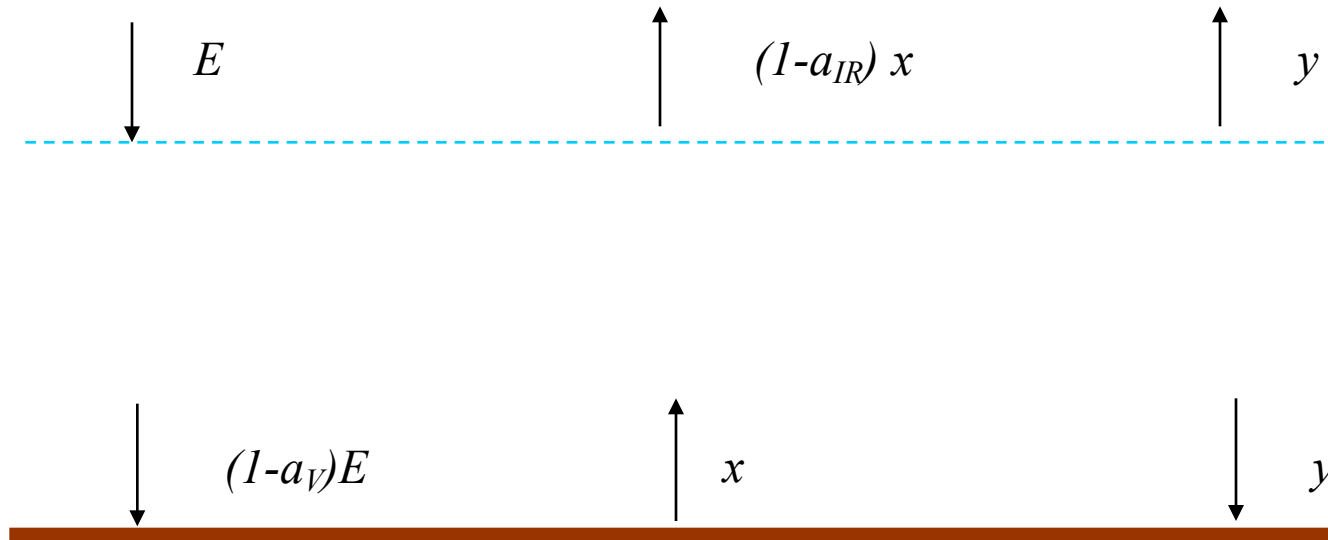


**Fig. 7.7** Spectrum of solar radiation at the “top” of the atmosphere (upper curve) and at sea level (lower curve) for average atmospheric conditions and an overhead sun. The shaded area represents absorption by gaseous constituents, as indicated. [Adapted from “Handbook of Geophysics and Space Environments,” McGraw-Hill, New York (1965), p. 16–20.]



