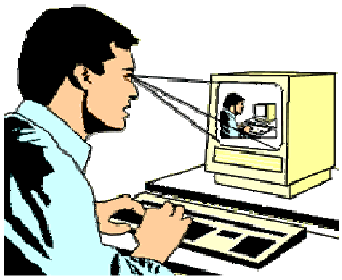
TELERILEVAMENTO (generale)

Bruno Crippa

Dipartimento Scienze della Terra "A. Desio" - Sezione di Geofisica
Università degli Studi di Milano
Via Cicognara 7 – 20129 Milano (Italy) – bruno.crippa@unimi.it



Osservi lo schermo del tuo computer e sei a tutti gli effetti coinvolto in un'operazione di telerilevamento.
La luce viene emessa dallo schermo attraversa lo spazio ed è catturata da un sensore (i tuoi occhi) che invia un segnale ad un processore (il tuo cervello).
Tutte le sensazioni che non sono indotte da contatto diretto sono frutto di un rilevamento a distanza (telerilevamento).

Telerilevamento (Remote Sensing)

- Insieme di tecniche che estendono la capacità percettiva dell'occhio umano → forniscono informazioni qualitative e quantitative su oggetti posti a distanza.

- Dal greco *tele* "da lontano", e *rilevamento* sinonimo di osservazione (qualitativa, quantitativa). Acquisizione di informazioni su oggetti "lontani"→ tutti i metodi di osservazione effettuata a distanza.

L'acquisizione e la misura di dati/informazioni relativi a proprietà di un fenomeno, oggetto, o materia attraverso uno strumento di registrazione non in stretto contatto fisico con l'oggetto di analisi; la tecnica comprende la maturazione di conoscenze sui diversi ambienti attraverso la misura di campi di forza, di radiazione elettromagnetica, o di energia acustica utilizzando macchine fotografiche, sistemi laser, ricevitori a radio frequenza, sistemi radar, sonar, dispositivi termici, sismografi, magnetometri, gravimetri ed altri strumenti.

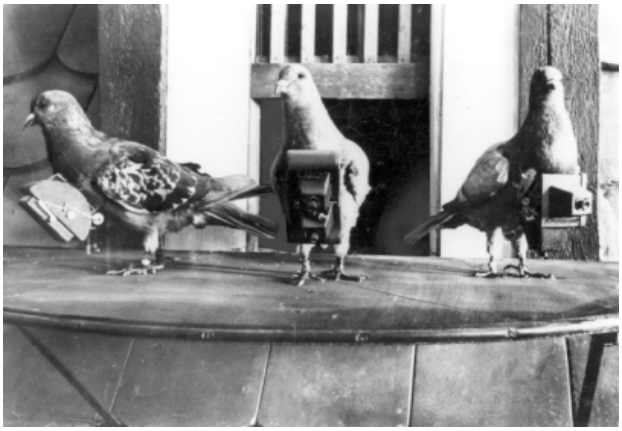
Telerilevamento (Remote Sensing)

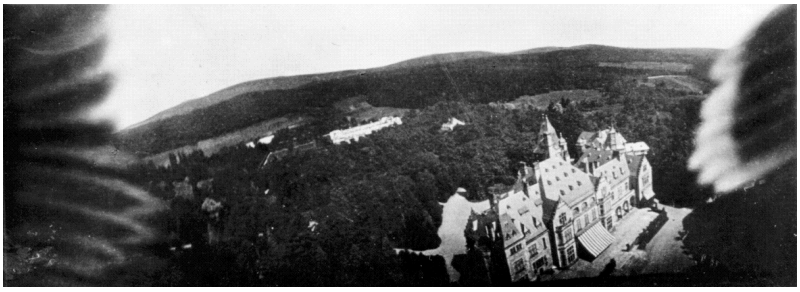
In senso ristretto:

"Il telerilevamento è l'insieme di tutti i metodi di osservazione della Terra nei quali la "radianza" elettromagnetica costituisce il veicolo di trasporto dell'informazione dall'oggetto di indagine al sensore" (Dermanis, Biagi)

1840 – Utilizzo delle mongolfiere come piattaforma aerea per le macchine fotografiche

1909 – Utilizzo dei piccioni come piattaforma aerea; macchine fotografiche di soli 70 gr di peso!





Fotografia aerea di un castello in Europa, ottenuta da un macchina fotografica montata su un piccione.

Atollo di Bikini

Foto aerea dell'esplosione nucleare nell'atollo di Bikini
25 luglio 1946

1943 – macchina fotografica automatica a bordo dei missili tedeschi V-2.

1957 – Sputnik - macchine da ripresa su navicelle in orbita.

1960 – Acquisizioni di immagini in bianco e nero con camere fotografiche montate su satelliti meteorologici. Sensori per sondaggi o misure relative all'atmosfera.

1970 – Skylab, Space Shuttle. LANDSAT primo satellite dedicato al monitoraggio della Terra.

1980 – Varietà di sensori specializzati, CZCS, HCMM, e AVHRR primo sistema radar Shuttle Imaging Radar SIR.

Gruppo 1 - **Osservazione della terra** : Landsat (1-6) (1973); Seasat (1978); HCMM (1978); SPOT (1-3) (Francia) (1986); RESURS (Russia) (1985); IRS (1A-1D) (India) (1986); ERS (1-2) (1991); JERS (1-2) (Giappone) (1992); Radarsat (Canada) (1995); ADEOS (Giappone) (1996) (Note: SIR-A (1981), SIR-B (1984), e SIR-C (1994) sono sistemi radar a bordo dello Space Shuttles).

Gruppo 2 - **Osservazione Meteo**: TIROS (1-9) (1960); Nimbus (1-7) (1964); ESSA (1-9) (1966); ATS(g) (1-3) (1966); DMSP serie I (1966); la serie Russa Kosmos (1968) e Meteor (1969); serie ITOS (1970); SMS(g) (1975); serie GOES(g) (1975); NOAA (1-5) (1976); serie DMSP 2 (1976); serie GMS (Giappone) 9 (1977); serie Meteosat(g) (Europa) (1978); serie TIROS-N (1978); Bhaskura (India) (1979); NOAA (6-14) (1982); Insat (1983); ERBS (1984); MOS (Giappone) (1987); UARS(1991); TRMM (U.S./Giappone) (1997) (Nota 1: g = geostazionario).

Gruppo 3 -Di maggiore utilizzo in **Oceanografia**: Seasat (1978); Nimbus 7 (1978) incluso il CZCS; Topex-Poseidon (1992); SeaWiFS (1997).

