

Tecniche diagnostiche in infrarosso

Riflettografia R/IR e Termovisione T/IR

Riflettografia R/IR: sfrutta le proprietà di trasparenza di alcuni pigmenti e leganti pittorici nel vicino infrarosso (0.7-2.5 μm).

Termovisione T/IR: sfrutta le proprietà di emissione di corpo nero dei materiali nel medio-lontano infrarosso.

Presentazione dei risultati sotto forma di immagini della grandezza osservata :

Riflettanza nel primo caso,
radianza nel secondo caso.

Diagnostica per immagini con relativi programmi di analisi.

La tecnica risulta possibile grazie alla **trasparenza atmosferica** e la disponibilità di dispositivi in grado di **rivelare la radiazione infrarossa** con una buona risoluzione spaziale.

L'immagine infrarossa è in **scala di grigi**, in alcuni casi per una migliore lettura vengono presentate con una **scala di colori**, ma è puramente indicativo.

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 t$$

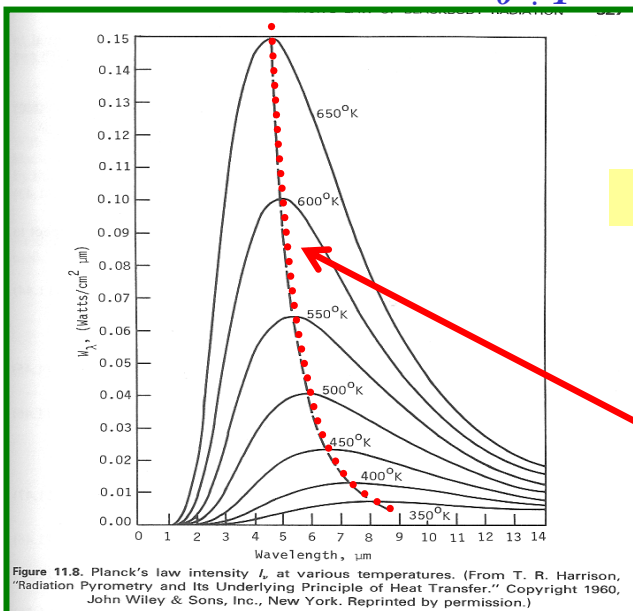
$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$

Quantità di energia trasmessa (red arrow)
 emissività o emittanza $0 \div 1$ (blue arrow)
 costante di Boltzmann (purple arrow)
 Superficie del corpo (red arrow)
 Temperatura del corpo (blue arrow)
 tempo (purple arrow)

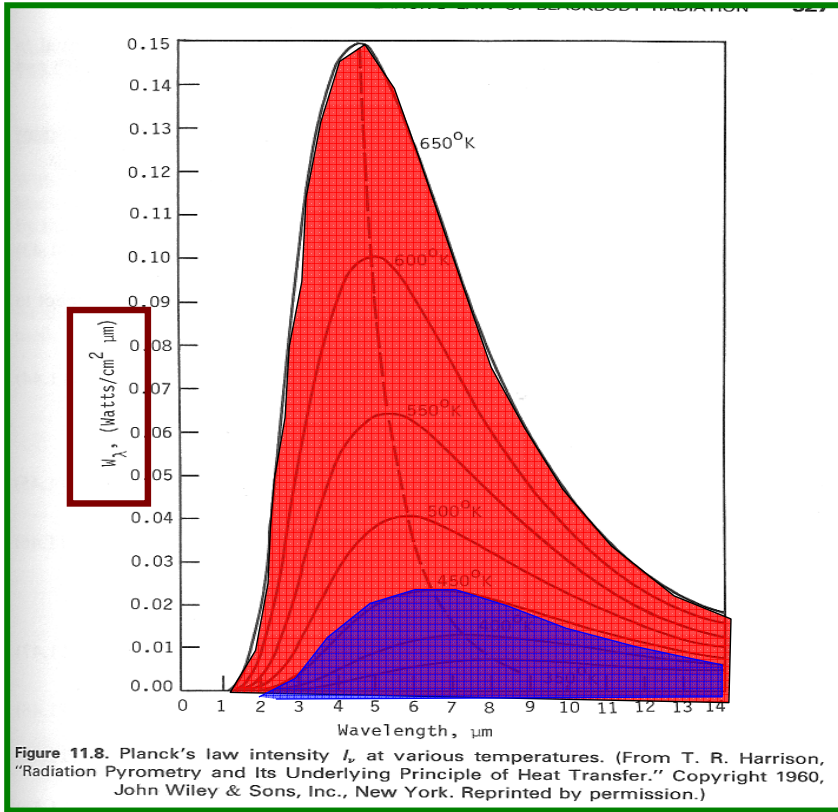
il fenomeno descritto dalla legge di Boltzmann

La Termovisione si basa su

E lo spettro della radiazione emessa (legge di Planck).



$$\lambda_{\max} T = \text{costante} = 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$



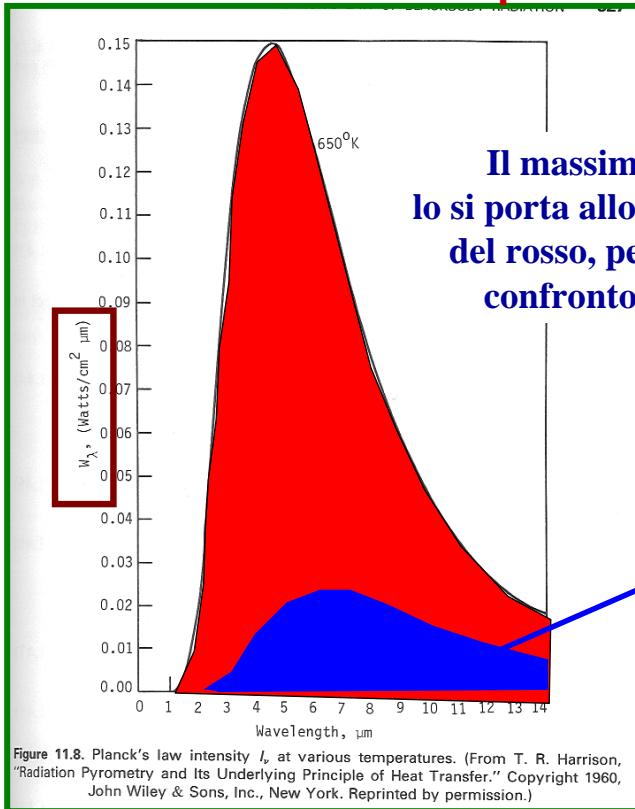
La legge di Boltzmann
descrive tutta la
radiazione emessa

$$\frac{Q}{A \cdot t} = \sigma \cdot T^4$$

a 650 K
si ha la radianza in
rosso.

a 450 K
si ha minore radianza

Spettri normalizzati



Il massimo del blu
lo si porta allo stesso livello
del rosso, per vedere il
confronto con le λ .