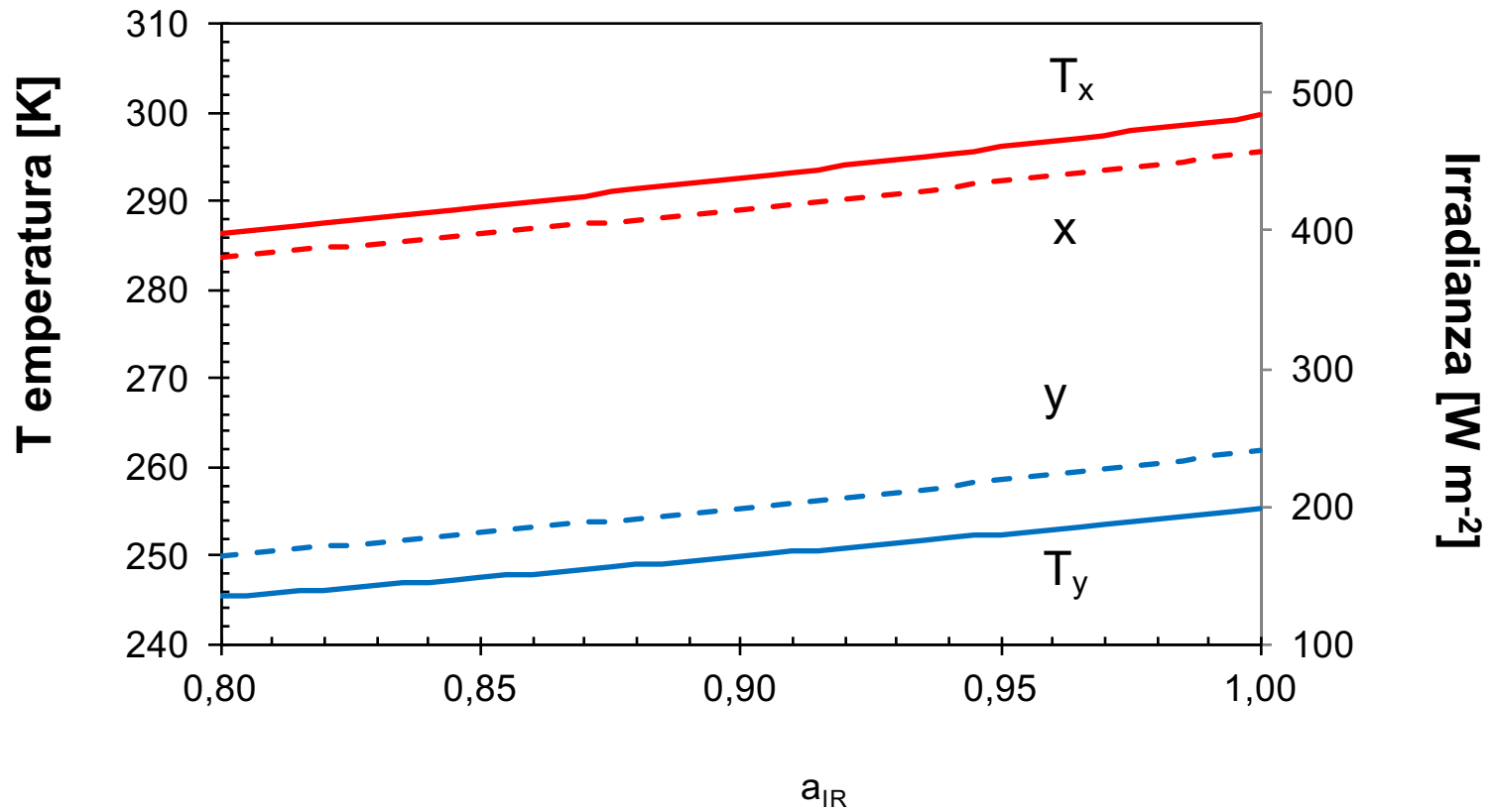
**Fig. 7.8** (a) Normalized blackbody curves for  $5780^\circ\text{K}$  and  $255^\circ\text{K}$ , plotted so that irradiance is proportional to the areas under the curves. (c) Atmospheric absorption in clear air for solar radiation with a zenith angle of  $50^\circ$  and for diffuse terrestrial radiation. (b) Same as (c) but for the portion of the atmosphere lying above the 11-km level, near the middle-latitude tropopause. [Adapted from R. M. Goody, "Atmospheric Radiation," Oxford Univ. Press (1964), p. 4.]