Campi d'applicazione del RS

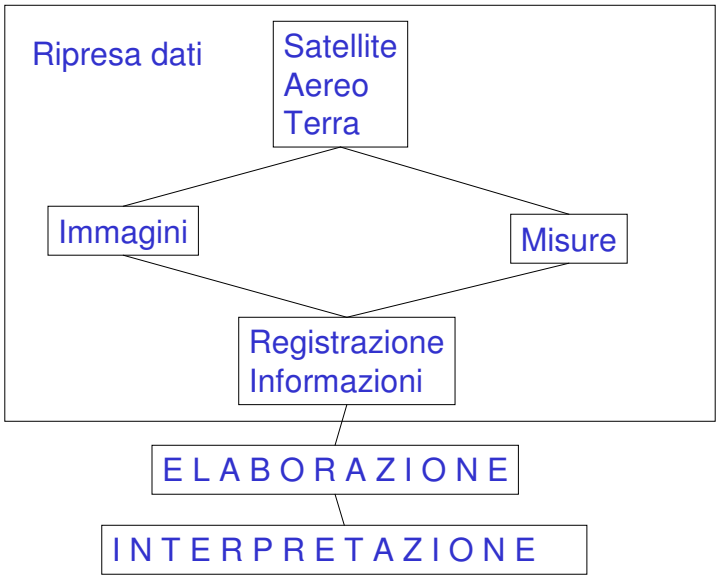
Agriculture, Forestry and Range Resources	Land Use and Mapping	Geology	Water Resources	Oceanography and Marine Resources	Environment
Discrimination of vegetative types: Crop types Timber types Range vegetation Measurement of crop acreage by species Measurement of timber acreage and volume by species Determination of range readiness and biomass Determination of vegetation vigor Determination of vegetation stress Determination of soil conditions Determination of soil associations Assessment of grass and forest fire damage	Classification land uses Cartographic mapping and map updating Categorization of land capability Separation of urban and and rural categories Regional planning Mapping of transportation networks Mapping of land-water boundaries Mapping of (fractures)	Recognition of rock types Mapping of major geologic units Revising geologic maps Delineation of unconsolidated rock and soils Mapping igneous intrusions Mapping recent volcanic surface deposits Mapping landforms Search for surface guides to mineralization Determination of regional structures Mapping linears	Determination of water boundaries and surface water area and volume Mapping of floods and flood plains Determination of areal extent of snow and snow boundaries Measurement of glacial features Measurement of sediment and turbidity patterns Determination of water depth Delineation of irrigated fields Inventory of lakes	Detection of living marine organisms Determination of turbidity patterns and circulation Mapping shoreline changes Mapping of shoals and shallow areas Mapping of ice for shipping Study of eddies and waves	Monitoring surface mining and reclamation Mapping and monitoring of water pollution Detection of air pollution and its effects Determination of effects of natural disasters Monitoring environmental effects of man's activities (lake eutrophication, defoliation, etc.)

"Osservazione della Terra"

Le osservazioni contengono due tipi d'informazioni:

1. contenuto qualitativo sulla tipologia di copertura
   - acque, boschi, minerali, terreno coltivato
   - …
2. contenuto geometrico e topologico
   - posizione, forme, relazioni …

Le tre fasi principali di un processo di Telerilevamento



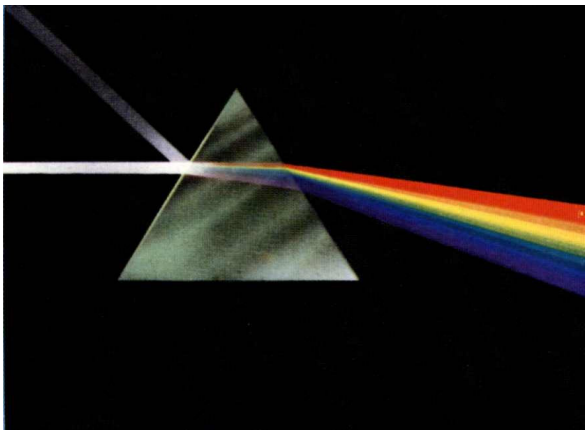
Considerazioni sull'osservazione della Terra:

Le informazioni sono "trasportate" dalla radiazione elettromagnetica attraverso il "vuoto".

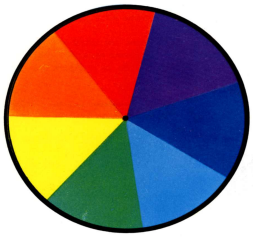
Lo strumento principale per l'osservazione (qualitativa), degli effetti lasciati su opportuni supporti dalla radiazione elettromagnetica, è l'occhio umano.

Alcuni dispositivi possono estendere la capacità di "vedere" radiazioni di lunghezze d'onda nella banda "non visibile" (es. immagini nell'infrarosso).

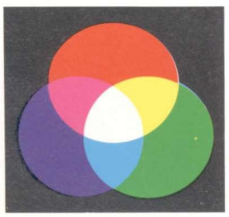
La prima scoperta di radiazioni non visibili è dovuta a William Herschel (1800).

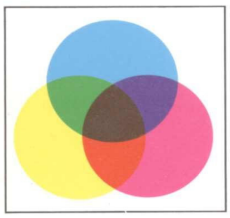


LA LUCE E I COLORI



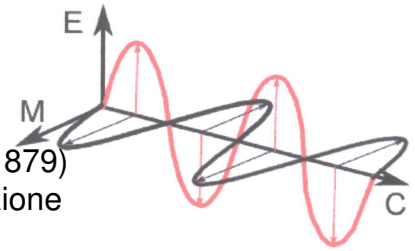
Red
Green
Blue





Cyan
Magenta
Yellow

Radiazione elettromagnetica



Nel 1860, James Clerk Maxwell (1831-1879) descrive, in forma matematica, la radiazione elettromagnetica come un'onda che attraversa lo spazio alla velocità della luce.

L'onda elettromagnetica è formata da due, campi, magnetico ed elettrico, oscillanti su piani tra loro ortogonali, ed ortogonali alla direzione di propagazione dell'onda.

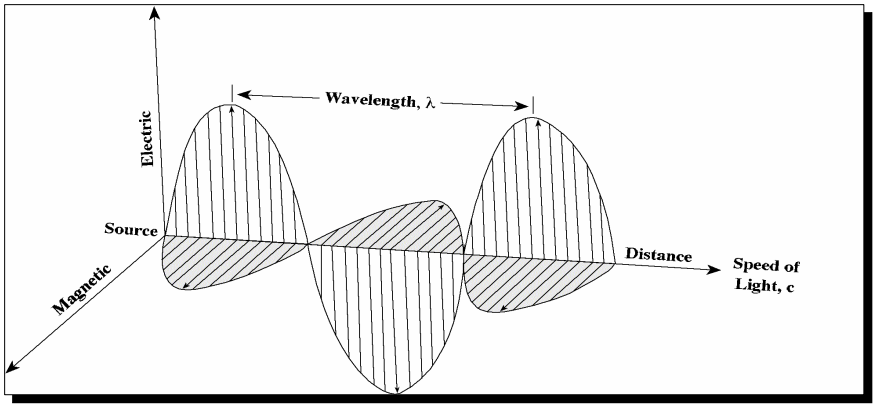
Caratteristiche fisiche della radiazione elettromagnetica

La radiazione elettromagnetica è generata quando le cariche elettriche
accellerano (dipolo oscillante).

La lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica dipende dall'ampiezza temporale in cui la carica è accellerata, mentre la frequenza dipende dal numero di accellerazioni per secondo.

Lunghezza d'onda = "distanza" tra due massimi (o minimi) del fenomeno oscillatorio.

Frequenza = numero di "giri" in un secondo. Numero di lunghezze d'onda che passano per un punto nell'unità di tempo.



Le relazioni tra lunghezza d'onda, λ, e frequenza, ν, della radiazione elettromagnetica sono:

$c = \lambda \nu \qquad \nu = c / \lambda \qquad \lambda = c / \nu$

dove c è la velocità della luce.

Si noti che ν, e inversamente proporzionale alla λ.