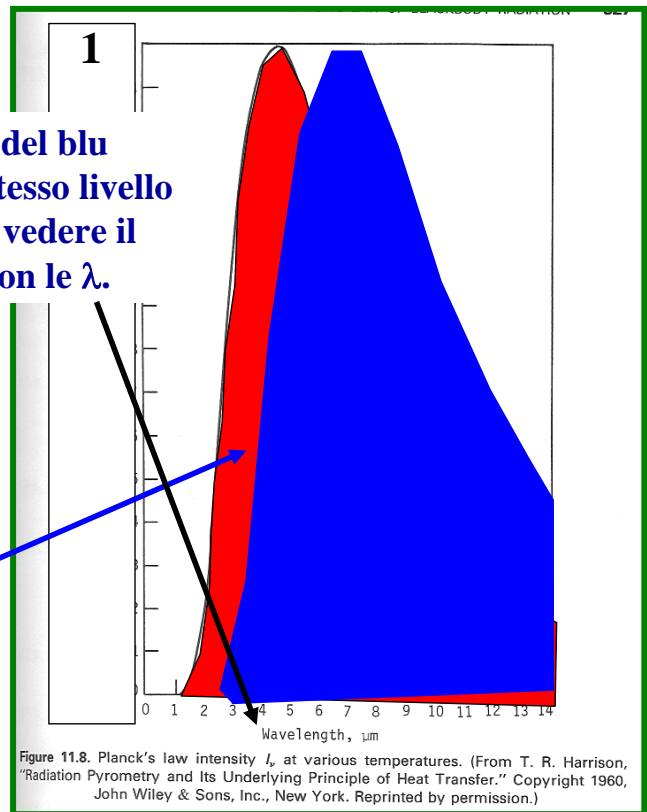
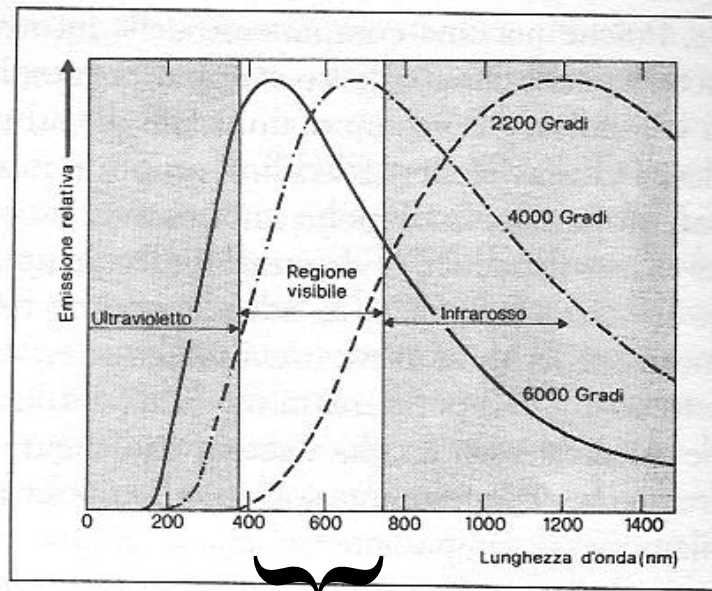


Fig. 35. L'emissione di un corpo nero incandescente a 2.200 gradi (lampadina a filamento di tungsteno), a 4.000 gradi (lampada ad arco) e a 6.000 gradi (superficie del Sole). La luce emessa diventa sempre più bianca al crescere della temperatura perché contiene le varie componenti cromatiche del visibile in maniera più equilibrata.



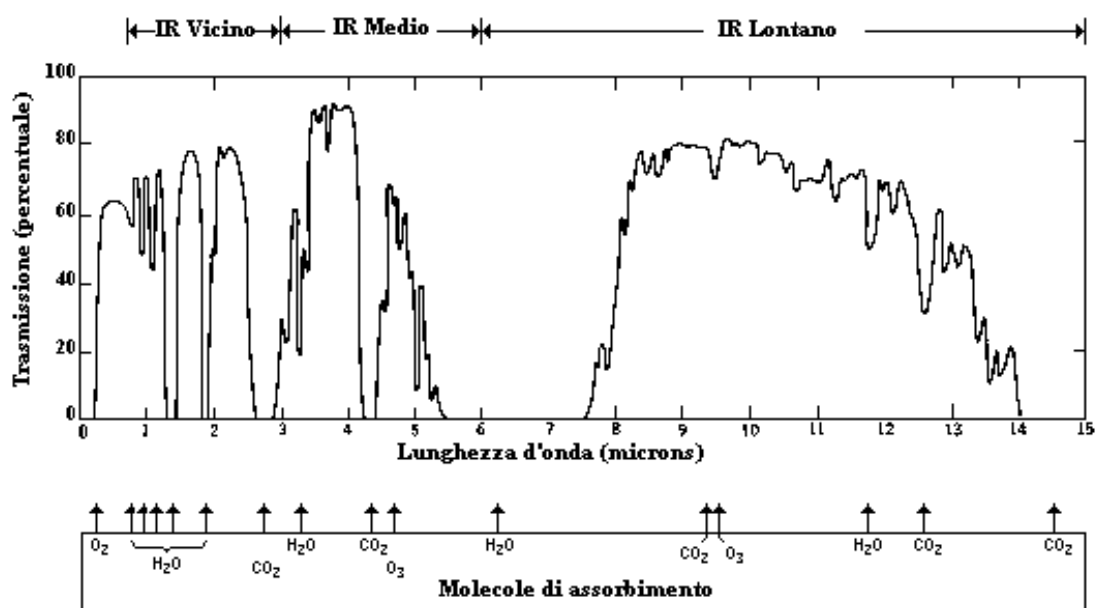
Con l'occhio noi vediamo una finestra di tutta la radiazione emessa dal sole.

I rivelatori nell'infrarosso
 possiamo considerarli come
“occhi” sensibili in una finestra di radiazione IR.

Trasparenza dell'aria all'IR

Ci permette di osservare la radiazione emessa dai corpi.

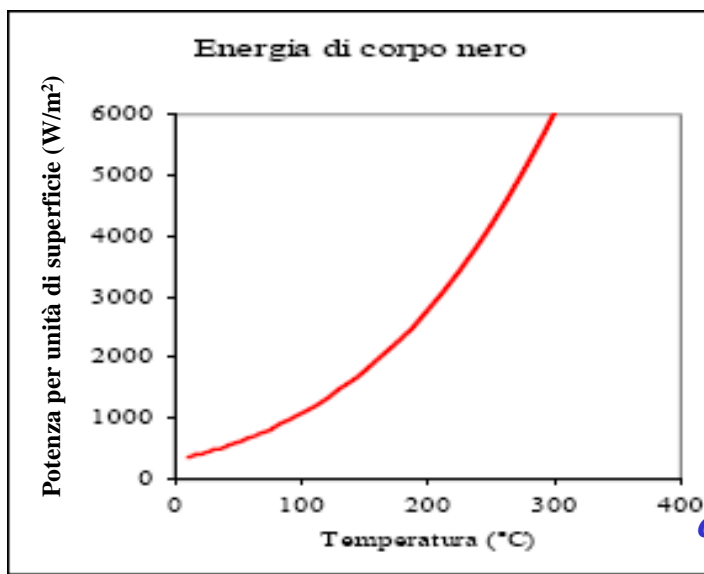
[Link 2](#)



Termografia (specchietto riassuntivo)

La radiazione rilevata dalle termocamere viene “tradotta” in un valore di T .