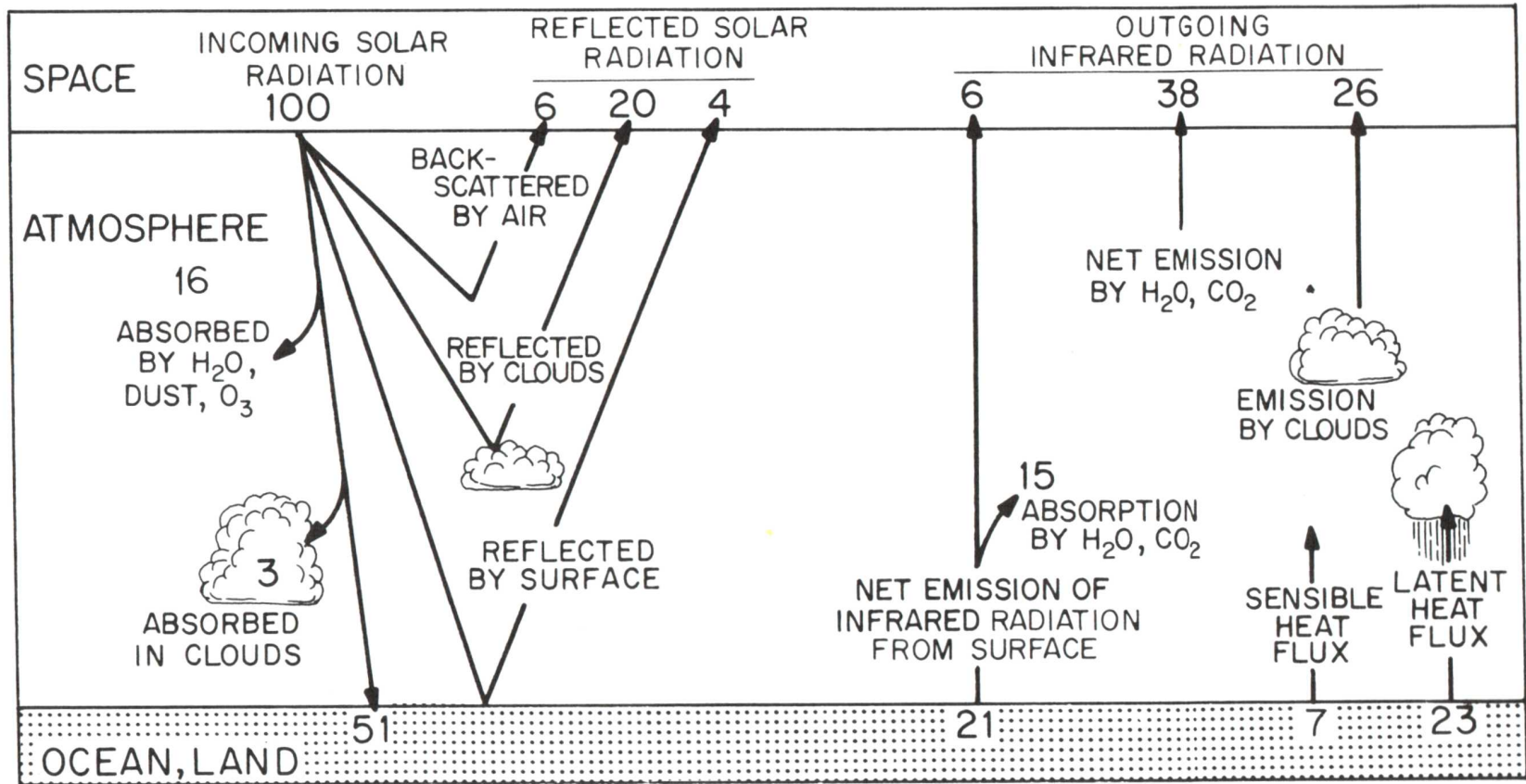
# Effetti dell'assorbimento e dell'emissione atmosferica