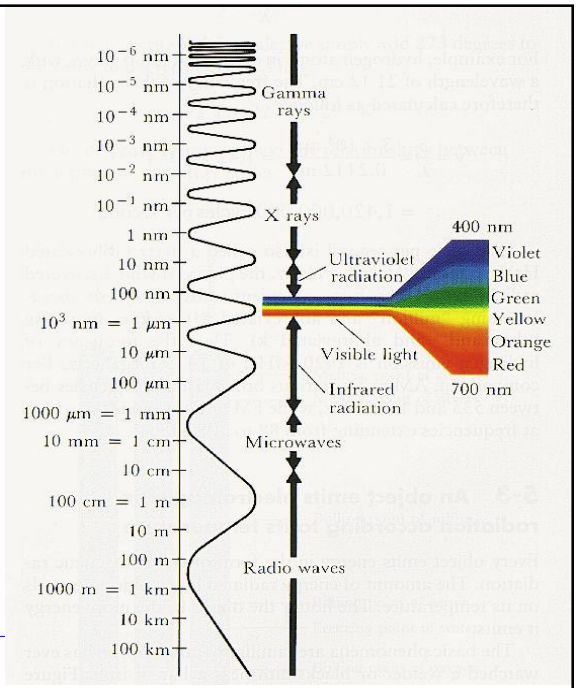
Spettro elettromagnetico

Regioni tipiche del telerilevamento:

- visibile [0.400; 0.700 µm]
- infrarosso vicino [0.700, 1.3 µm]
- infrarosso medio [1.3, 3.0 µm]
- infrarosso termico [3., 14. µm]

Nota: 1 µm = 10^{-6} metri

1 nm = 10^{-9} metri



Bande

1. Blu
2. Verde
3. Rosso
4. IR vicino
5. IR medio
6. IR termico
7. IR lontano
8. [verde – IR vicino]

Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)

Band	Spectral Resolution (μm)	Spatial Resolution (m) at Nadir
1	0.450–0.515	30 x 30
2	0.525–0.605	30 x 30
3	0.630–0.690	30 x 30
4	0.750–0.900	30 x 30
5	1.55–1.75	30 x 30
6	10.40–12.50	60 x 60
7	2.08–2.35	30 x 30
8 (pan)	0.52–0.90	15 x 15

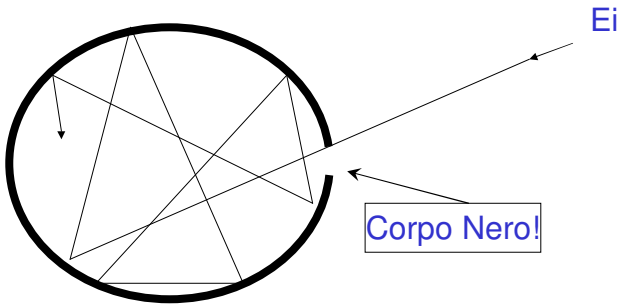
Radiazione

Qualsiasi superficie esterna di un corpo, a temperatura superiore a 0 K, emette radiazioni proprie che dipendono dalla natura del corpo e dalla sua temperatura. Inoltre la superficie riflette, assorbe o trasmette radiazioni provenienti dall'esterno.

La legge generale dell'emissione, enunciata nel 1900, è dovuta a Max Planck.

Corpo nero

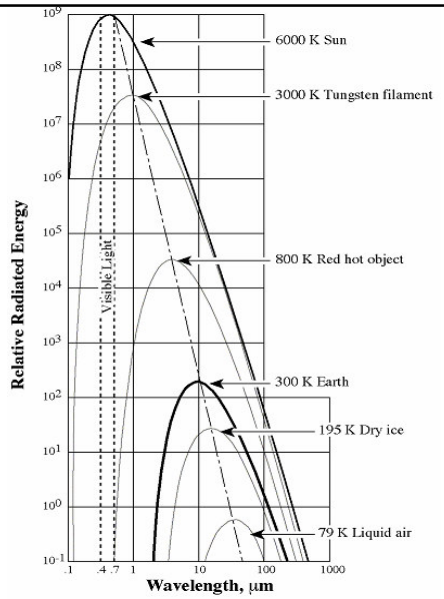
Un qualunque superficie che assorbe tutte le radiazioni incidenti, ed emette una radiazione funzione solo della temperatura. (Cavità di Kirchoff)



Legge di Planck per una superficie unitaria di corpo nero:

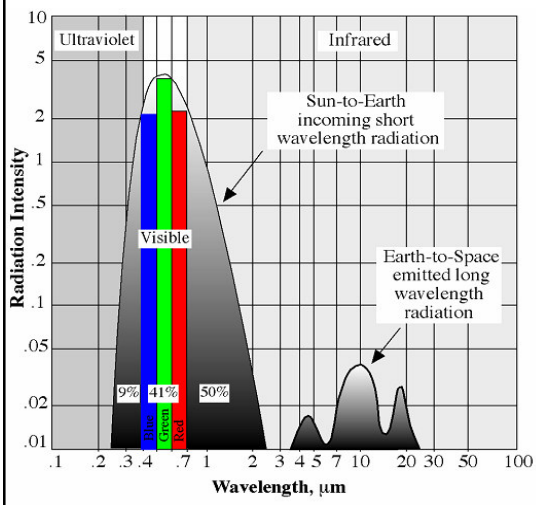
$$W_\lambda = \frac{2\pi\, h\, \lambda^{-5} c^2}{e^{ch/\lambda KT} - 1} \quad \left[W\ cm^{-2}\ \mu^{-1}\right]$$

π= 3.1415…
e = 2.718281828459045
λ= lunghezza d'onda [μ] c = 2.99*1010 [cm/s]
h = 6.62*10^{-34} costante di Planck [W s^2]
K= 1.38*10^{-23} costante di Stefen-Boltzaman [W s K^{-1}]
T = Temperatura assoluta [K]
W = Potenza radiante emessa sotto forma di radiazione e.m. (per unità di superficie e di lunghezza d'onda "Exitanza")

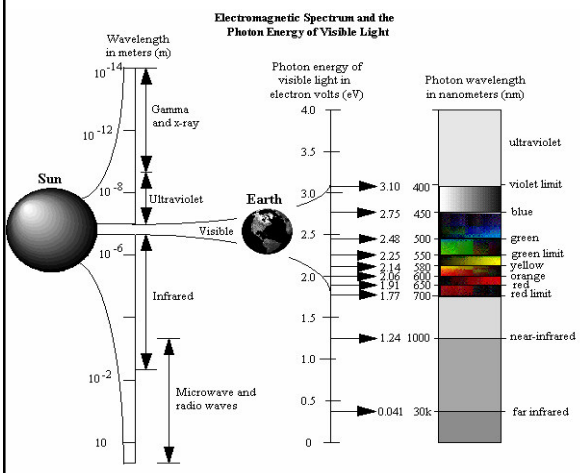


Andamento legge di Planck

Curva di radianza di un corpo nero a differenti temperature.
Il Sole e la Terra si comportano come corpi neri a temperature di circa 6000 °K e300 °K.
Si noti che ad un aumento di temperatura la lunghezza d'onda dominante si sposta verso valori sempre più piccoli (alte frequenze).



Il Sole è approssimativamente un corpo nero a 6,000 K con una lughezza d'onda dominante di 0.5 μm (luce verde). I 6,000 K del Sole producono il 41% dell'energia nella regione del visibile 0.4 - 0.7 μm (luce: blu, verde, e rosso). L'altro 59% di energia è a lunghezze d'onda inferiori alla luce blu (<0.4 μm) e superiori alla luce rossa(>0.7 μm). Gli occhi sono sensibili all'intervallo di lunghezze d'onda da 0.4 a 0.7 μm.



