Università
del Salento

Dipartimento di Fisica

Progetto Lauree Scientifiche

Attività formativa

Modulo 1

L'analisi della luce degli astri: fotometria e spettrometria

Vincenzo Orofino

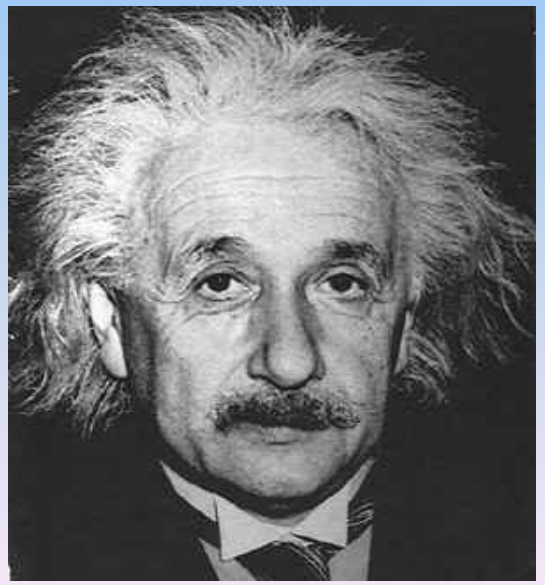
Gruppo di Astrofisica

LA LUCE – Natura della luce

La luce è una forma di energia (energia luminosa o energia radiante) che si propaga per onde elettromagnetiche.

Prime teorie: natura corpuscolare (Newton)

Fenomeni spiegati: riflessione e rifrazione

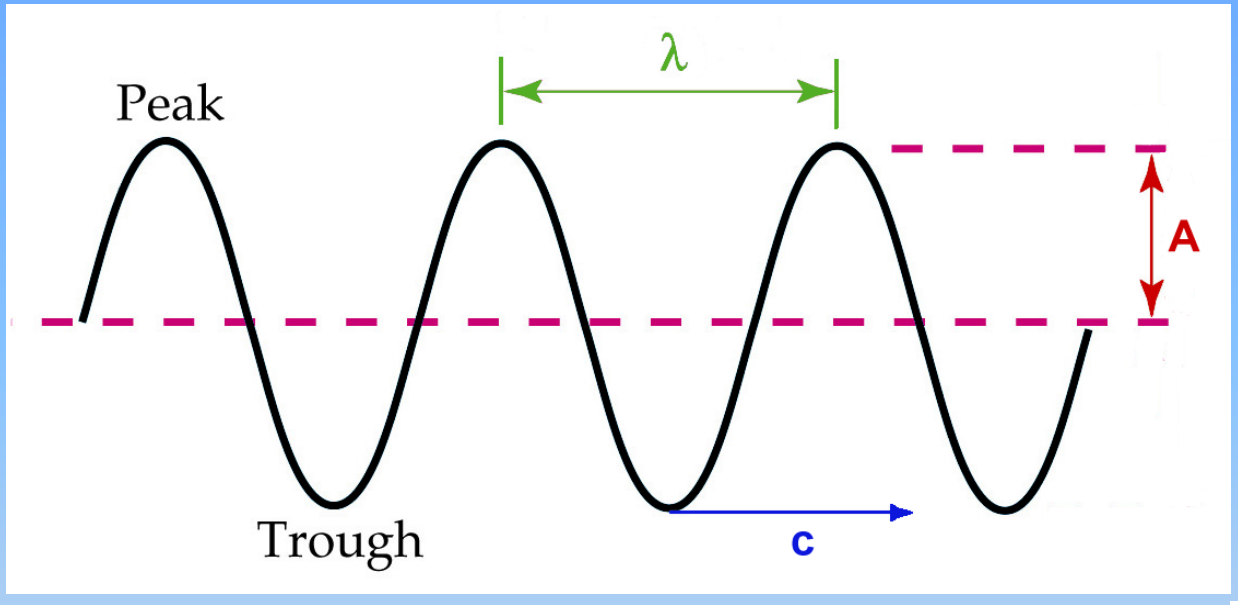


Teorie successive: natura ondulatoria (Huygens)

Fenomeni spiegati: interferenza e diffrazione (Young, Fresnel)

Conoscenze attuali: duplice natura della luce (*fotone e dualismo onda-corpuscolo*) (Einstein)

LA LUCE – Caratteristiche ondulatorie

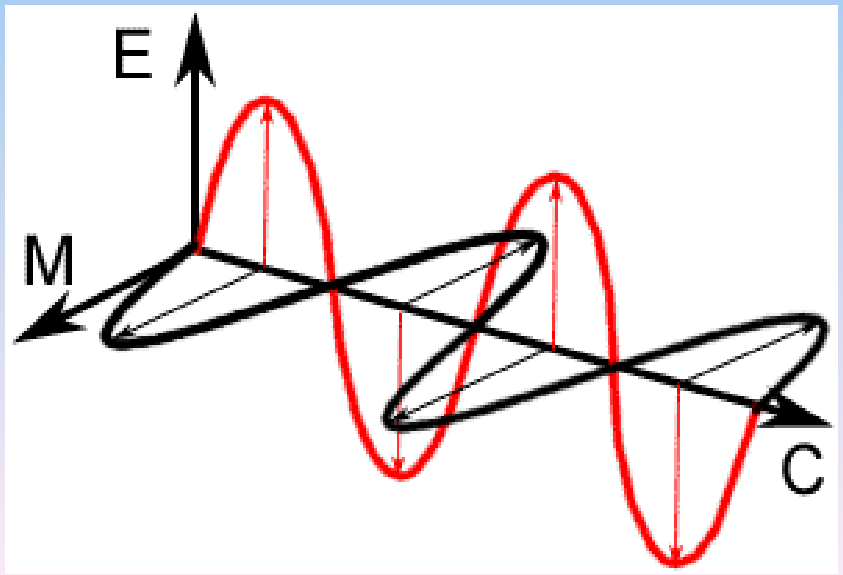


A : ampiezza

λ : lunghezza d'onda

c : velocità (c ≅ 300˙000 km/s)

ν : frequenza (ν = c/λ)



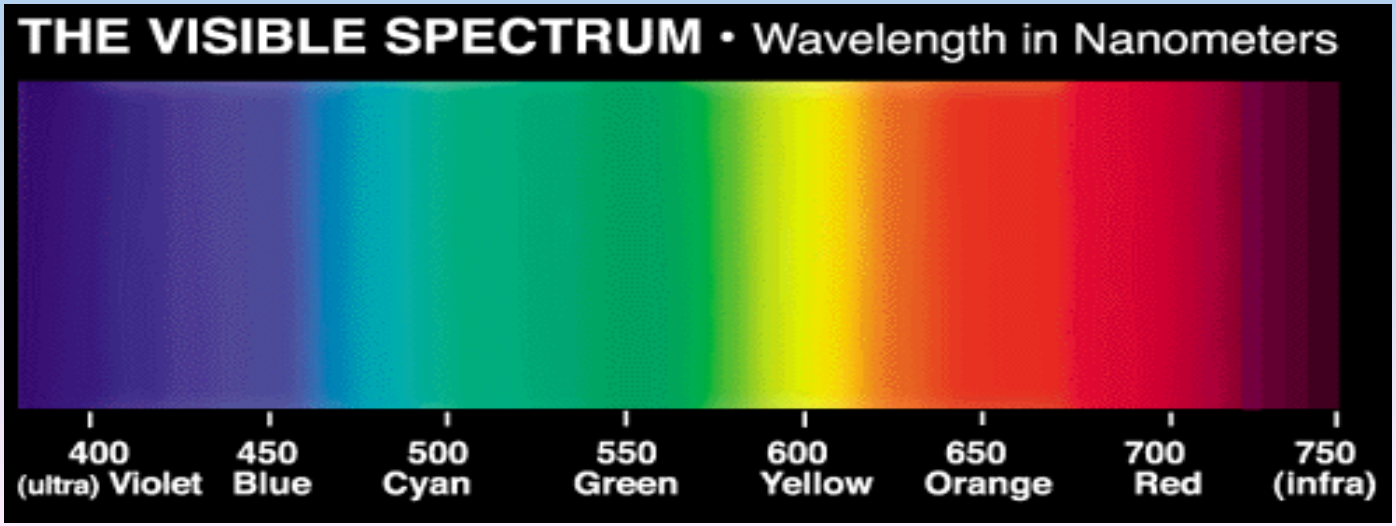
LA LUCE – Lunghezza d'onda e colori (1)

Colori diversi ⟹ Sensazioni visive diverse

Le diversità di colore sono determinate da diversità di frequenza (o di lunghezza d'onda) della radiazione luminosa.