Energia (radiazione- calore) che giunge da un corpo è proporzionale a T^4



$$\frac{\text{Potenza}}{\text{superficie}} = \frac{Q}{At} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Per piccole variazioni di T
si hanno grandi variazioni
di Energia



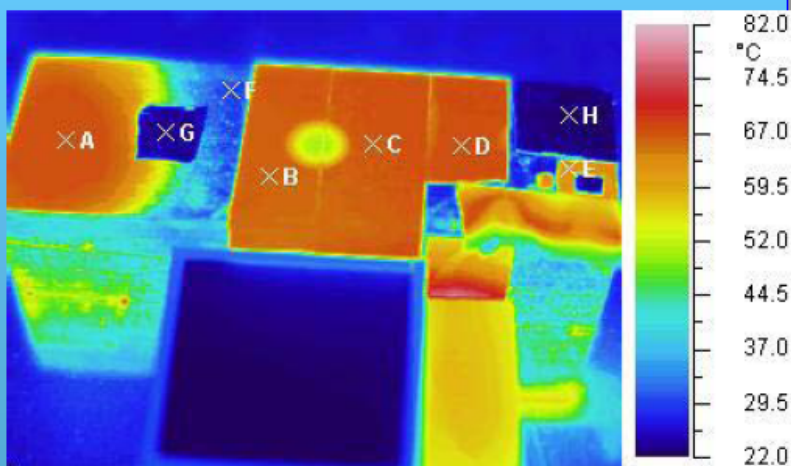
Elevata sensibilità
del metodo

Gli oggetti reali non emettono
come corpi neri per i quali $\varepsilon=1$.

Corpi reali: emittanza ([link3](#))

Fonti esterne di radiazione possono influenzare la lettura di T .

Materiali con emittività differente



A	67,80 °C	E = 0,98
B	67,80 °C	E = 0,95
C	67,80 °C	E = 0,97
D	67,80 °C	E = 0,99
E	67,80 °C	E = 0,87
F	67,80 °C	E = 0,15
G	67,80 °C	E = 0,03
H	67,80 °C	E = 0,01

Errori apparenti dovuti
alla diversa emittività
dei materiali

Sistemi video termografici

Sistemi in grado di fornire un'immagine istantanea della radianza di oggetti opachi nell'infrarosso.

Nota l'emittanza spettrale dei materiali è possibile fornire una mappa di distribuzione di temperatura.

Sistema di diagnostica non invasiva e possibilità di monitoraggio esteso e continuo.

Rivelatore IR: convertitore di energia IR assorbita in segnale elettrico. Fotorivelatori e termorivelatori

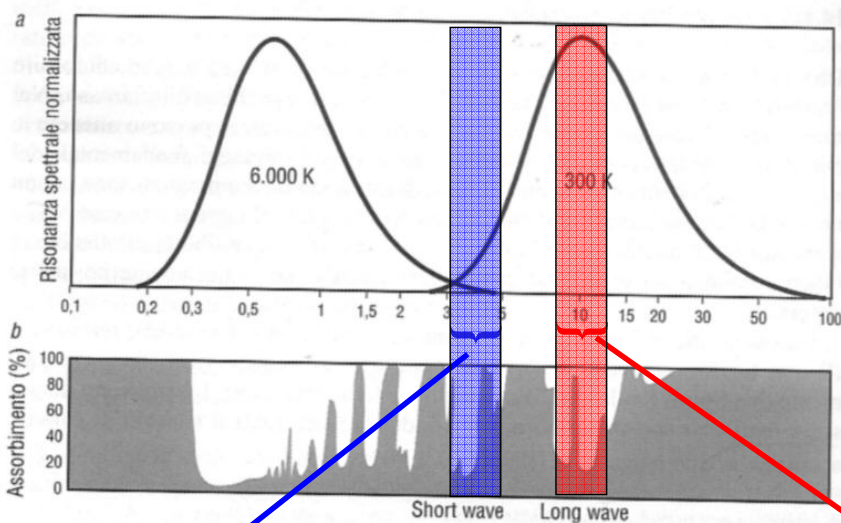
Fotorivelatori: materiali a semiconduttore in grado di convertire direttamente l'assorbimento di fotoni IR in segnale elettrico.

Per esempio semiconduttori, elettroni possono andare in banda di conduzione mediante fotoni di energia IR, e sono poi rilevati come segnale elettrico.

Termorivelatori: assorbimento di energia e misura di T dalla variazione di proprietà elettriche degli elementi sensibili: termocoppie, bolometri, pirometri.

Tali sistemi richiedono spesso il raffreddamento della parte sensibile.

Figura 14.2 Spettri normalizzati di due corpi neri assimilabili all'irraggiamento del sole (6000 K) e di un corpo a temperatura ambiente (300 K) (a). Bande di assorbimento dell'atmosfera terrestre. In ascissa la lunghezza d'onda in micrometri (b)



Termocamere **short wave**, banda spettrale (3-5 μm) quantità di radiazione minima e si ha una sovrapposizione con l'irraggiamento solare nella medesima banda.

Termocamere **long wave**, banda spettrale (8-12 μm) sebbene meno sensibili lavorano in una banda spettrale dove la quantità di energia è maggiore e non c'è disturbo dalla radiazione solare.

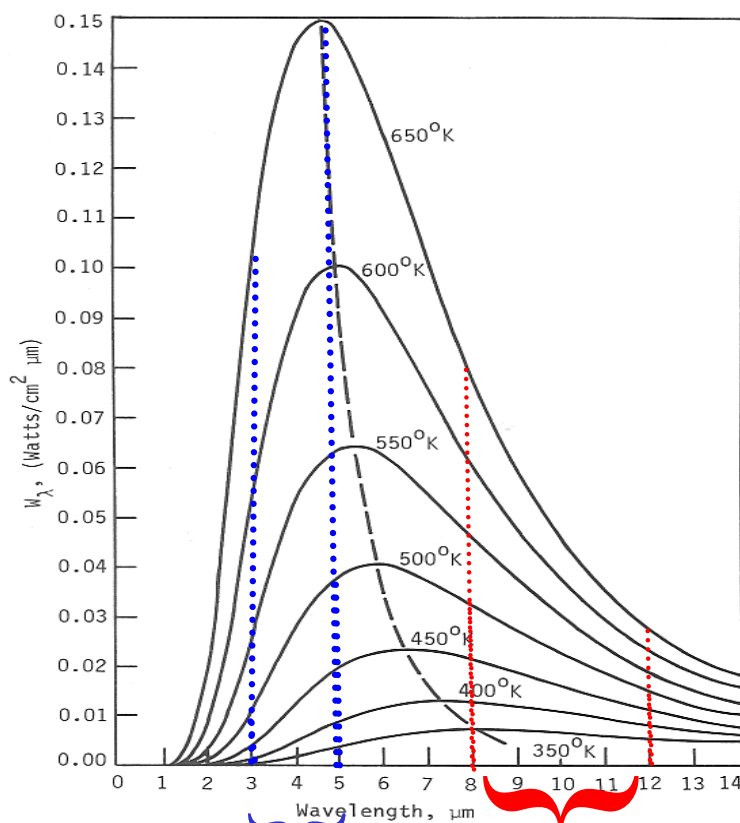


Figure 11.8. Planck's law intensity I_λ at various temperatures. (From T. R. Harrison, "Radiation Pyrometry and Its Underlying Principle of Heat Transfer." Copyright 1960, John Wiley & Sons, Inc., New York. Reprinted by permission.)