Il Sole produce uno spettro continuo di energia, dai raggi gamma alle radio onde.

La porzione di visibile può essere identificata tramite diverse unità di misura (nanometri, micrometri, i.e. nm, µm) oppure in electron volts (eV). Tutte le unità di misura sono intercambiabili.

Integrando l'equazione di Planck su tutte le lunghezze d'onda si ottiene l'equazione di Stefan—Boltzmann

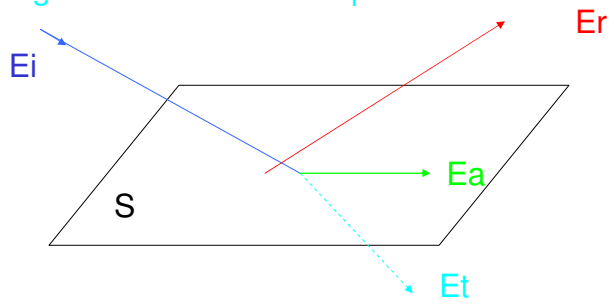
$$W = \int_0^\infty W_\lambda d\lambda = \sigma T^4 \quad \left[W\ cm^{-2}\right]$$

$\sigma = 5.67 * 10^{-12}$ [W cm^{-2} K^{-4}]

Ovvero l'emissione di energia e.m. (o potenza radiante), nel caso di superficie unitaria di corpo nero, dipende dalla temperatura assoluta

Tutto questo è valido per una superficie ideale di corpo nero!
le superfici si comportano in maniera differente.

Ei = energia incidente sulla superficie S
Er = energia riflessa dalla superficie S
Ea = energia assorbita dalla superficie S
Et = energia trasmessa dalla superficie S



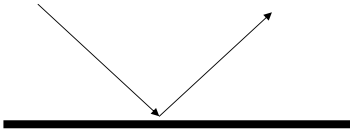
Coefficienti riflessione trasmissione assorbimento

Possiamo caratterizzare la superficie mediante tre parametri che dipendono dalla natura fisica della superficie, dal loro grado di rugosità o lucidatura, e specialmente dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente.

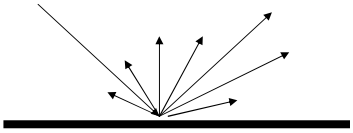
Coefficiente di riflessione $\rho = Er/Ei$
Coefficiente di trasmissione $\tau = Et/Ei$
Coefficiente di assorbimento $\alpha = Ea/Ei$

*Una superficie può essere molto riflettente nella banda del visibile e non nella microonde e viceversa; ad esempio neve e nuvole bianche nel visibile e praticamente nere in alcune bande dell'IR

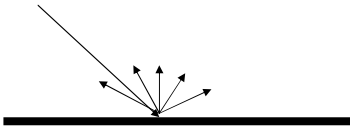
Meccanismi di riflessione
Si hanno principalmente tre modalità di riflessione:



Riflettività speculare
angolo incidenza = angolo riflessione



Riflettività mista
raggio incidente è in parte riflesso e diffuso



Riflettività lambertiana
raggio incidente è riflesso in tutte le direzioni con simmetria sferica

I tre parametri sono legati dall'equazione:

$\alpha+\rho+\tau=Ea/Ei + Er/Ei + Et/Ei = \mathbf{1}$
(principio di conservazione dell'energia!)

Si noti che:
•una superficie unitaria di corpo nero emette una potenza σT^4, su tutto lo spettro, e in tutte le direzioni se lambertiana.

•una analoga superficie di corpo non nero emette una potenza $\varepsilon\sigma T^4$,
su tutto lo spettro, e in tutte le direzioni se lambertiana.
ε= coefficiente di emissività (rapporto fra l'energia e.m. emessa da una superficie posta alla temperatura T e una pari superficie di corpo nero posta alla stessa temperatura T)
Una superficie è un corpo nero quando $\varepsilon=1$

Kirchoff dimostrò nel 1860

$\alpha=\varepsilon$ cioè un buon "radiatore" è un buon "assorbitore"

$\varepsilon + \rho + \tau = 1$

Corpi opachi ($\tau = 0$) → $\varepsilon + \rho = 1$
(superfici sempre più riflettenti hanno sempre meno capacità di emettere radiazioni)
Una superficie di corpo nero per $0 < \lambda < \infty$ sarà definita da
$\varepsilon=1$ $\rho= 0$

Una superficie perfettamente riflettente sarà definita da:
$\varepsilon=0$ $\rho= 1$

I quattro parametri definiti sono funzione della lunghezza d'onda, → bisogna specificare a quale parte ci si riferisce

La legge di Planck e di Stefan-Boltzmann per superfici reali sono espresse:

$$W_\lambda = \varepsilon_\lambda \frac{2\pi h \lambda^{-5} c^2}{e^{ch/\lambda KT} - 1} \quad \left[W\ cm^{-2}\ \mu^{-1}\right]$$

$$W = \int_0^\infty \varepsilon_\lambda W_\lambda d\lambda = \varepsilon \sigma T^4 \quad \left[W\ cm^{-2}\right]$$

Legge di Wien

La lunghezza d'onda corrispondente al massimo di emissione previsto dalla legge di Planck, decresce al crescere della temperatura della superficie che emette la radiazione:

$$\lambda_{max}=2890/T$$

T in gradi Kelvin λ in μm

Esempio: il Sole ha una temperatura di corpo nero di circa 6000 ^{0}K → il massimo di emissione è 2890/6000 ≈ 0.5 μm corrispondente a luce giallo-verde

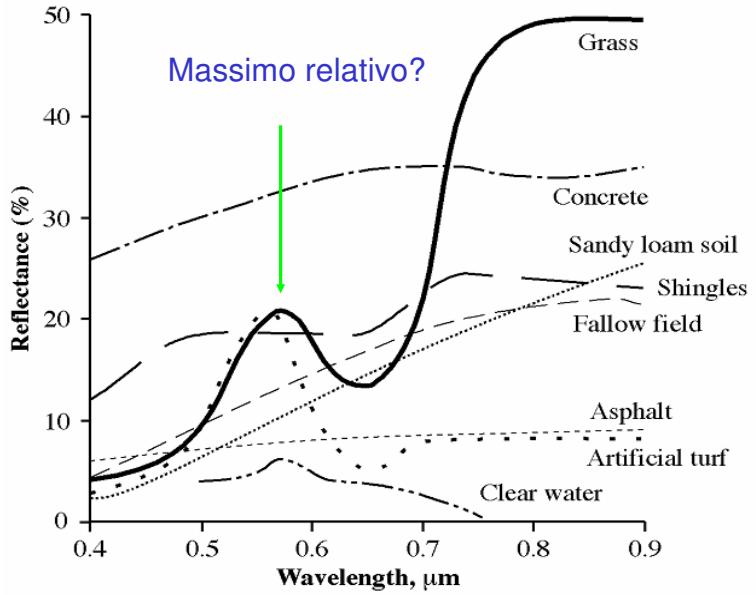
La Terra è assimilabile a un corpo nero la cui T è di circa 300 ^{0}K → il massimo è intorno a 10 μm