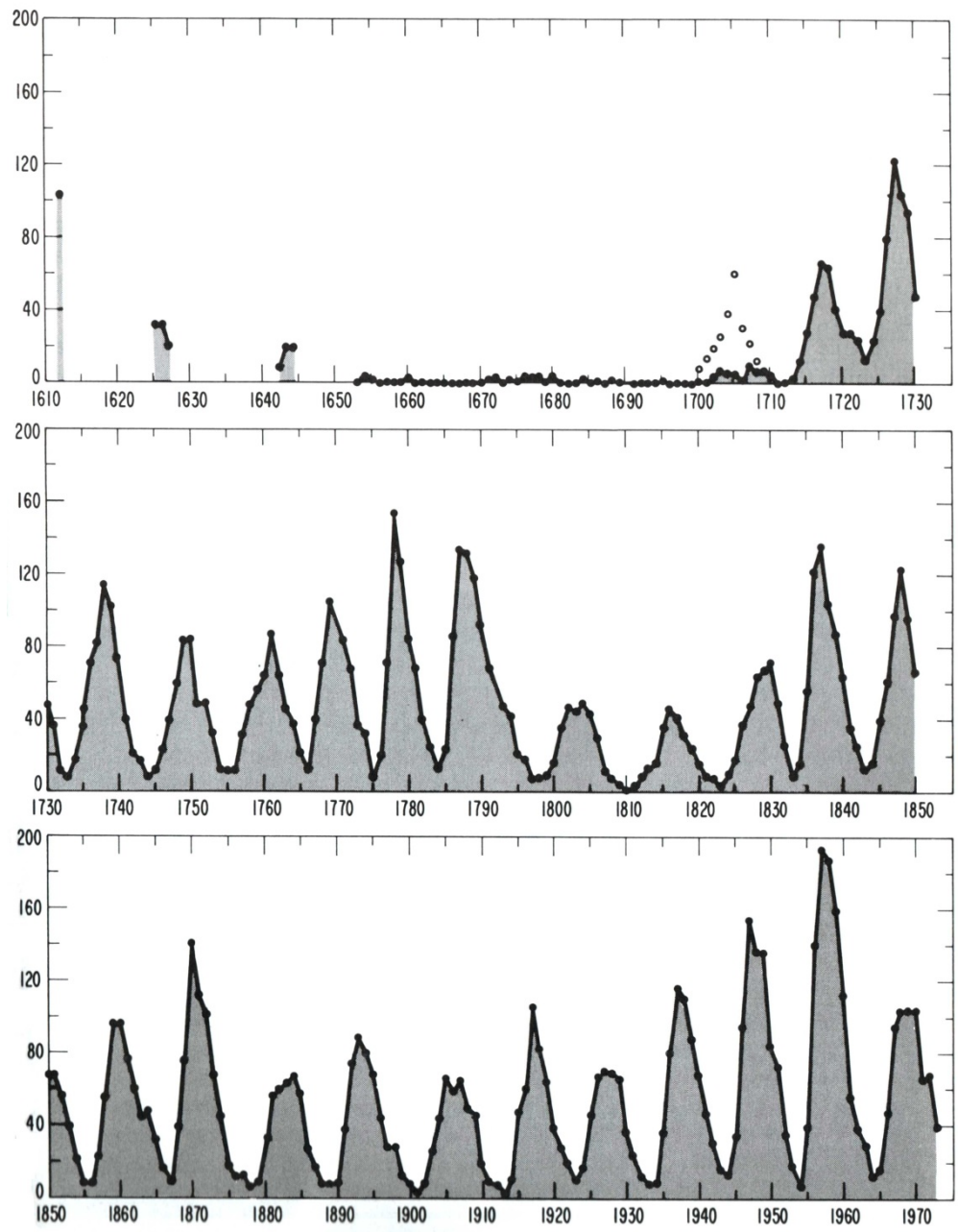
$$\begin{cases} E - (1 - a_{IR})x - y = 0 \\ (1 - a_V)E - x + y = 0 \end{cases}$$