Sia con un rivelatore short wave, che con un rivelatore long wave un corpo più caldo emette più radiazione. Il rivelatore "lo vedrà" più "luminoso".

- *La radianza che interessa la termovisione sono onde elettromagnetiche nella regione dell'infrarosso detto appunto termico.*
- *Approfondiamo alcuni argomenti relativi alle onde elettromagnetiche dal punto di vista generale.*

e

- *la loro interazione con la materia*

Onde elettromagnetiche

$c = \lambda \nu$ *Le onde elettromagnetiche hanno la stessa velocità nel vuoto: la velocità della luce.* $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Relazione tra energia e frequenza per ogni "colore"

(Planck - Einstein): $E = h \nu$

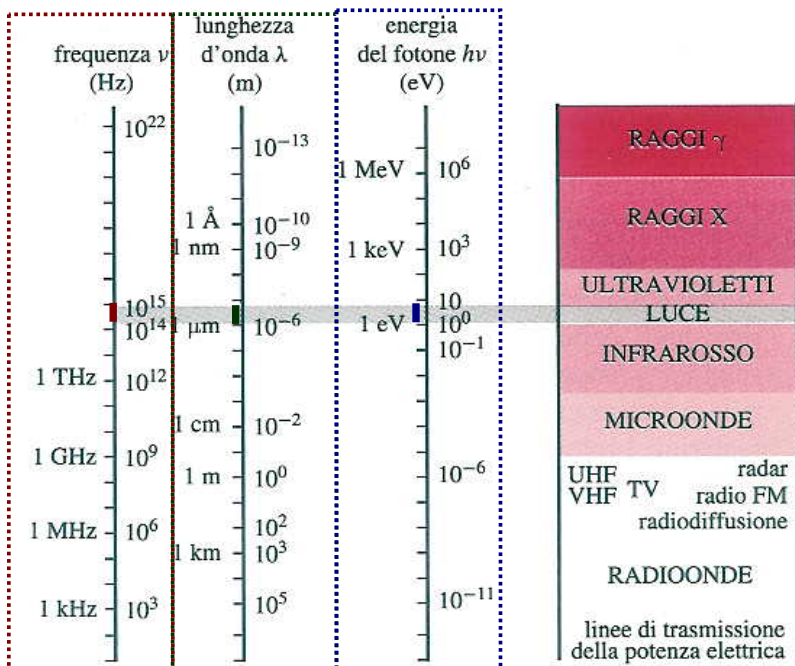
$$E = h \nu = \frac{h c}{\lambda} = \frac{(6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \cdot (2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s})}{\lambda [\text{m}]} = \frac{1.988 \cdot 10^{-25}}{\lambda [\text{m}]} \text{ J} \cdot \text{m}$$

*Un'altra unità di misura usata per l'energia: $1 \text{ eV} = 1.60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$,
Energia acquisita da un elettrone e^- su una ddp ΔV 1 Volt.*

$$E = \frac{1.24 \cdot 10^{-6} [\text{eV} \cdot \text{m}]}{\lambda}$$

λ espresso in m.

$$\begin{cases} \bullet \frac{10^9 \text{ nm}}{\text{m}} = \frac{1240 [\text{eV nm}]}{\lambda}; \lambda \text{ espresso in nm} \\ \bullet \frac{10^6 \mu\text{m}}{\text{m}} = \frac{1.24 [\text{eV } \mu\text{m}]}{\lambda} \lambda \text{ espresso in } \mu\text{m} \end{cases}$$



*La radiazione può essere presentata in vari modi.
Per la luce visibile avremo i seguenti intervalli in:*

Frequenza ν

$\nu = 790 \div 395 \text{ THz}$

Lunghezza d'onda λ

$380 \div 760 \text{ nm}$

Energia $h \nu$

$3.26 \div 1.63 \text{ eV}$

Quantizzazione in fisica

Quanti di materia: unità di materia elettroni e protoni

Quanti di carica: carica elementare $1.60 \cdot 10^{-19}$ C

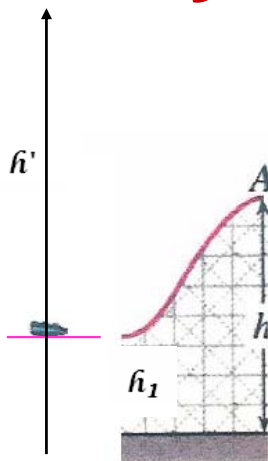
**Quanti di luce: fotoni $h\nu$ ogni “colore” di
onda e.m, ha la sua energia $E= h\nu$**

Questo spiega l'emissione di corpo nero e l'effetto fotoelettrico

**La luce trasporta energia, e i fotoni hanno una quantità di energia
precisa.**

Anche l'energia risulta quantizzata.

Comprendere la quantizzazione



Come possiamo fornire energia?

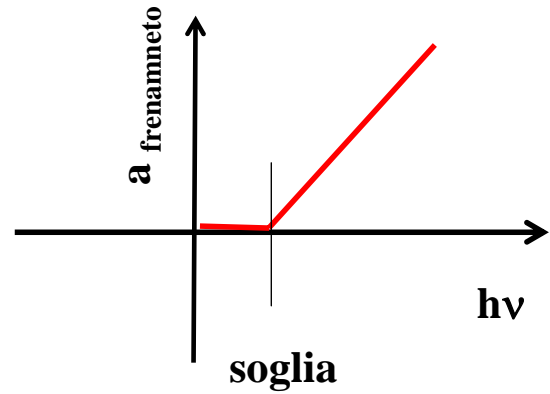
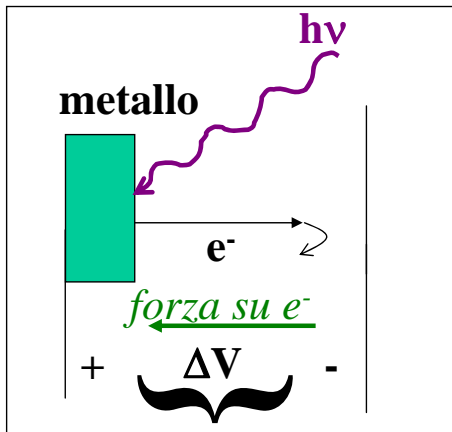
**Dal punto di vista classico,
possiamo fornire energia in modo
CONTINUO.**

**Superata la configurazione a quota h (energia?),
cosa succede?**

Il corpo ha energia residua, $mg(h'-h)$. Che tipo di energia è?

$$mg(h'-h) = \frac{1}{2}mv^2$$

Effetto fotoelettrico (fotocellule-ascensori)



Andando verso λ più piccole si ha necessità di frenare di più gli elettroni, ovvero gli e^- escono con maggiore energia.

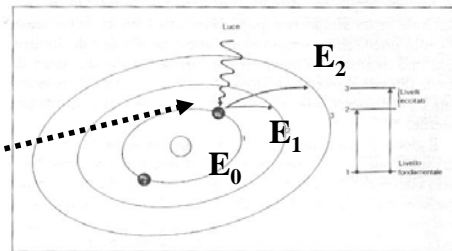
Aumentando l'intensità della radiazione, di stesso colore, aumentano il numero di elettroni emessi, ma l'energia con cui escono dipende dal colore λ o ν

La quantizzazione introdotta da Planck per spiegare la radiazione di corpo nero, spiega anche l'effetto fotoelettrico.