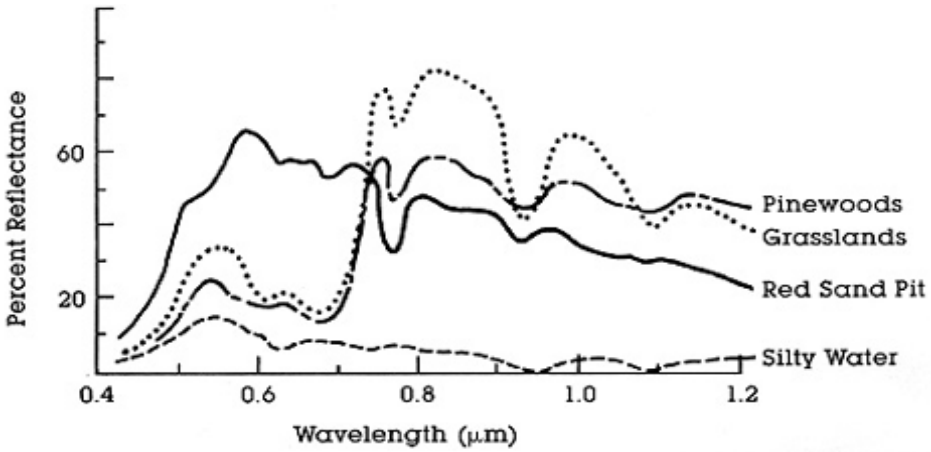
Questa legge fornisce un'indicazione dello strumento e delle bande più opportune da impiegare per studiare una superficie posta a una temperatura T. (Esplorazione nello spazio con sonde)

Firma Spettrale

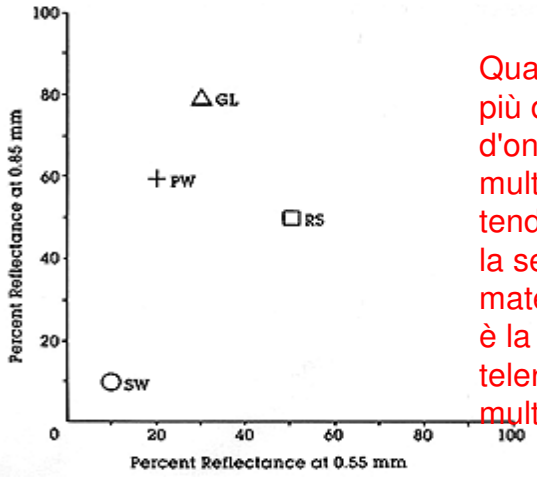
Il coefficiente di riflettività di una superficie varia da zero (corpo nero) a uno specchio; tale coefficiente varia in funzione della natura del corpo e della lunghezza d'onda. Così una superficie che riflette molto nella parte dello spettro "verde" e poco di "rosso" e "blu", se illuminata da luce bianca apparirà verde. Neve bianca nel visibile nera nell'IR termico!!

Per ogni superficie si può costruire un grafico che riporta la capacità di riflessione in funzione della lunghezza d'onda della radiazione, questo grafico prende il nome di **Firma Spettrale**


Massimo relativo?
Grass
Concrete
Sandy loam soil
Shingles
Fallow field
Asphalt
Artificial turf
Clear water
Reflectance (%)
Wavelength, μm
0
10
20
30
40
50
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9


Percent Reflectance
Wavelength (μm)
Pinewoods
Grasslands
Red Sand Pit
Silty Water
20
60
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2

Le posizioni dei punti che indicano le percentuali di riflettività in corrispondenza di due lunghezze d'onda per quattro tipi comuni di superfici (GL = terreni erbosi; PW = pinete; RS = sabbia rossa; SW = acqua fangosa)



Qualora si considerino più di due lunghezze d'onda, i grafici in spazi multidimensionali tendono ad aumentare la separabilità di materiali diversi; questa è la base del telerilevamento multispettrale.

La differente risposta delle superfici, in termini di riflettività, è alla base delle tecniche di telerilevamento.

In linea di principio è possibile esplorare, in varie lunghezze d'onda, la riflettività di una superficie e quindi conoscendo il suo comportamento classificarla in base alla firma spettrale.

Ovvero si confronta la firma spettrale costruita in "laboratorio" con quella rilevata dal "sensore"

NB. Più piccoli sono gli intervalli di lunghezza d'onda più strette sono le bande più precisa risulterà l'indagine. Tuttavia bande strette obbligano lo strumento a raccogliere poca energia specifica, e quindi aumenta nelle misure il "rumore" associato con l'informazione.

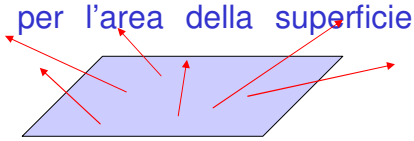
Radiomentri

Energia radiante = energia trasportata da un'onda e.m. Q [Joule]

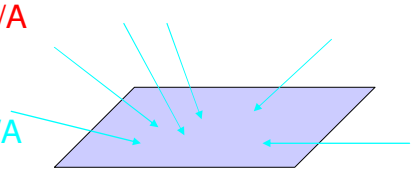
Flusso radiante = energia trasferita da una superficie ad un'altra nell'unità di tempo P [Watt] = $\Delta Q / \Delta t$.

Densità di Flusso Radiante (ad una superficie) = Flusso radiante alla superficie diviso per l'area della superficie H [W/m^2] = P/A

si hanno due casi:



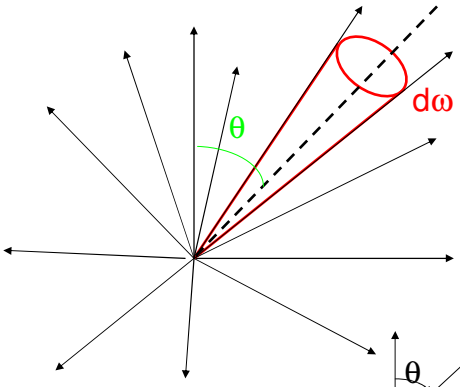
Exitanza W = P/A
(flusso emesso)

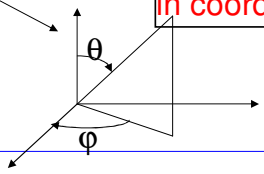


Irradianza H = P/A
(flusso incidente)

Intesità radiante = Flusso radiante uscente da una sorgente per unità di angolo solido, in un determinata direzione.