# Temperatura superficiale terrestre e atmosferica in funzione dell'assorbimento nell'IR



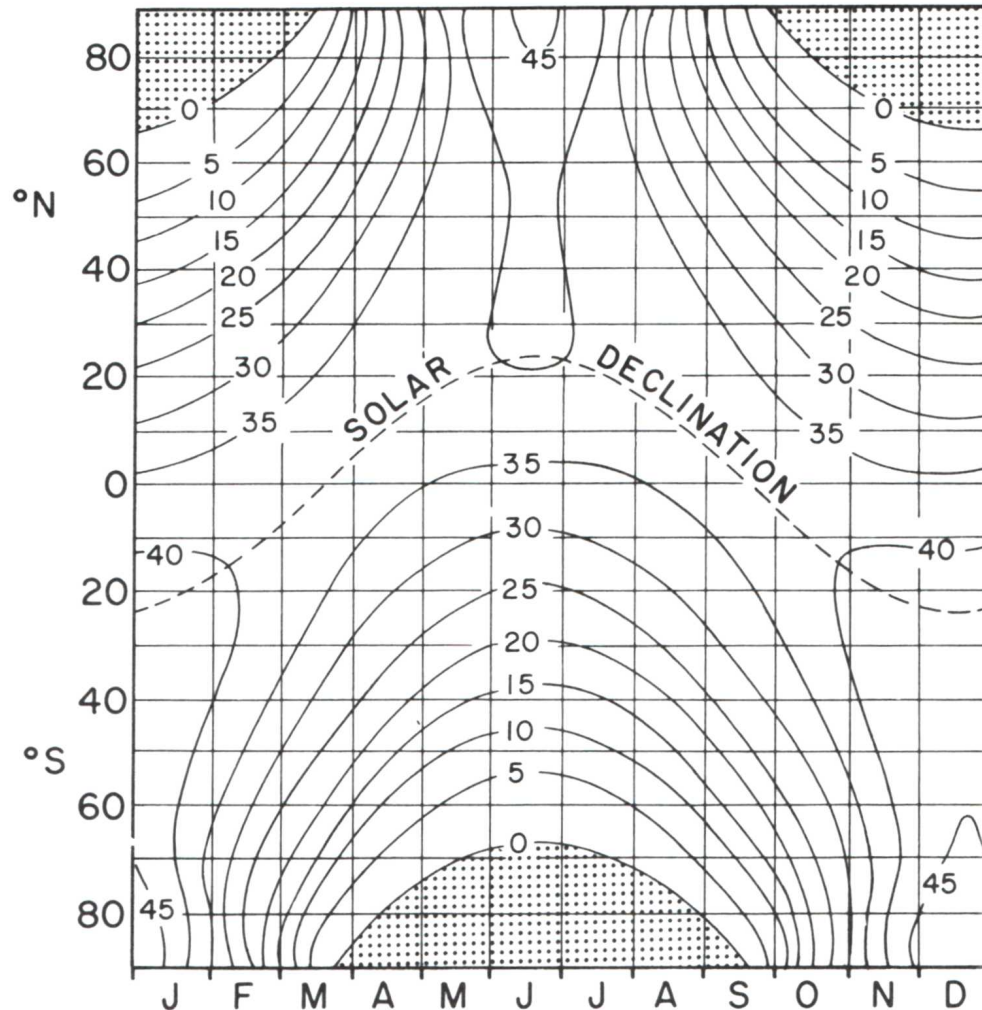


**Fig. 7.1** The annual mean global energy balance for the earth-atmosphere system. (Numbers are given as percentages of the globally averaged solar irradiance incident upon the top of the atmosphere.) See text for further explanation. [Adapted from “Understanding Climatic Change,” U.S. National Academy of Sciences, Washington, D.C. (1975), p. 14, and used with permission.]



**Fig. 7.4** Time series of annual average sunspot number. The lack of sunspot activity during the 17th century is believed to be real. (Courtesy of J. A. Eddy.)





**Fig. 7.16** Solar radiation incident on a unit horizontal surface at the top of the atmosphere as a function of latitude and date, expressed in units of megajoules per square meter per day. [Adapted from “Meteorological Tables” (R. J. List, ed.), 6th ed., Smithsonian Institute, Washington, D.C. (1951), p. 417.]

Radiative Forcing (RF) bar chart for the period 1750–2011 based on emitted compounds (gases, aerosols or aerosol precursors) or other changes.

Red (positive RF) and blue (negative RF) are used for emitted components which affect few forcing agents, whereas for emitted components affecting many compounds several colours are used as indicated in the inset at the upper part the figure.

The vertical bars indicate the relative uncertainty of the RF induced by each component. Their length is proportional to the thickness of the bar, that is, the full length is equal to the bar thickness for a  $\pm 50\%$  uncertainty.

The net impact of the individual contributions is shown by a diamond symbol and its uncertainty (5 to 95% confidence range) is given by the horizontal error bar. ERF<sub>aci</sub> is ERF due to aerosol–cloud interaction.

Black Carbon (BC) and Organic Carbon (OC) are co-emitted, especially for biomass burning emissions (Biomass Burning in the figure) and to a large extent also for fossil and biofuel emissions (Fossil and Biofuel in the figure, where biofuel refers to solid biomass fuels).

[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_Chapter08\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf)