Interazione radiazione - materia

La radiazione quindi è costituita da tanti corpuscoli, quanti di luce (detti fotoni), la cui energia è fissata dalla loro lunghezza d'onda o dalla frequenza di oscillazione.

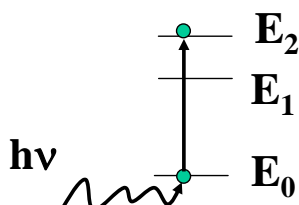
Questi corpuscoli interagiscono con gli elettroni presenti nella materia.



Nel caso di un atomo isolato gli elettroni hanno delle orbite fisse con una determinata energia

Assorbimento

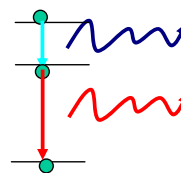
$$h\nu = E_2 - E_0$$



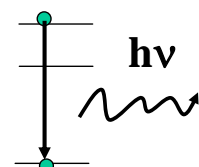
Emissione

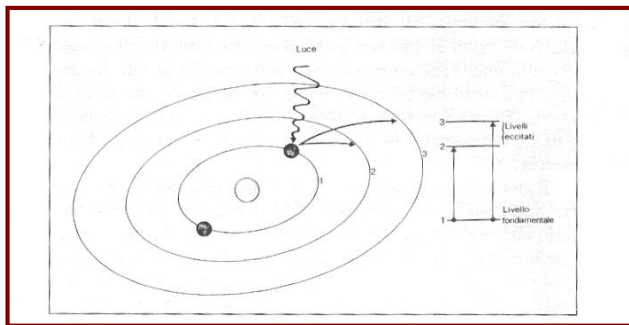
$$h\nu = E_2 - E_1$$

$$h\nu = E_1 - E_0$$

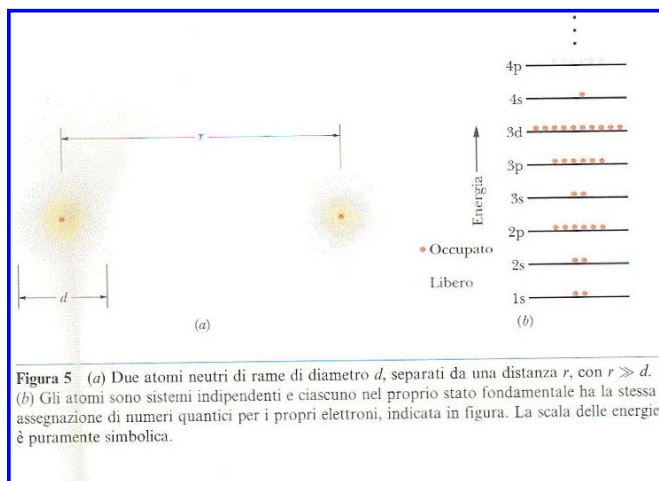


$$h\nu = E_2 - E_0$$

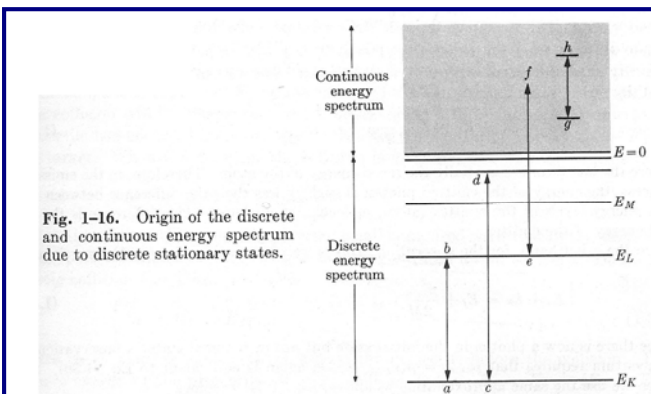




Schemino spaziale delle orbite di un atomo

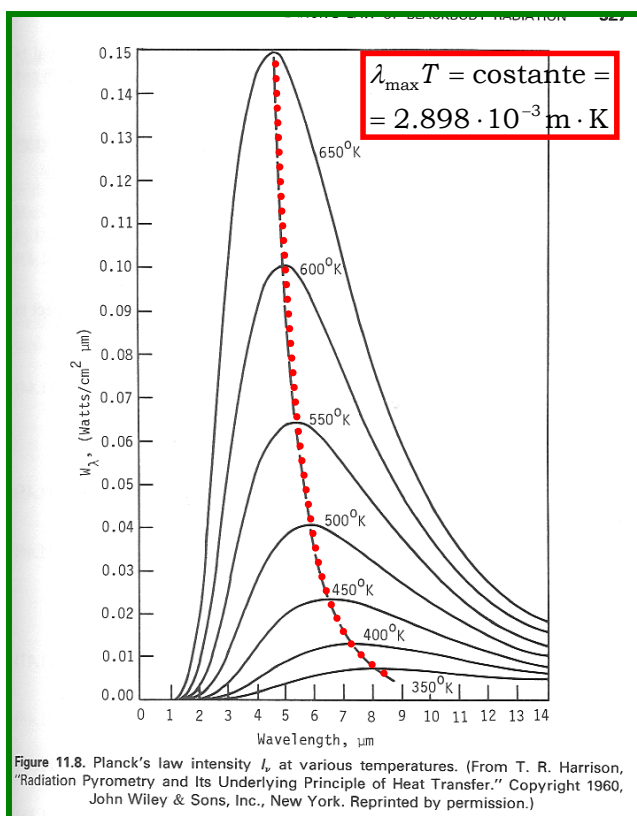


Schema energetico di un atomo.

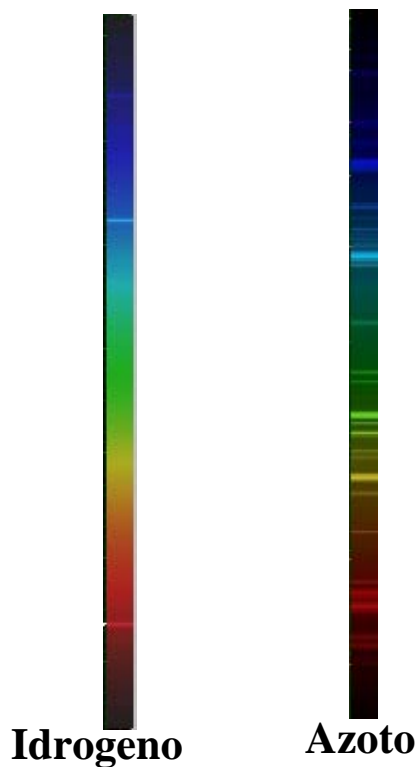


Casi estremi: corpo nero e gas

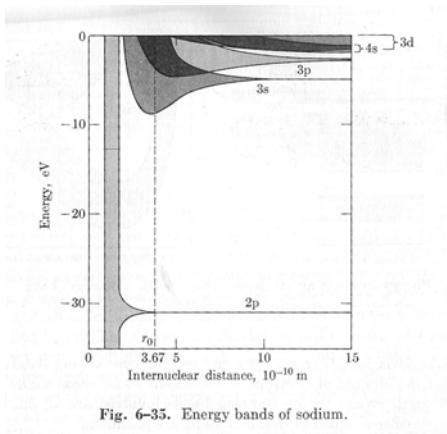
Spettro continuo per il corpo nero



Spettro a righe per i gas.