$I = dP/d\Omega$ [W/ste] ste=steradiante





Angolo solido

Def. rapporto tra l'area della calotta sferica dS, sottesa dall'angolo solido $d\omega$, e il raggio della sfera:

$d\omega = dS/r^2$

in coordinate sferiche → $d\omega = \sin\theta d\varphi$

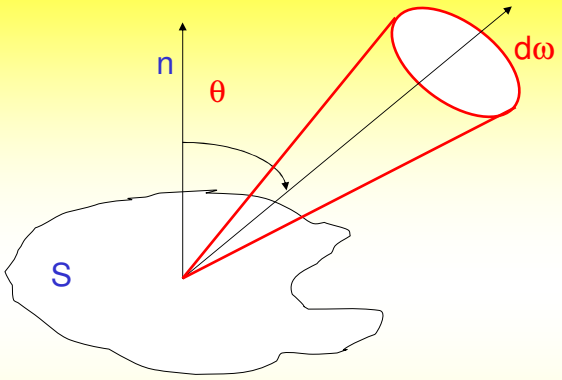
La grandezza radiometrica utilizzata in Telerilevamento è la:

RADIANZA = Flusso radiante per unità di superficie e di angolo solido. misura sul piano perpendicolare alla direzione scelta.
$N = d^2P/dAd\omega \cos(\theta)$ [Watt m^{-2} ste^{-1}]

Tra le quantità definite valgono le seguenti relazioni:

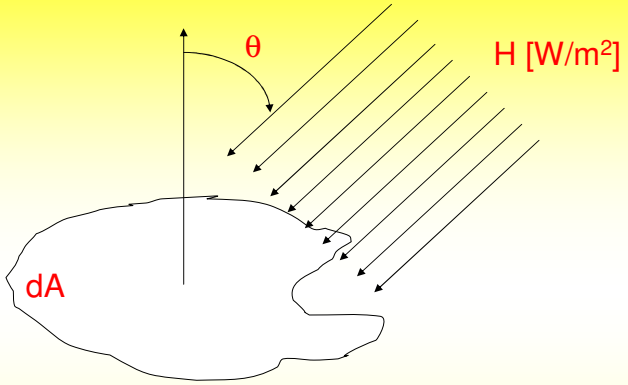
$P = \pi N = \pi I/A$
$I = P * A/\pi = N * A$
$N = P/\pi = I/A$
A=area della superficie

NB. Se tali quantità sono utilizzate per una particolare λ allora prendono l'aggettivo "spettrale". Es. N_λ = radianza spettrale …



La radianza per una superficie S è massima nella direzione normale alla superficie stessa [cos 0 = 1].

Radiazione proveniente dall'infinito su una superficie infinitesima

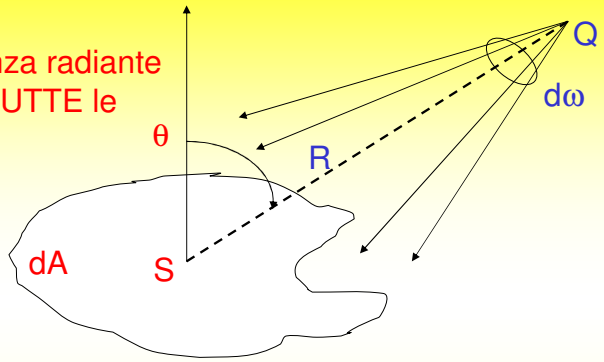


H irradianza [W/m²] proveniente dall'infinito con angolo di incidenza θ, (es il sole). La potenza totale P intercettata dalla superficie dA è:

$$dP = H*dA*\cos(\theta) \quad [W]$$

Radiazione da punto a una superficie infinitesima

Sia P [W] la potenza radiante emessa da Q in TUTTE le direzioni.



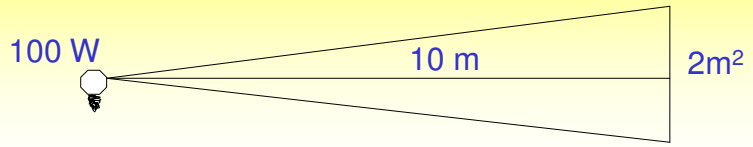
$d\omega = dA*\cos\theta/R^2$ ($R^2 >> dA$). La potenza radiante dP emessa da Q sotto l'angolo solido dω in direzione Q-S che giunge su dA è:

$$dP = I*d\omega = I*dA*\cos\theta/R^2 \quad (\text{con } I = P/4\pi)$$

Quindi l'irradianza H che giunge su dA è

$$H = dP/dA \rightarrow H = I*\cos\theta/R^2 \ [W/m^2]$$

Esempio lampada puntiforme da 100 Watt di potenza:
calcolare quanta potenza cade su una superficie, posta normalmente alla congiungente, di due metri quadrati ad una distanza R di 10 metri

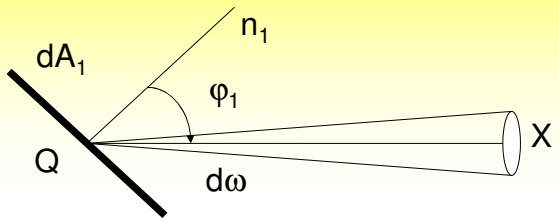


$P = 100 \rightarrow I = P/4\pi = 100/4\pi = 7{,}96$ [W/ste] Intesità radiante
$d\omega = dA*\cos\theta/R^2 = 2*\cos(0)/10^2 = 0{,}02$ [ste]
$H = dP/dA = I * d\omega/dA = 7{,}96*0{,}02/2 = 0{,}0796$ [W/m²] Irradianza
$dP = H*dA = 0{,}1592$ [W] Potenza radiante

Tutto ciò è valido se $R^2 >> dA$ ovvero si approssima dA ad una porzione di superficie sferica.

Radiazione superficie—superficie

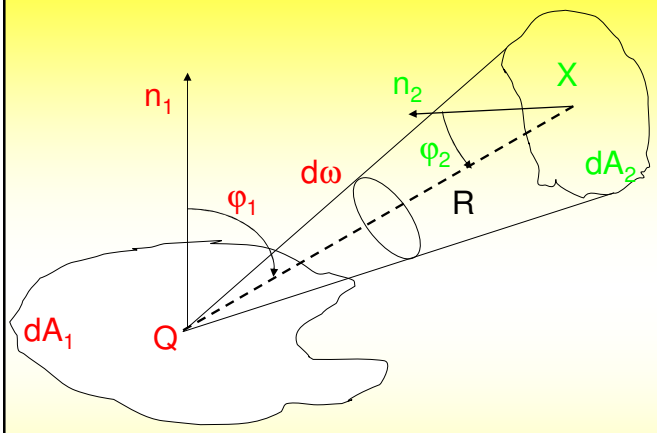
Calcoliamo la potenza emessa da dA in una direzione Q-X



Definiamo la radianza nella direzione Q-X emessa da dA_1:
$N1 = dP1/dA_1\cos\varphi_1 * d\omega$ [W m^{-2} ste]
$dP1 = N1*dA_1\cos\varphi_1 * d\omega$ [W]

il termine $dA_1\cos\varphi_1$ è la proiezione "normale" della superficie dA_1

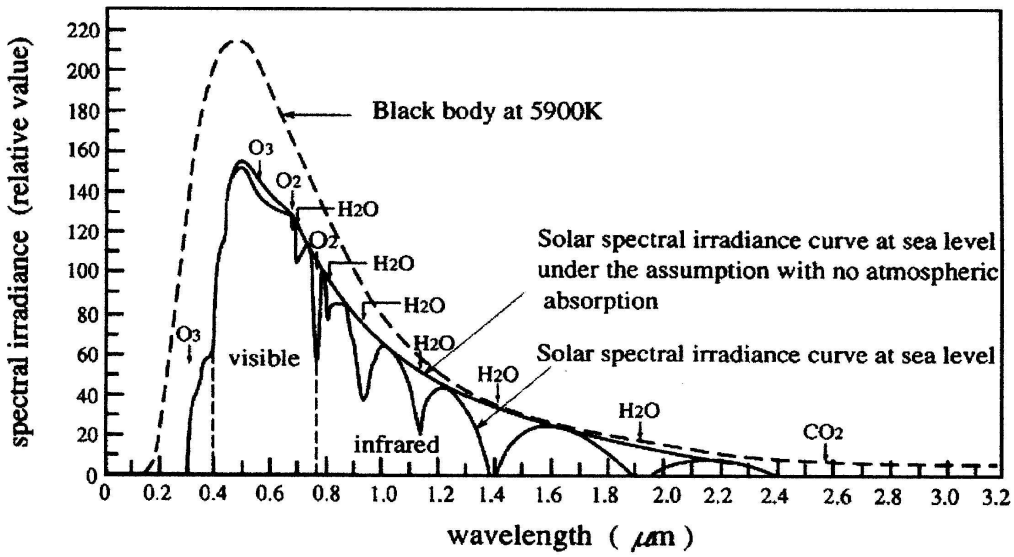
Valutiamo la potenza emessa da dA_1 che arriva sulla superficie dA_2