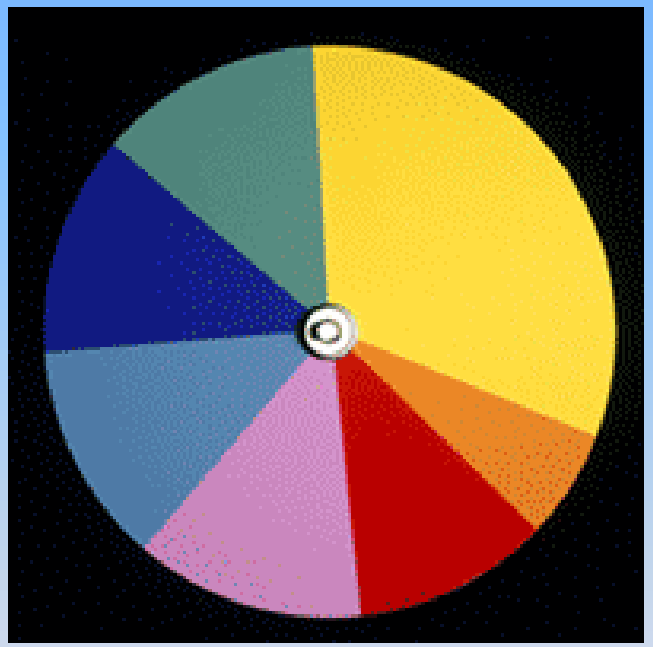
Un colore è dovuto a radiazioni comprese entro un certo intervallo di frequenza. Si distinguono *sette colori fondamentali*.

1 Å = 10^{-10} m
1 nm = 10^{-9} m
1 μm = 10^{-6} m



LA LUCE – Lunghezza d'onda e colori (2)

La luce bianca (*policromatica*) è composta da tutte le radiazioni visibili.



Disco di Newton

La luce *monocromatica* (in senso lato) è composta solo da radiazioni di frequenza compresa in uno stretto intervallo.

LA LUCE – Fotoni e colori (1)

Le diversità di colore sono determinate dal tipo di fotoni che costituiscono la luce.

A ciascuno dei fotoni di energia E è associata una frequenza ν data da:

$$E = h \nu$$

dove h è una costante fondamentale (*costante di Planck*).

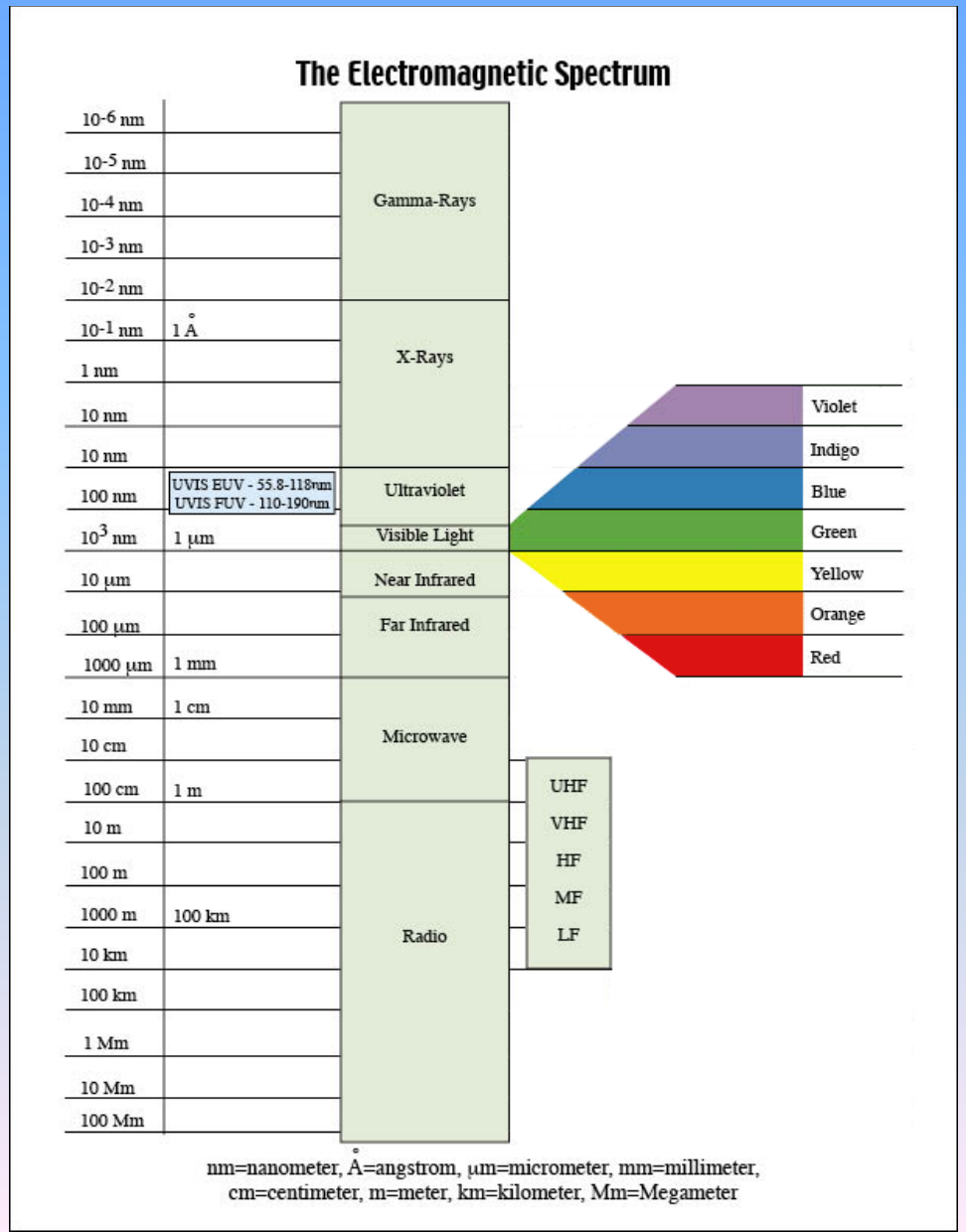
Un colore è dovuto a fotoni di frequenza compresa entro un certo intervallo.

LA LUCE – Fotoni e colori (2)

Colore	λ (Å)	ν ($\times 10^{14}$ Hz)
Violetto	4000 – 4200	7.14 – 7.50
Indaco	4200 – 4400	6.82 – 7.14
Azzurro	4400 – 5000	6.00 – 6.82
Verde	5000 – 5600	5.35 – 6.00
Giallo	5600 – 5900	5.17 – 5.35
Arancio	5900 – 6100	4.91 – 5.17
Rosso	6100 – 8000	3.75 – 4.91

$$E_{Rosso} < E_{Violetto}$$

LA RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA (1)