Casi estremi: corpo nero e gas.



Aggiungendo atomi per formare un reticolo si ha che i livelli energetici degli atomi si allargano. Si può avere anche sovrapposizione.

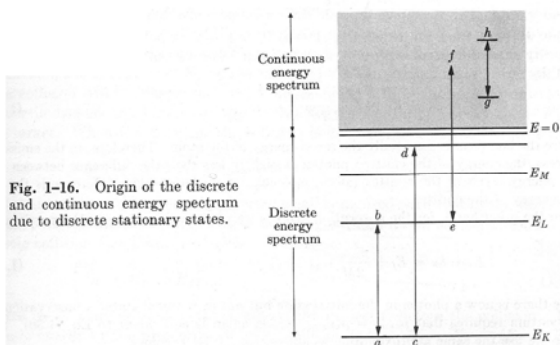


Fig. 1-16. Origin of the discrete and continuous energy spectrum due to discrete stationary states.

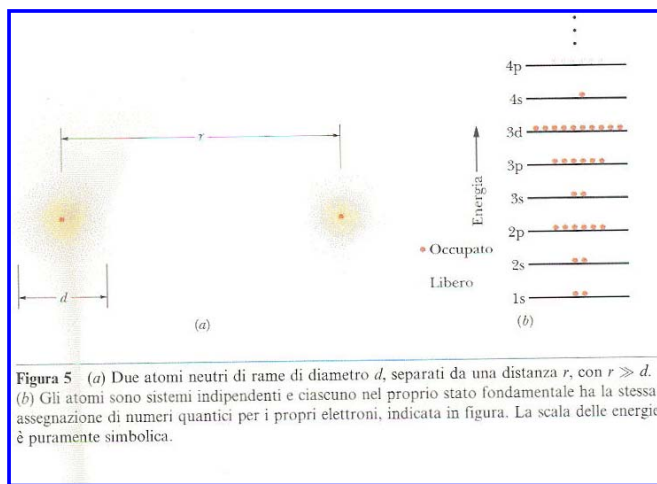
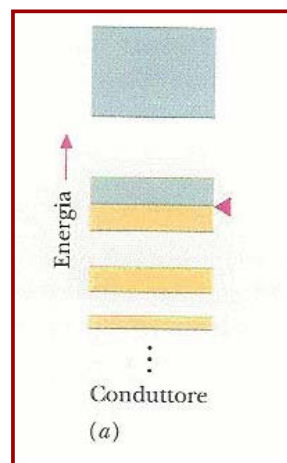
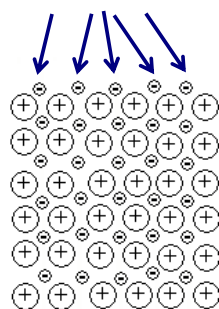


Figura 5 (a) Due atomi neutri di rame di diametro d , separati da una distanza r , con $r \gg d$. (b) Gli atomi sono sistemi indipendenti e ciascuno nel proprio stato fondamentale ha la stessa assegnazione di numeri quantici per i propri elettroni, indicata in figura. La scala delle energie è puramente simbolica.

I metalli

Elettroni mobili



Partiamo dai singoli atomi di rame.

Nell'orbitale più esterno hanno un solo elettrone.

Nella stato solido i metalli formano una struttura ordinata di atomi che condividono gli elettroni più esterni (gli elettroni possono muoversi liberamente su tutta la struttura). Questo spiega perché conducono facilmente il calore e la corrente elettrica. Inoltre gli elettroni possono assorbire fotoni ed aumentare così la mobilità nel reticolo (energia cinetica).

Con un grafico nel quale indichiamo sulla verticale l'energia possiamo rappresentare un metallo, Con una banda di energia mezza piena, che ha la possibilità di assorbire energia o cederla facilmente.cinetica).

Nei metalli l'elettrone assorbe un fotone e si trova su un livello di energia maggiore. Poi ritorna nel suo stato di equilibrio riemettendo un fotone.

Come se non fosse successo nulla

Ecco perché i metalli presentano un aspetto lucido. Se la superficie è liscia riemette anche nella stessa direzione di provenienza (specularità).

Ma perché i metalli hanno colori diversi?

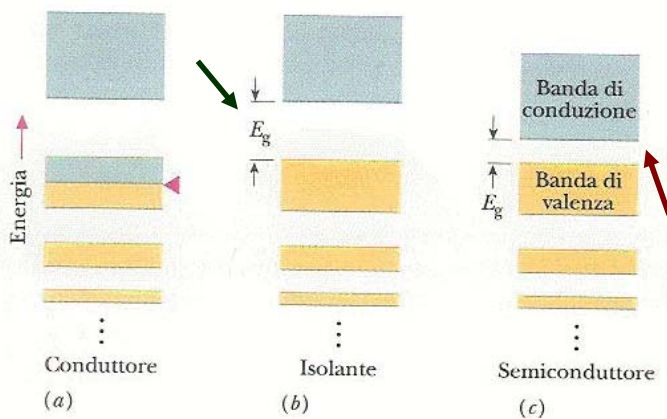
I meccanismi di assorbimento e riemissione non sono assolutamente identici.

L'oro assorbe luce bianca e riemette nel giallo-rosso, la luce è impoverita di verde e blu.

Nel rame il fenomeno è più accentuato.

Argento, platino ed alluminio riemettono per il visibile come assorbono.

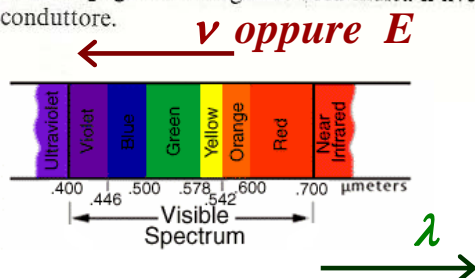
Dallo spettro di righe allo spettro di bande.



Gli isolanti presentano una soglia di energia (E_g), se la luce (fotoni) che non supera questa soglia non si ha assorbimento.

I semiconduttori hanno una soglia bassa nella regione dell'infrarosso, assorbono luce visibile e si possono confondere alla vista con dei metalli.

Figura 7 Una rappresentazione idealizzata delle bande energetiche per (a) un conduttore, (b) un isolante e (c) un semiconduttore. Le bande complete sono colorate di giallo, mentre le bande vuote sono in grigio. Il triangolino rosa indica il livello di Fermi per il conduttore.



Un materiale con soglia sulle frequenze del visibile, se illuminato da luce presenterà un colore complementare ai "colori" assorbiti (idrocromatici). I.e. materiale con soglia a 550 nm le componenti non assorbite saranno rosse e gialle, pertanto il materiale assume colore arancione.

Assorbimento della radiazione visibile e colore

Nel caso di soglia di assorbimento nell'UV 400 nm :

380 - 436 nm: viola

436 - 495 nm: blu

495 - 566 nm: verde

566 - 589 nm: giallo

589 - 627 nm: arancio

627 - 780 nm: rosso

i materiali sono trasparenti al visibile.

Vetro, quarzo, diamante. Plexiglas e cellophan. Lenti di plastica.