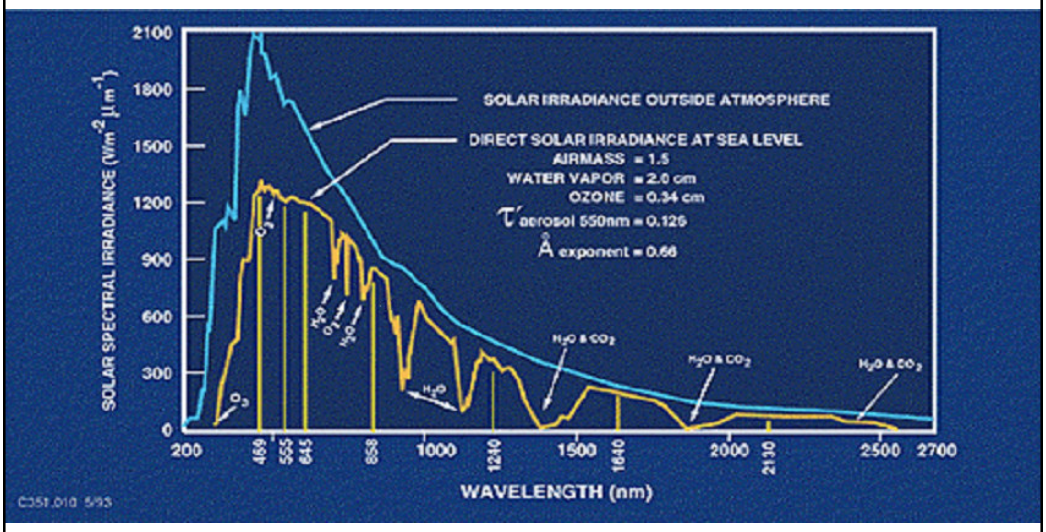
L'angolo sotto cui dA_1 vede dA_2 è:
$d\omega = dA_2 * \cos \varphi_2 / R^2$

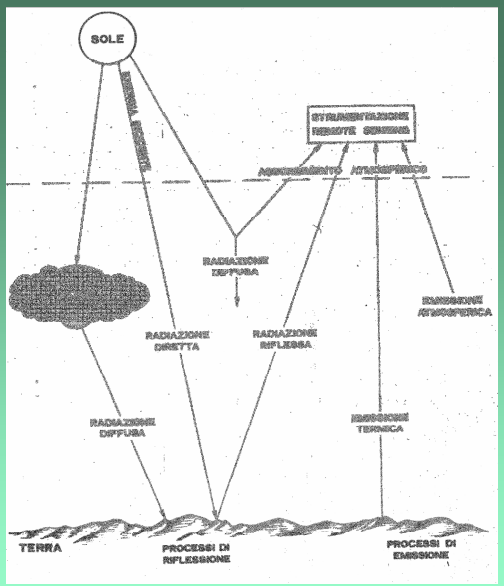
$$dP_{1\to 2} = N_1 * dA_1 \cos \varphi_1 * d\omega = N_1 * dA_1 \cos \varphi_1 * dA_2 * \cos \varphi_2 / R^2$$

NB: vale se $R^2 >> dA_1$ e dA_2



Sole

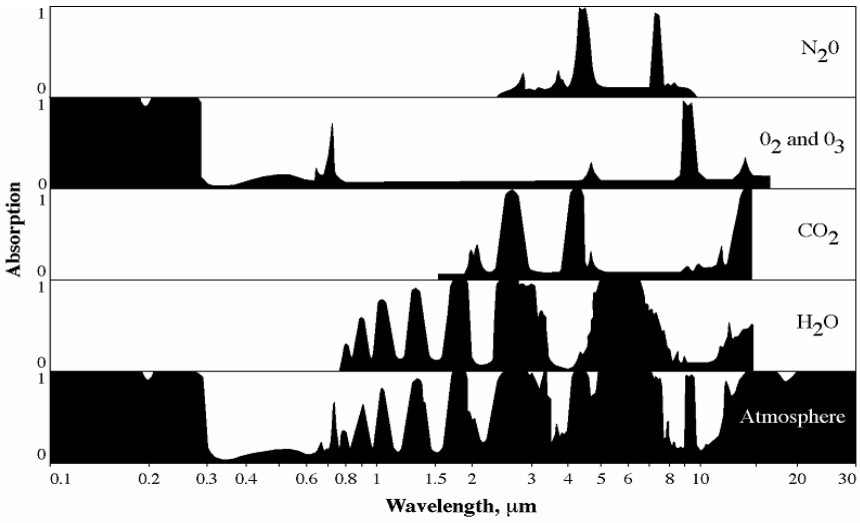




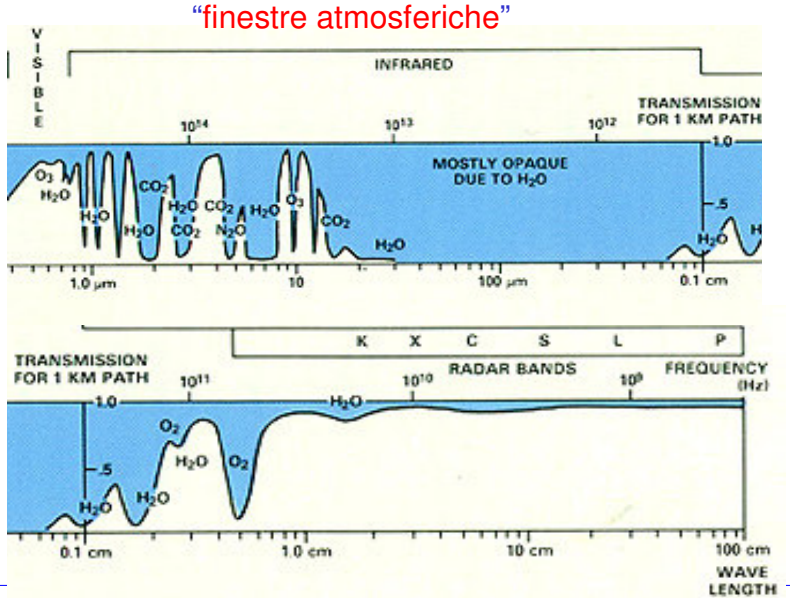
Interazione energia-materia Atmosfera
Area di studio
Sensore

Troposfera (0-12 km)
Stratosfera (12-20 km)
Ionosfera (20-80 km)
composizione
78% Azoto
20% Ossigeno
1% Argon
1% CO_2, H_2O, H_2,O_3,…