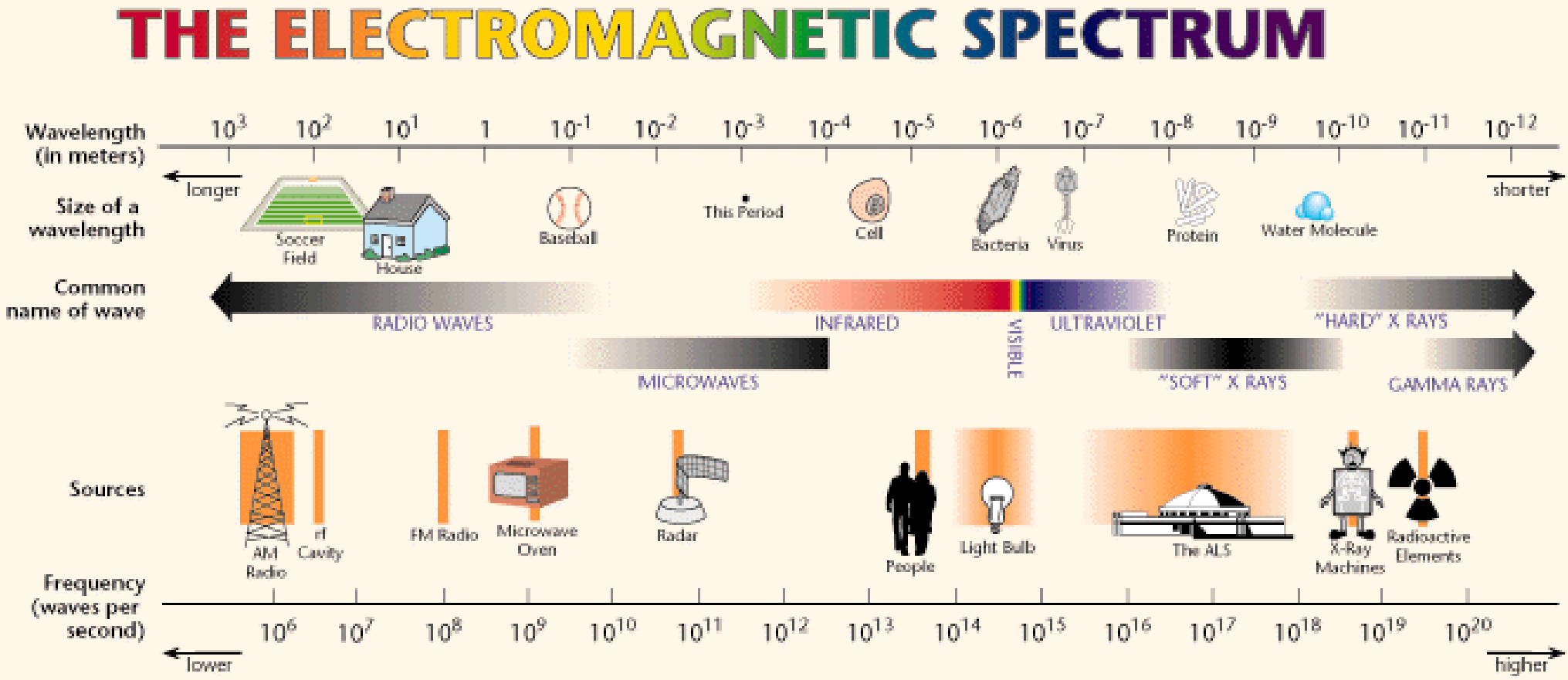


La luce è una piccola parte della radiazione elettromagnetica (e.m.).

Solo la luce è visibile all'occhio umano.

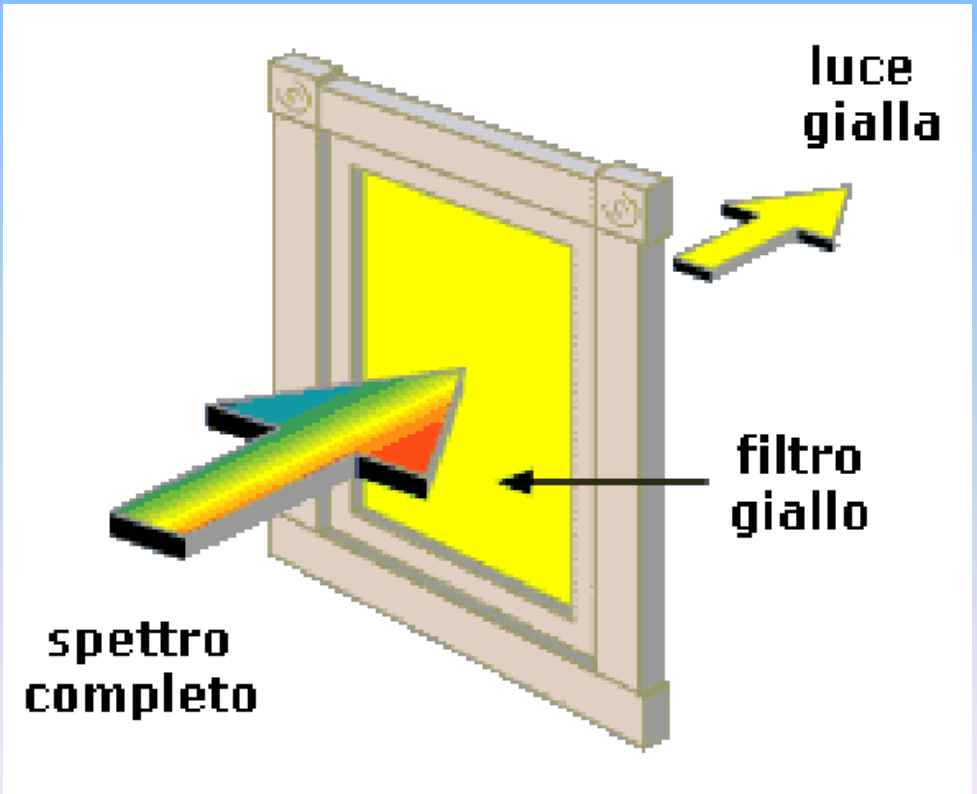
$E_{Radio} << E_{Gamma}$

LA RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA (2)



LA LUCE – Filtri

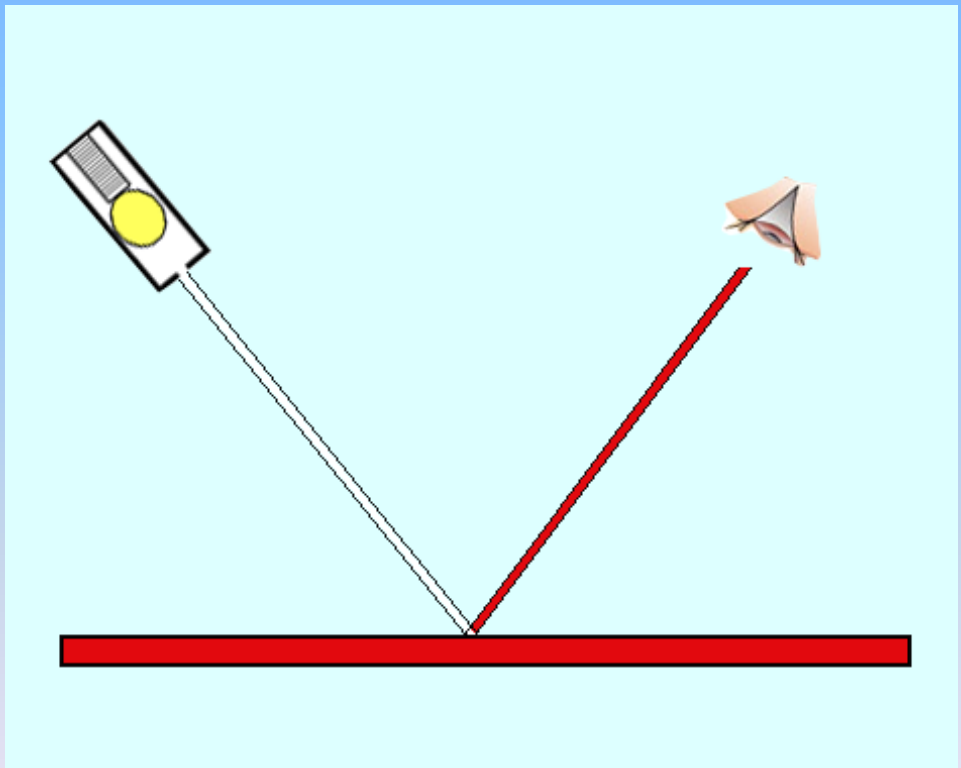
Un *filtro* è un corpo in grado di assorbire tutte le componenti della radiazione luminosa, tranne quelle comprese in un certo intervallo di frequenze (ossia di un dato colore).