Il vetro ha una soglia a 350 nm, protezione dagli UV.

Mescolando a questi materiali opportune sostanze se ne modifica l'assorbimento, si ottengono altre colorazioni:

colorazione allocromatica.

Quarzo costituito da SiO_2 . Assorbimento da 190 nm, sia in forma cristallina che amorfa.

Introducendo impurezze o per la presenza di anomalie nella struttura cristallina si hanno varie colorazioni.

Corindone (Al_2O_3) è trasparente, il rubino (Al_2O_3 con impurezze di cromo) presenta un colore rosso vivo. Gli atomi di cromo inducono assorbimento nella regione del verde, e quindi si ha colore rosso quando il materiale è illuminato da luce bianca.

I pigmenti colorati fanno uso di metalli di transizione, che non avendo tutti gli orbitali interni saturi di elettroni, presentano bande di assorbimento nel visibile. Cromato di Piombo (giallo di cromo), ossido di cromo (verde di cromo), granati (rossi per il ferro).

I materiali in trasparenza assumo il colore delle componenti luminose non assorbite, colore di volume.

I metalli assorbono e restituiscono la luce visibile (specularità).

La maggior parte dei materiali sono opachi, non riusciamo a vedere attraverso essi (colore di superficie),

La luce nei materiali è influenzata in 3 modi: riflessione, diffusione ed assorbimento.

Per la riflessione la luce incidente su una superficie perfetta viene riflessa in modo speculare e l'oggetto ha un aspetto lucido.

Su una superficie granulosa la luce viene diffusa in tutte le direzioni, l'oggetto ha un aspetto opaco. Il resto della luce penetra nel materiale. Se è omogeneo le componenti non assorbite emergono dall'altra parte mantenendo la direzione di arrivo (trasparenza).

Se è costituito da granuli allora la luce diffonde in varie direzioni.

Se non viene assorbita allora si ha colore bianco. Altrimenti si osserva il colore complementare alle componenti assorbite.

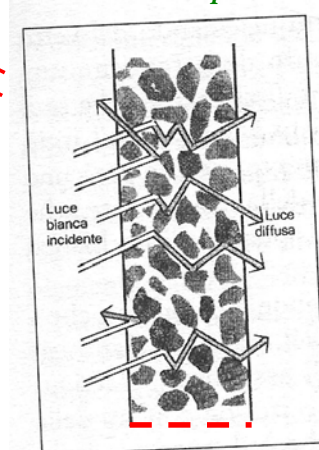


Fig. 46. Un materiale granuloso non trasmette la luce in linea retta, ma la diffonde in tutte le direzioni. Se i grani del materiale sono trasparenti a tutte le componenti del visibile, la luce diffusa è ancora bianca (neve, gesso, ecc.). Se invece i grani assorbono certe lunghezze d'onda, la luce diffusa, e con essa la colorazione del materiale, è complementare alla luce che viene assorbita. Questo è il caso dei materiali opachi colorati.



Dettaglio sull'energia ad altre lunghezze d'onda

Per molecole di gas in condizioni ideali:

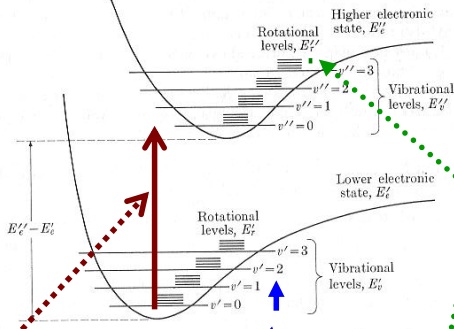
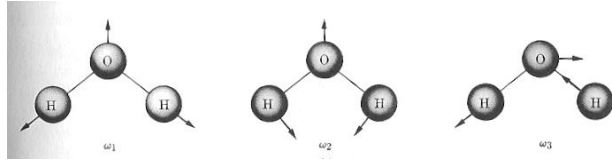


Fig. 5-39. Vibrational and rotational energy levels associated with two electronic states.



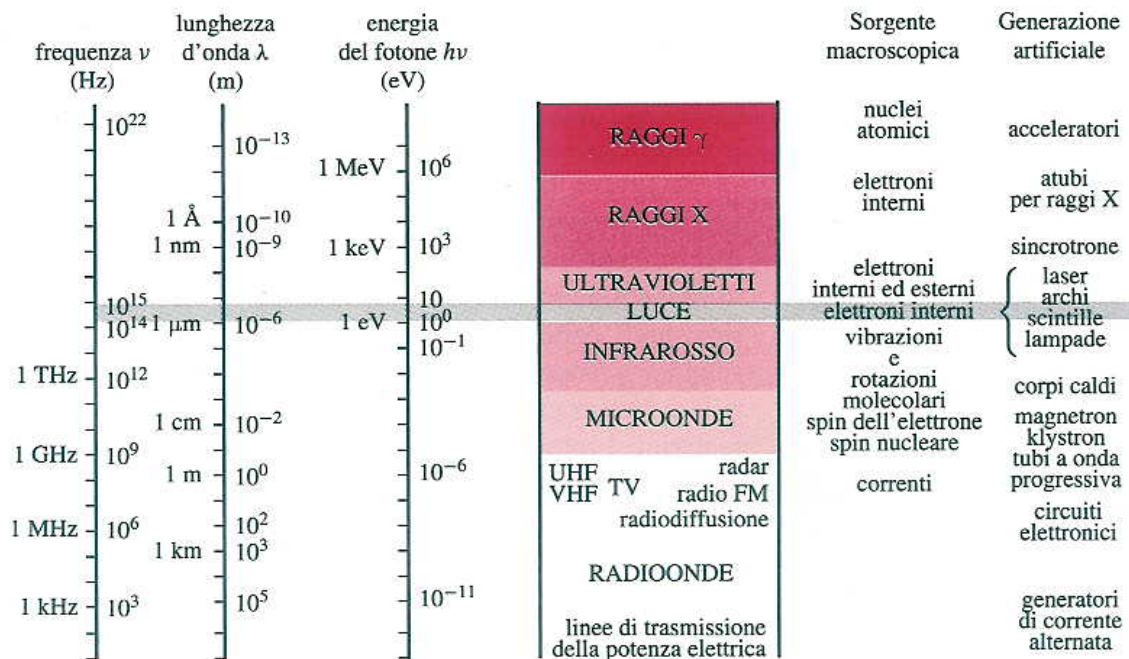
Transizioni elettroniche
livelli elettronici

Transizioni vibrazionali o
livelli vibrazionali

Transizioni rotazionali o
livelli rotazionali

Per fluidi e solidi anche i livelli vibrazionali e rotazionali si sovrappongono, si hanno così le bande.

Onde elettromagnetiche, sorgenti e fenomeni correlati.



Spettro di assorbimento dei gas costituenti l'aria.