Assorbimento della radiazione e.m. del Sole da parte di alcuni gas componenti l'atmosfera terrestre (0.1—30 μm)



Vi sono nello spettro zone ad elevata trasparenza
"finestre atmosferiche"



Correzione effetti atmosferici

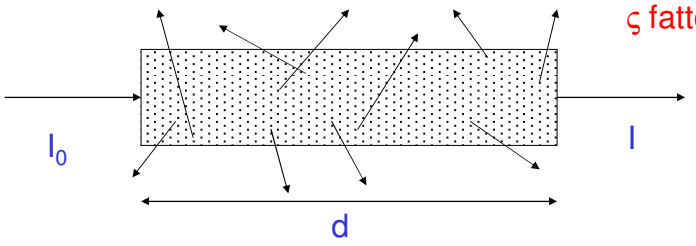
Problema di difficile soluzione

1) Ricostruzione delle variazioni subite dall'energia e.m. proveniente dalla superficie dovute al passaggio attraverso l'atmosfera. Le variazioni sono calcolate in base a dati meteorologici statistici o rilevati sul campo .
2) Interpolazioni che fanno uso di test sites, si eseguono misure contemporaneamente da terra e dal sensore in volo. I test sites costituiscono la "verità al suolo". Il confronto tra i due insiemi di misure permette la correzione.
3) Collegamento diretto tra immagine e situazione al suolo considerando il contributo dell'atmosfera come parte delle caratteristiche della superficie osservata. Si elimina il calcolo delle correzioni atmosferiche, ma l'interpretazione si può eseguire su un insieme limitato di dati.

Differenza tra assorbimento e diffusione:

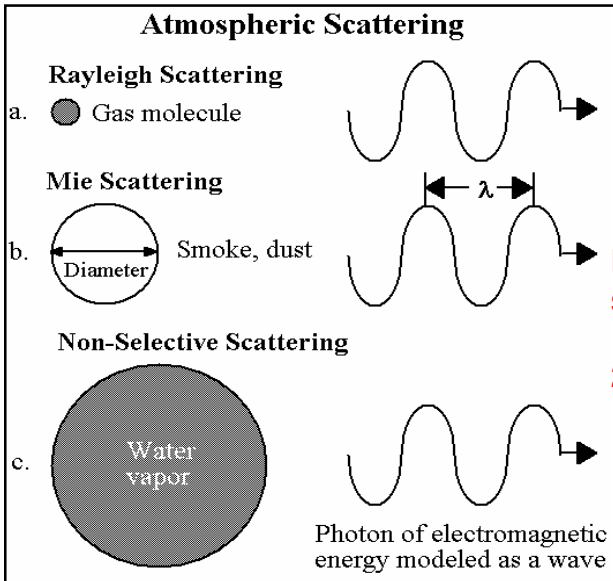
$I = I_0 e^{-\varsigma d}$

ς fattore di assorbimento

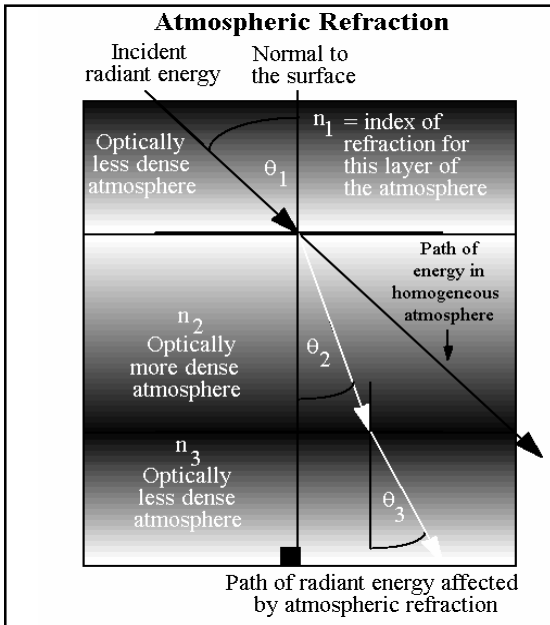


Il tubo di vetro è riempito di fumo, la diminuzione di intensità è dovuta alla diffusione dovuta alle particelle di fumo.

L'assorbimento rappresenta una effettiva scomparsa della luce la cui energia è convertita in calore.



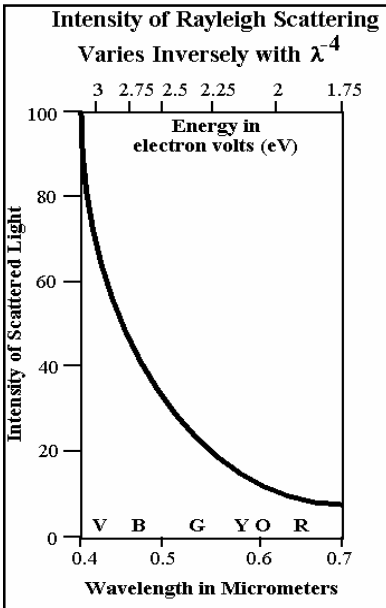
Le diverse modalità di scattering sono dipendenti:
1) lunghezza d'onda
2)dimensione dell'oggetto



La rifrazione è descritta dalla legge di Snell:

$\sin(\theta_1)/\sin(\theta_2)=n_2/n_1$

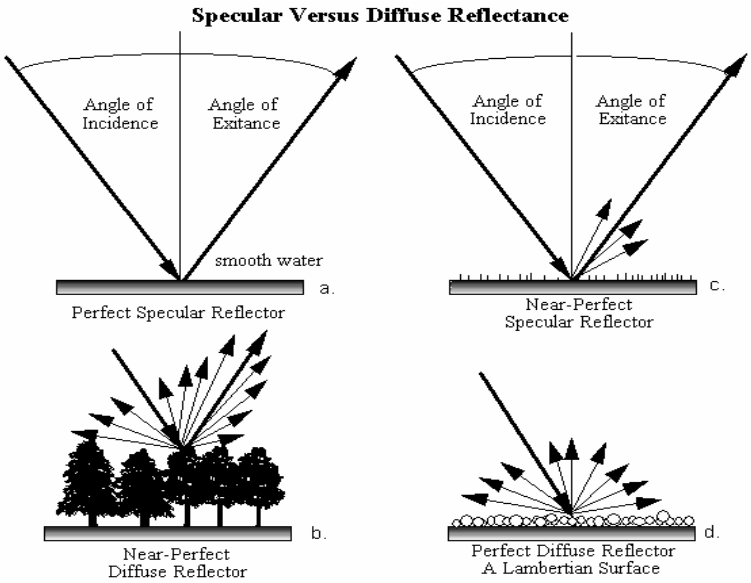
n indice di rifrazione



Rayleigh Scattering (1871)

L'intesità della luce diffusa è proporzionale a $1/\lambda^4$
Si ha dunque che per particelle di date dimensioni le onde più "lunghe" sono diffuse in modo meno efficiente rispetto a quelle "corte".

es: luce rossa 0,76 µm luce viola 0,4 µm

$0{,}76^4$=0.33362176 $0{,}4^4$ = 0.0256
0.33/0.0256 = 13 → luce viola è diffusa maggiormente!

Particelle di fumo della sigaretta diffondono luce bianca, la luce diffusa assume colore bluastro
Colore azzurro del cielo!
Colore rosso alba e tramonto!
Vapor acqueo molecole di 1 µm→ nuvole bianche