Un filtro giallo, illuminato con luce bianca, blocca tutti i colori eccetto il giallo.

LA LUCE – Colore dei corpi (1)

Un corpo illuminato con luce bianca appare di un dato colore se riflette solo quella data componente ed assorbe tutte le altre.

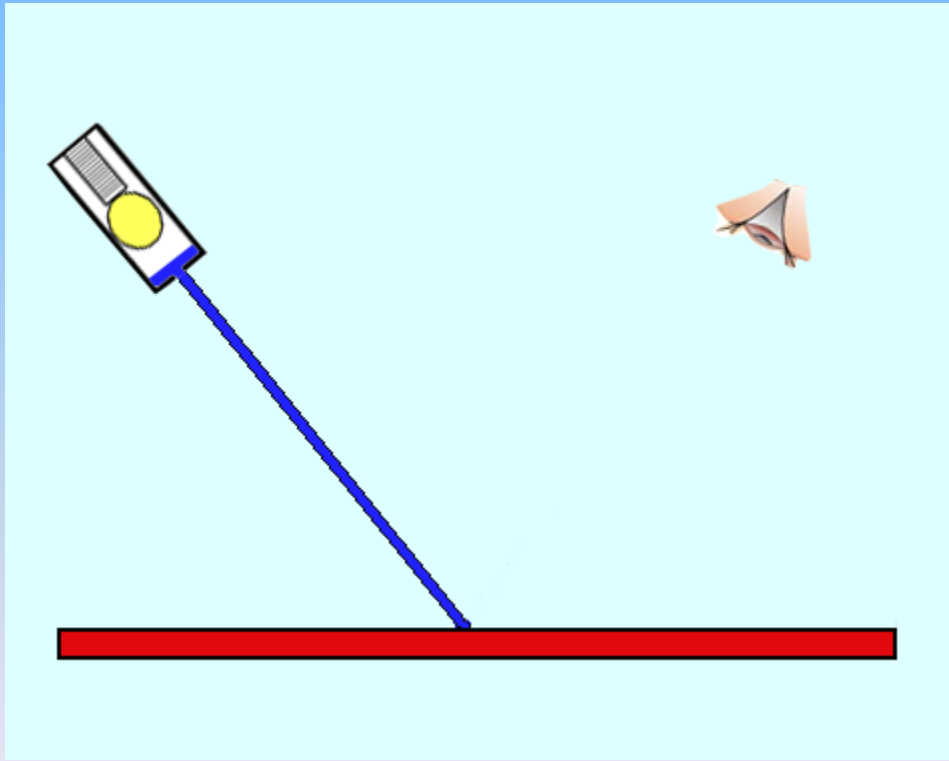


Un corpo appare bianco se è in grado di riflettere tutta la gamma di radiazioni luminose.

Un corpo appare nero se è in grado di assorbire tutta la gamma di radiazioni luminose.

LA LUCE – Colore dei corpi (2)

Un corpo illuminato con luce monocromatica appare nero, tranne quando è di colore uguale a quello della luce incidente.



CONCLUSIONE

Il colore dei corpi dipende da:

a) *capacità di assorbimento*;

b) *composizione della luce*.

***Corpo nero**: corpo ideale in grado di assorbire tutte le radiazioni e.m. incidenti, senza rifletterne nessuna.*

LA LUCE – Sorgenti (1)

Si definisce *sorgente* ogni corpo (solido, liquido o aeriforme) in grado di inviare radiazione luminosa verso l'ambiente circostante.

Una sorgente è *policromatica* se emette radiazioni luminose di svariate frequenze.
Esempi: il Sole, le lampade ad incandescenza, la fiamma di una candela.

Una sorgente è *monocromatica* (in senso lato) se emette radiazioni luminose in un ristretto intervallo di frequenze.
Esempi: le lampade schermate con filtri, le lampade a vapori di particolari sostanze (sodio), le sorgenti laser.

LA LUCE – Sorgenti (2)

Sono detti *sorgenti primarie* tutti quei corpi (spesso ad elevata temperatura) nei quali avviene una trasformazione di una qualunque forma di energia in energia radiante.

e. elettrica

⇩

e. radiante

e. chimica

⇩

e. radiante

Sono *sorgenti secondarie* tutti i corpi che non emettono luce propria, ma che riflettono quella ricevuta dalle sorgenti primarie.
Esempi: la Luna, i pianeti, gli oggetti illuminati da lampade.

LA LUCE – Assorbimento

I corpi investiti dalla luce possono:

a) consentirne, almeno in parte, il passaggio (*corpi trasparenti*);

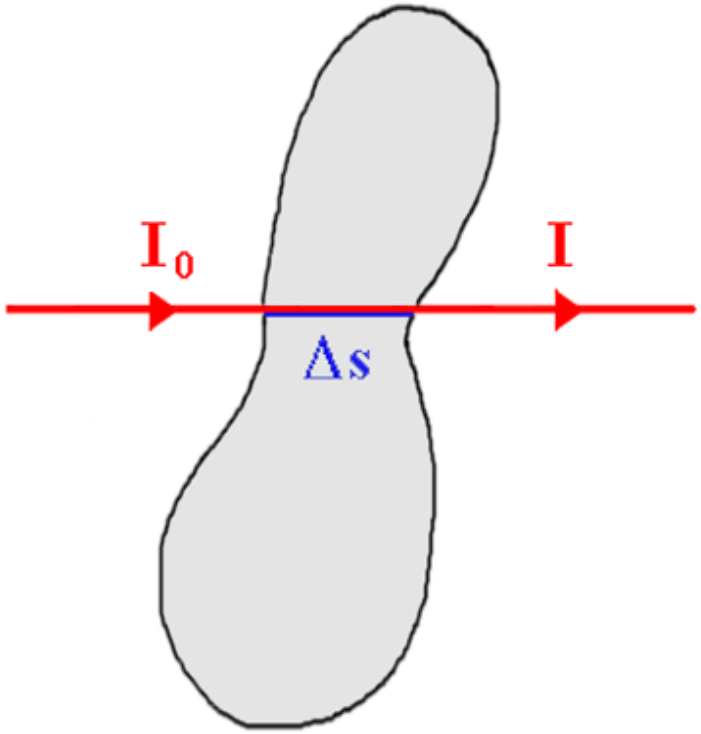
b) non consentirlo affatto, assorbendo completamente la luce incidente (*corpi opachi*).

L’energia radiante assorbita viene trasformata in altre forme, in genere energia termica.

LA LUCE – Trasmittanza

Si definisce *trasmittanza* (o *trasparenza*) di un dato corpo il rapporto:

$$T = I / I_0$$



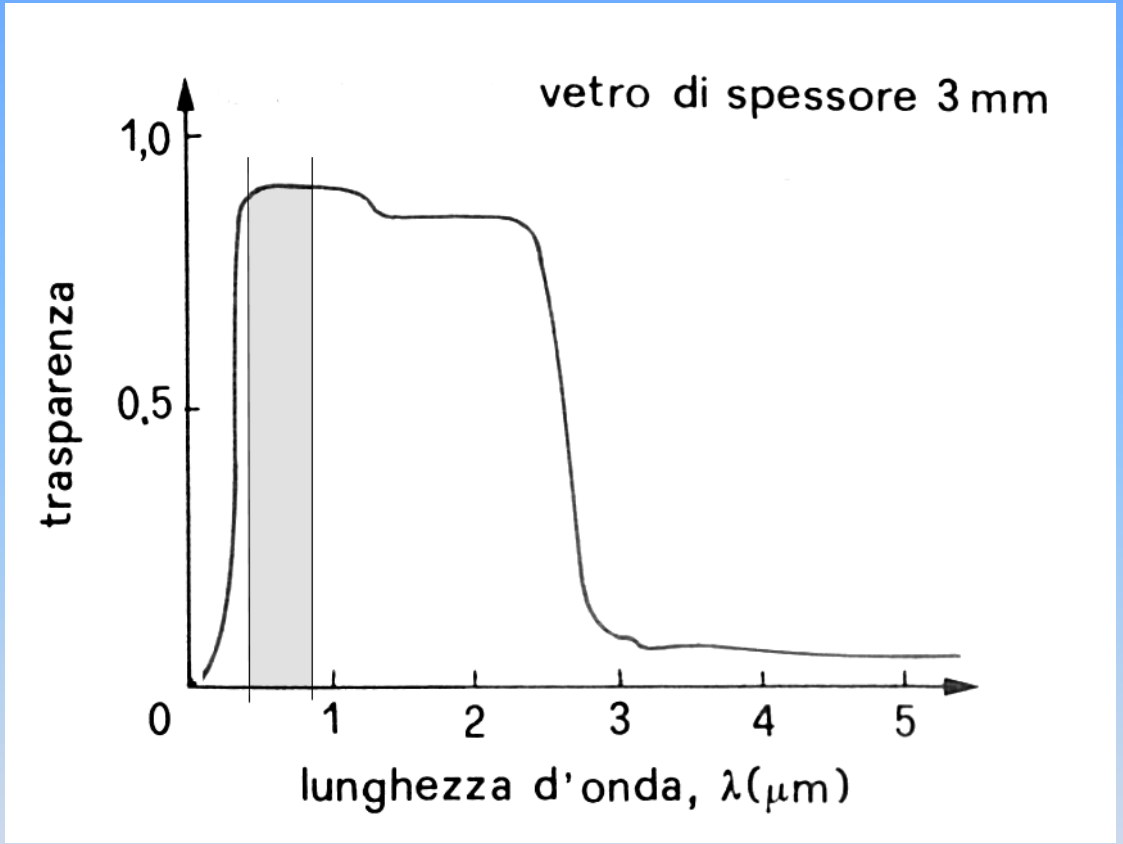
$T = 0 \Longrightarrow$ Corpo opaco

$T = 1 \Longrightarrow$ Corpo perfettamente trasparente

La trasmittanza dipende: a) dalla sostanza costituente il corpo; b) dallo spessore Δs del corpo stesso; c) dalla frequenza della radiazione incidente (*assorbimento selettivo*).

Tutte le considerazioni fin qui fatte per la luce valgono per qualunque altro tipo di radiazione e.m.

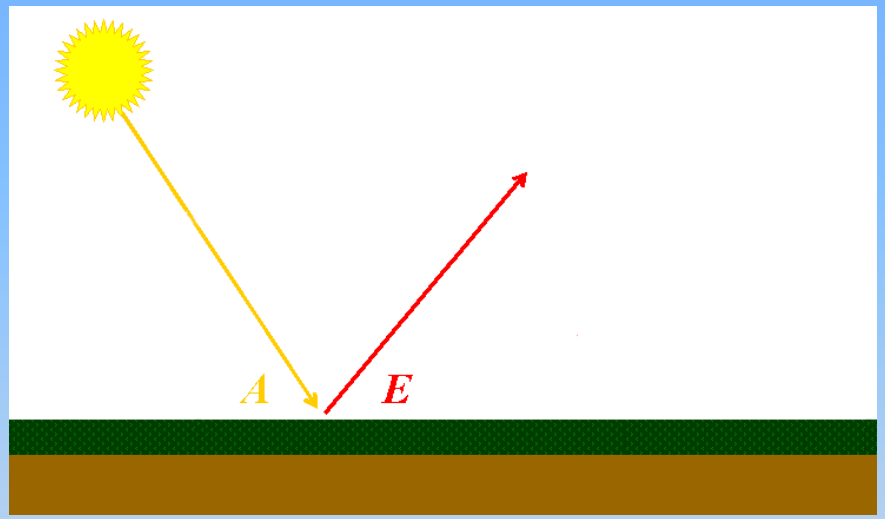
Esempio di assorbimento selettivo: lastra di vetro

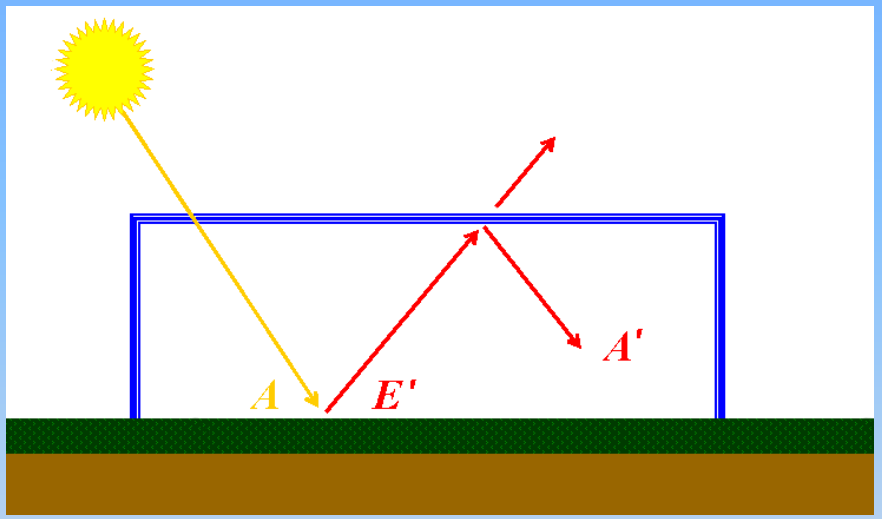


CONCLUSIONE

La lastra di vetro è trasparente alla luce, ma quasi del tutto opaca nell'infrarosso.

Applicazione dell'assorbimento selettivo: effetto serra





Energia assorbita = A

⇩

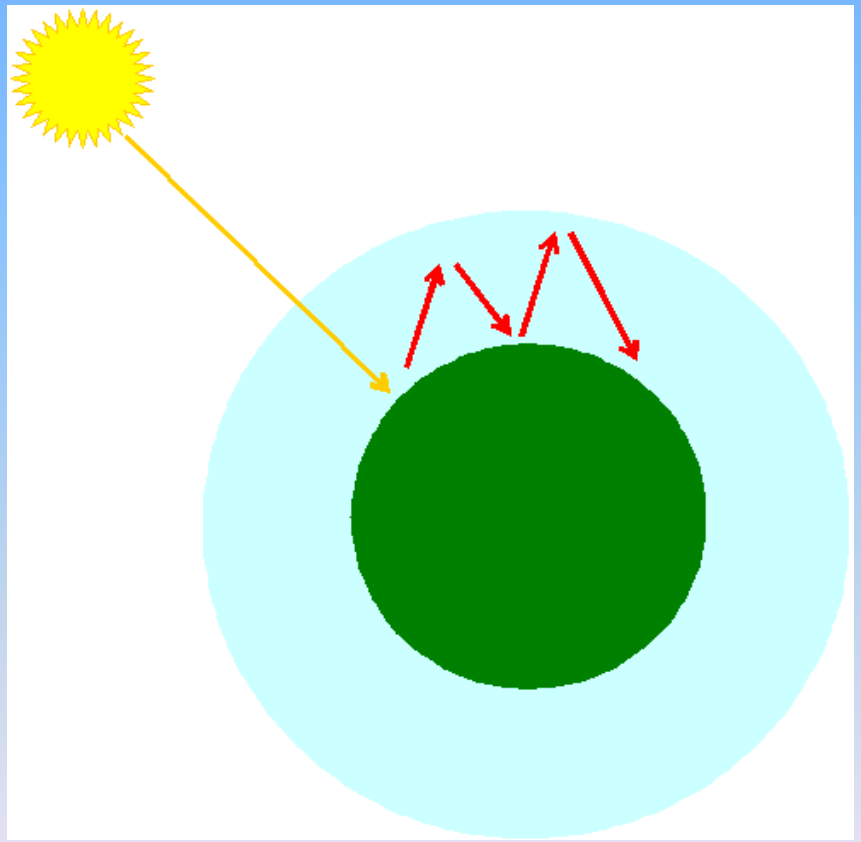
$T = T_1$

Energia assorbita = A + A'