➤ Thermal IR region

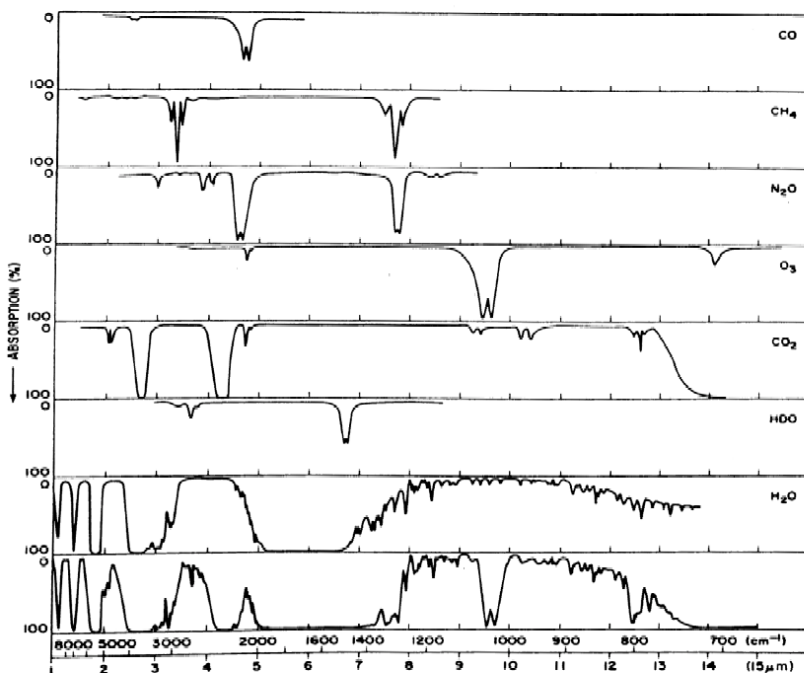
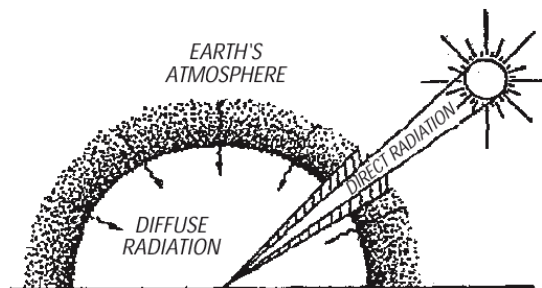
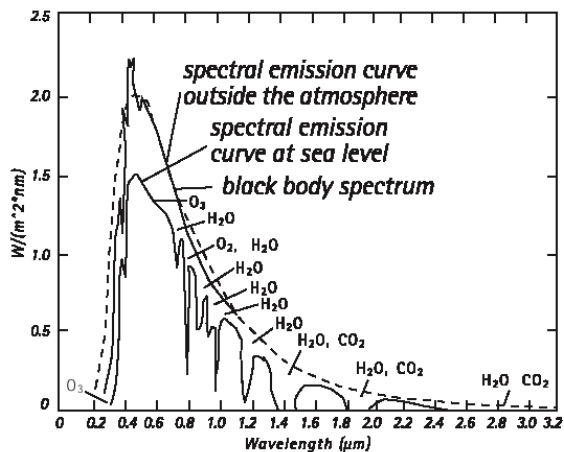
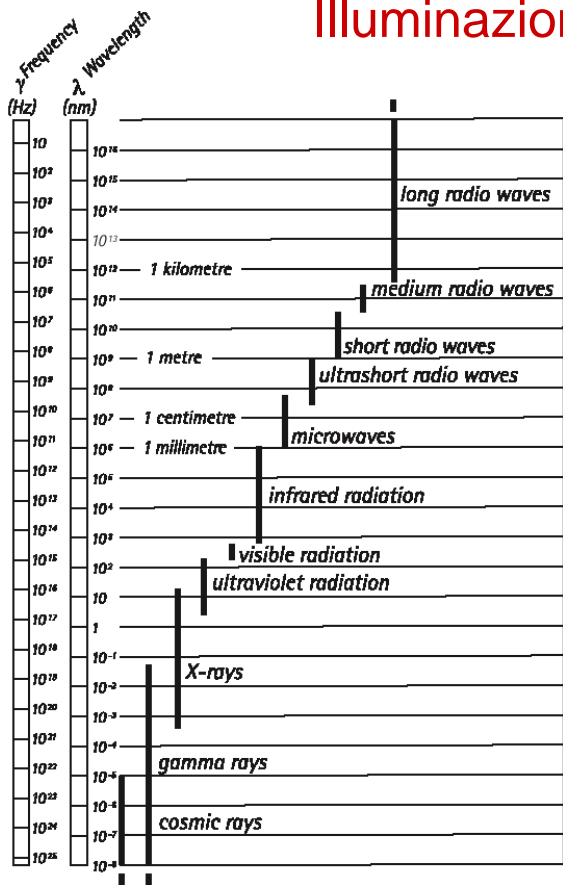


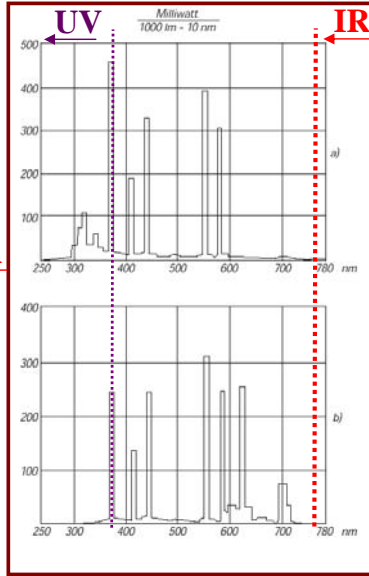
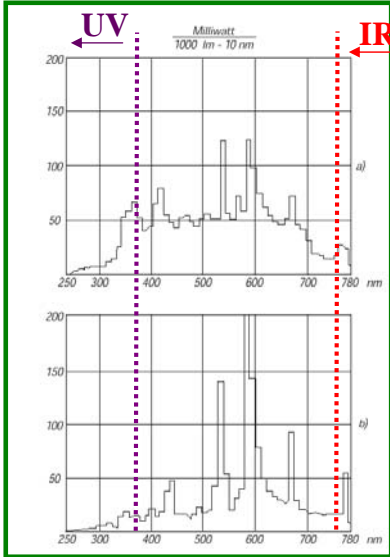
figure 7.3 Low-resolution IR absorption spectra of the major atmospheric gases.

Illuminazione ed onde em

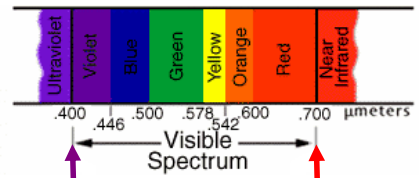
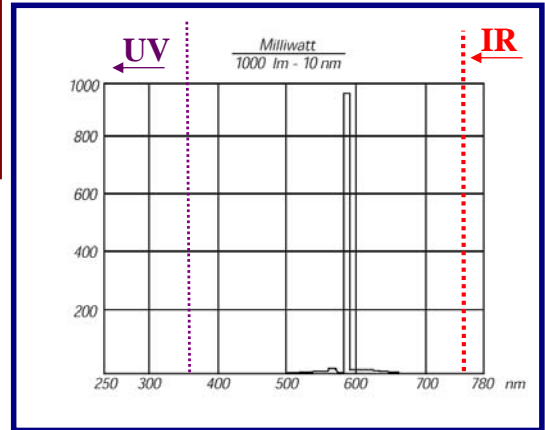


Tipi di lampade e loro spettri

Incandescenza Alogene



Tubi a scarica



380 nm
Scarica vapori
di sodio
a bassa pressione
760 nm