⇩

$T = T_2 > T_1$

Applicazione dell'assorbimento selettivo: effetto serra planetario



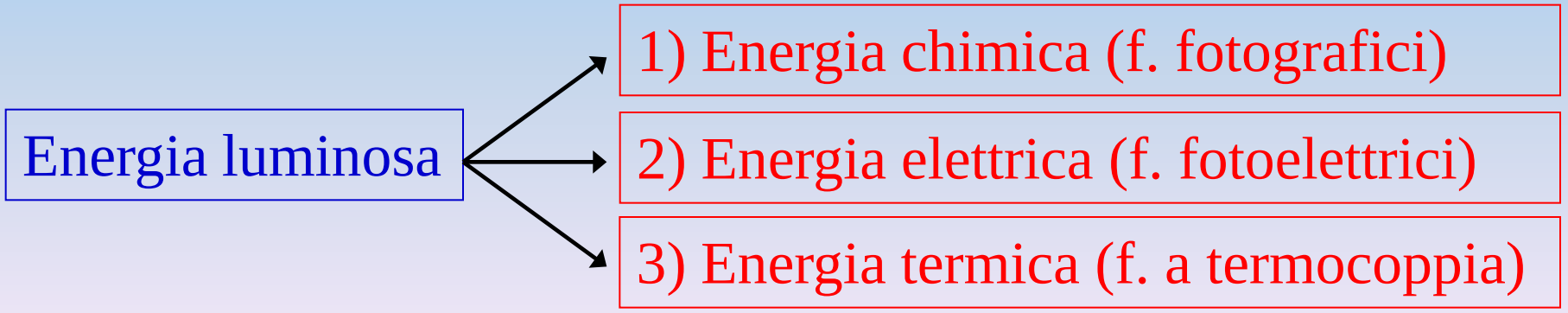
Un'atmosfera contenente *gas serra* (CO_2, H_2O, CH_4) si comporta come il vetro.

RISULTATO
La temperatura del suolo è maggiore rispetto al caso in cui l'atmosfera è priva di gas serra.

LA FOTOMETRIA – Misurazione della intensità luminosa di una sorgente (1)

Per misurare l'intensità luminosa di una sorgente sono necessari:
a) una sorgente-campione di intensità nota;
b) un fotometro.

I fotometri sono dispositivi capaci di trasformare l'energia luminosa in altre forme facilmente misurabili.



LA FOTOMETRIA – Misurazione della intensità luminosa di una sorgente (2)

Fotometri fotografici: misurano l'annerimento prodotto dalla radiazione incidente su una lastra fotografica.

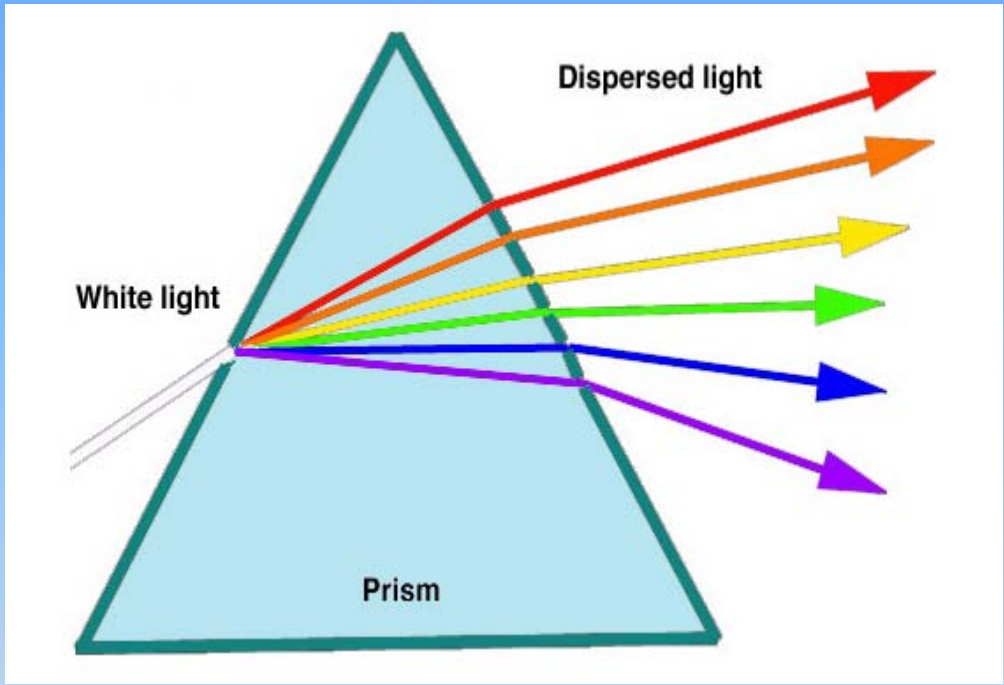
Fotometri fotoelettrici: misurano la corrente elettrica prodotta dalla radiazione incidente su una cella di silicio.

Fotometri a termocoppia: misurano l'incremento di temperatura prodotto dall'assorbimento della radiazione da parte di un opportuno materiale.

In tutti i casi prima della misura occorre *calibrare* il fotometro.

LA SPETTROSCOPIA – Dispersione della luce (1)

Elemento disperdente: prisma



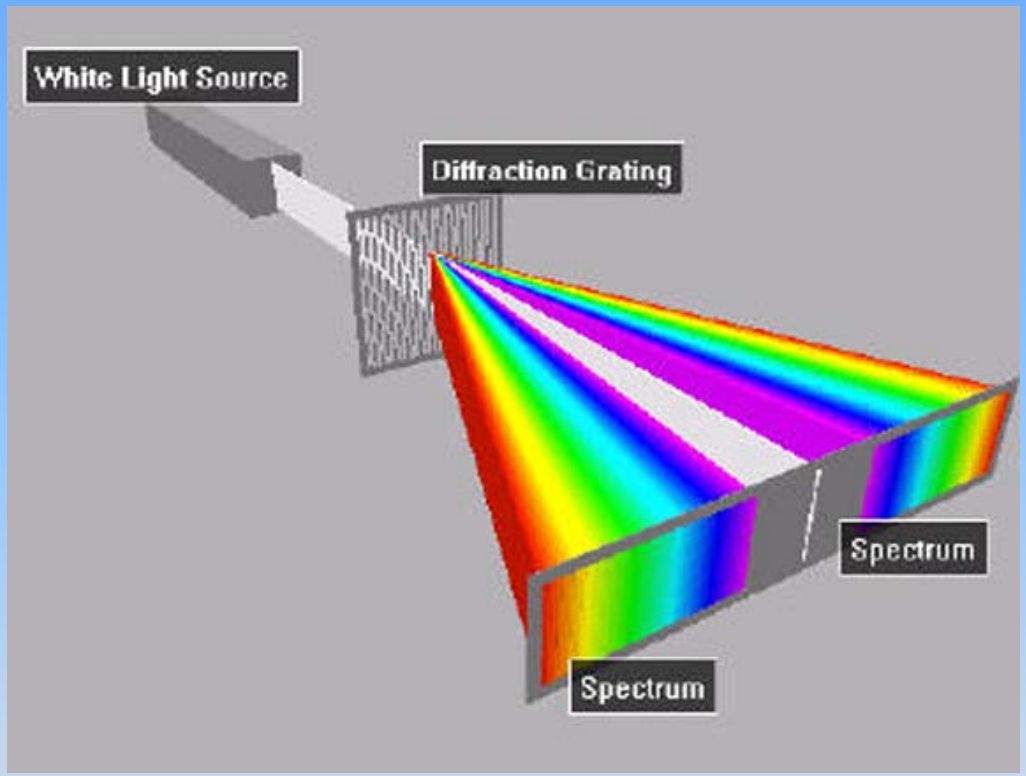
Siccome l'indice di rifrazione dipende dalla frequenza della radiazione, le diverse componenti della luce bianca sono rifratte (e quindi deviate) in diverso modo.

La luce rossa è la meno deviata; quella violetta subisce la maggiore deviazione.

L'insieme dei colori separati dal prisma costituisce lo *spettro* della luce incidente. *Esempio: l'arcobaleno*.

LA SPETTROSCOPIA – Dispersione della luce (2)

Elemento disperdente: reticolo in trasmissione

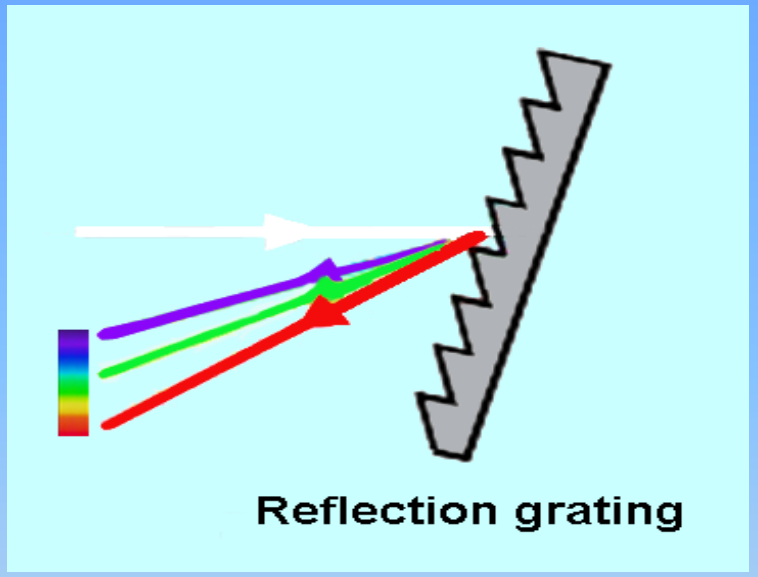


L’interferenza tra le onde che passano attraverso le fenditure produce una figura di diffrazione che dipende dalla frequenza della radiazione, separando le varie componenti della luce bianca.

Anche in questo caso l’insieme dei colori separati dal reticolo costituisce lo *spettro* della luce incidente.

LA SPETTROSCOPIA – Dispersione della luce (3)

Elemento disperdente: reticolo
in riflessione

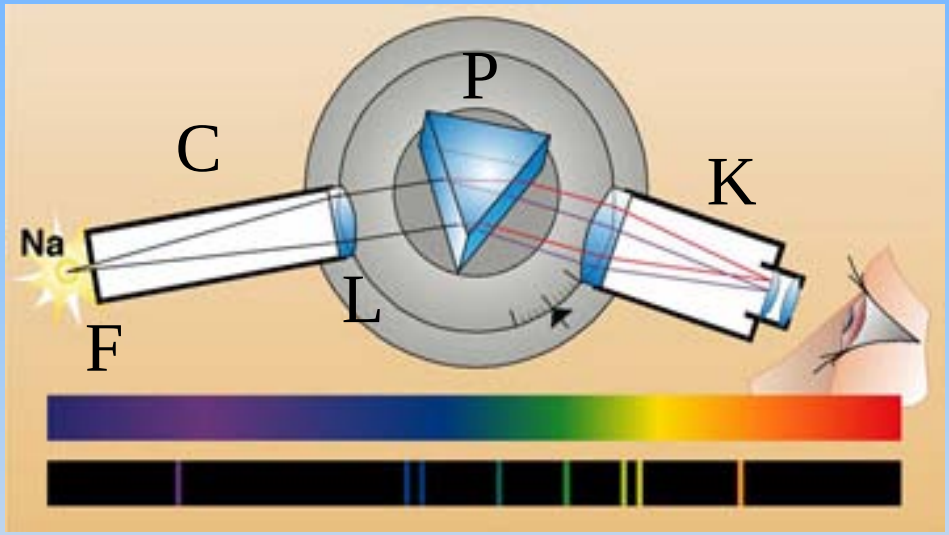


L’interferenza tra le onde riflesse dai vari solchi produce una figura di diffrazione che dipende dalla frequenza della radiazione, separando le varie componenti della luce bianca.

Anche in questo caso si produce uno *spettro* della luce incidente.
Esempio: il CD.

LA SPETTROSCOPIA – Spettroscopio

E’ lo strumento usato per osservare gli spettri delle varie sorgenti.



E’ costituito da tre elementi:
a) Un collimatore C con una fenditura F ad una estremità ed una lente L all’altra;
b) Un prisma ottico P;
c) Un cannocchiale K.

Si ottengono tante immagini di F quante sono le componenti monocromatiche della luce emessa dalla sorgente.

LA SPETTROSCOPIA
Spettrografo, Spettrometro, Spettrofotometro

Se lo strumento è in grado di fotografare gli spettri, viene detto *spettrografo*.

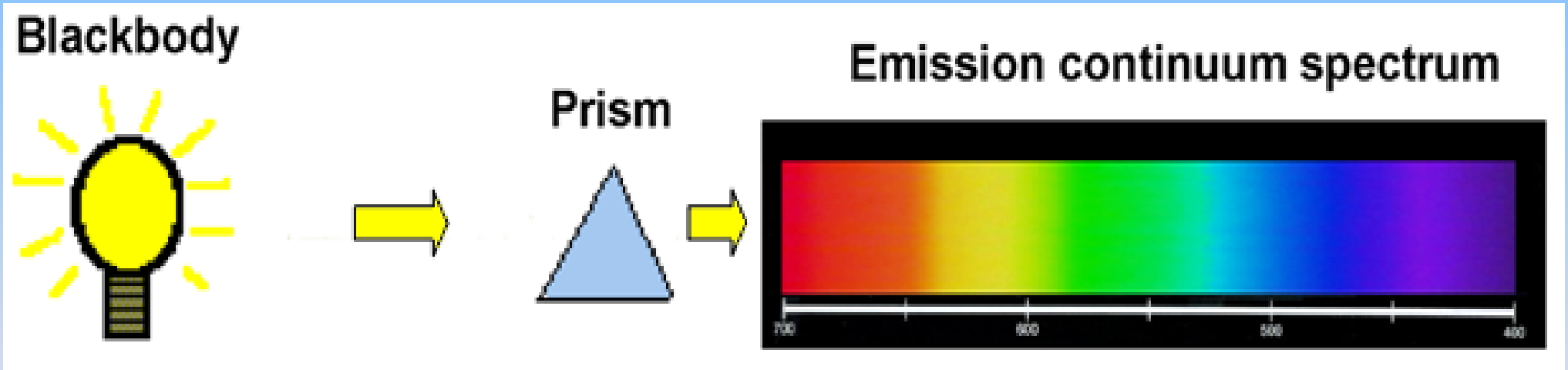
Se è munito di una scala su cui si leggono le lunghezze d'onda, è chiamato *spettrometro*.

Se è accoppiato ad un fotometro, il che permette di misurare l'intensità delle varie componenti, è detto *spettrofotometro*: l'intensità luminosa viene riportata su un grafico in funzione della lunghezza d'onda.

LA SPETTROSCOPIA – Spettri di emissione (1)

Gli spettri di emissione possono essere di tre tipi: *continui*, *a righe* e *a bande*.

Sono detti *continui* gli spettri dove sono presenti tutti i colori.

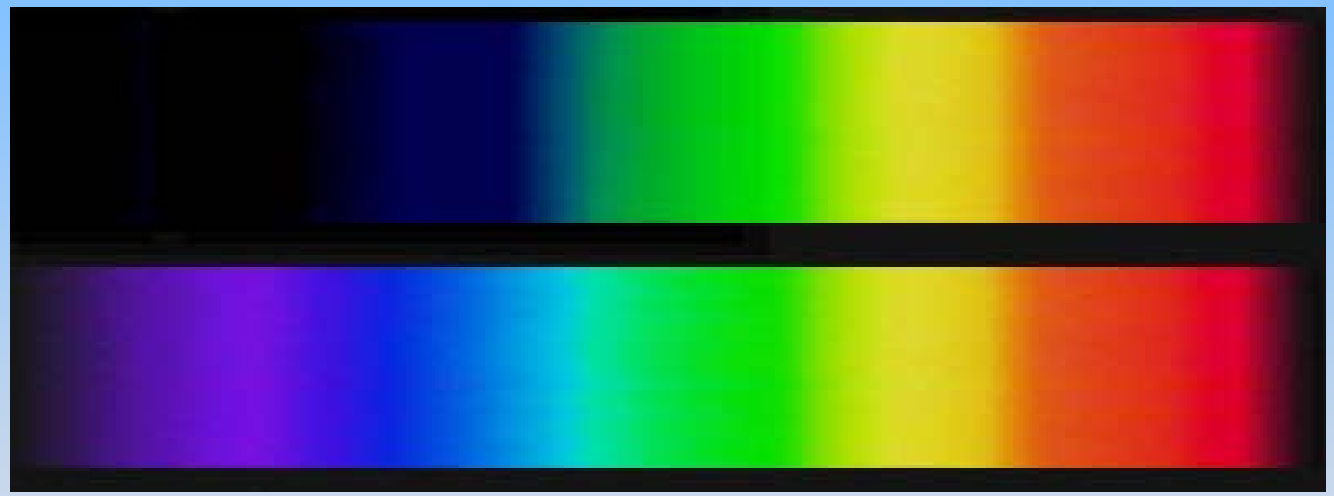


Sono emessi da tutti i solidi e liquidi incandescenti e da gas sottoposti a forti pressioni ed elevate temperature.

LA SPETTROSCOPIA – Spettri di emissione (2)

L’intensità delle diverse zone di colore varia al variare della temperatura e della natura chimica della sorgente.

(1)



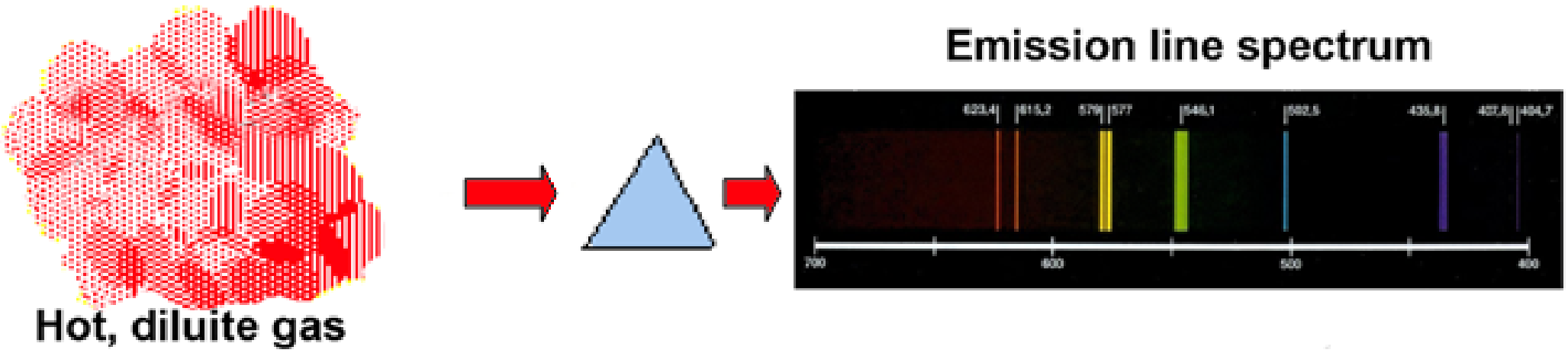
(2)

$T_1 < T_2$

Aumentando la temperatura, aumenta l’intensità delle componenti a più alta frequenza.

LA SPETTROSCOPIA – Spettri di emissione (3)

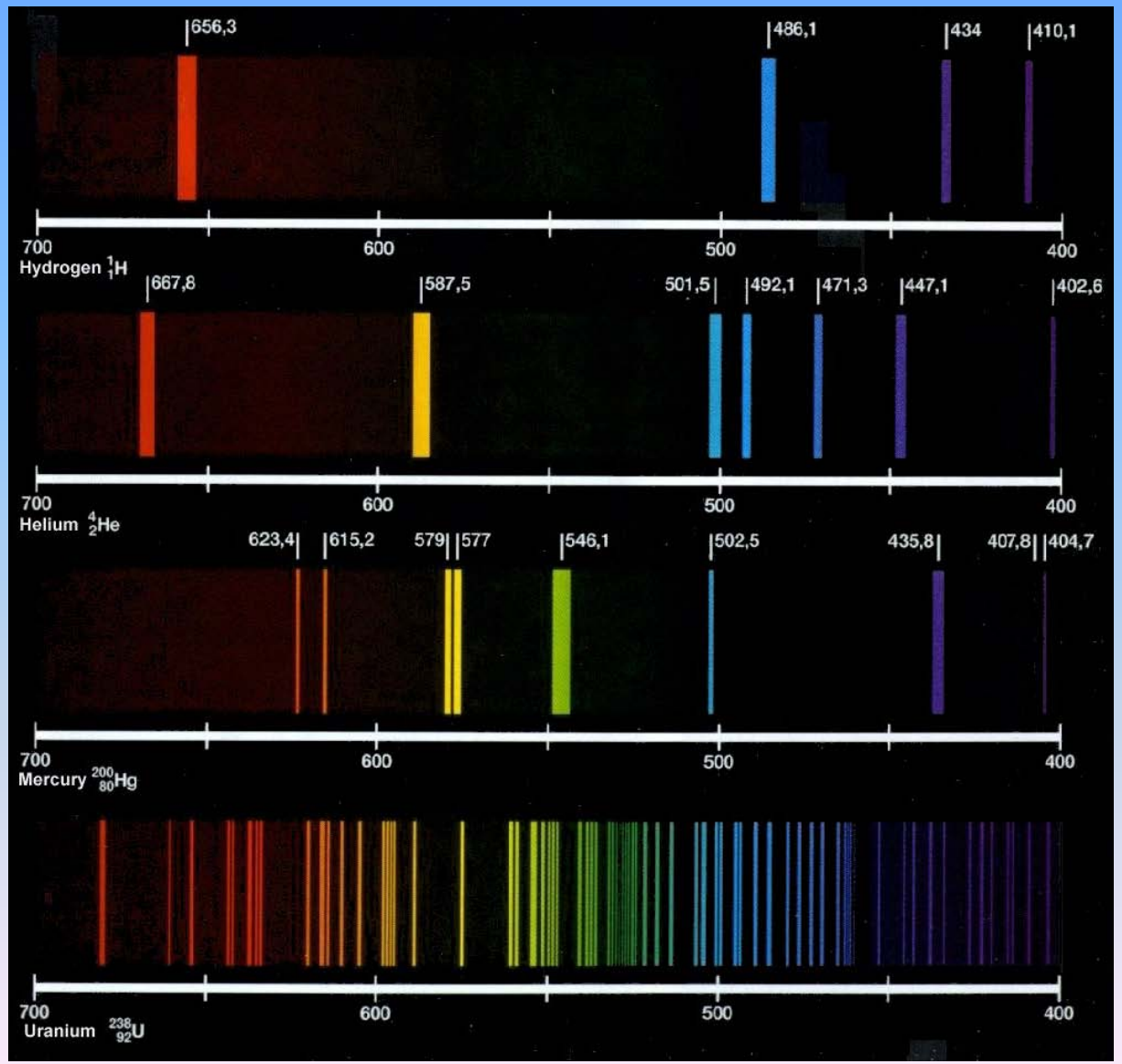
Vengono detti *spettri a righe* quelli dove si osservano soltanto poche righe colorate su sfondo nero (immagini monocromatiche della fenditura dello spettroscopio)



Sono emessi da gas caldi a basse pressioni costituiti da molecole semplici.

Il numero di righe e la loro posizione sono caratteristici del gas.

LA SPETTROSCOPIA – Spettri di emissione (4)



L'esame degli spettri a righe permette di individuare la natura chimica del gas che costituisce la sorgente.

E' questo il principio su cui si basa l'analisi chimica per via spettroscopica.

LA SPETTROSCOPIA – Spettri di emissione (5)

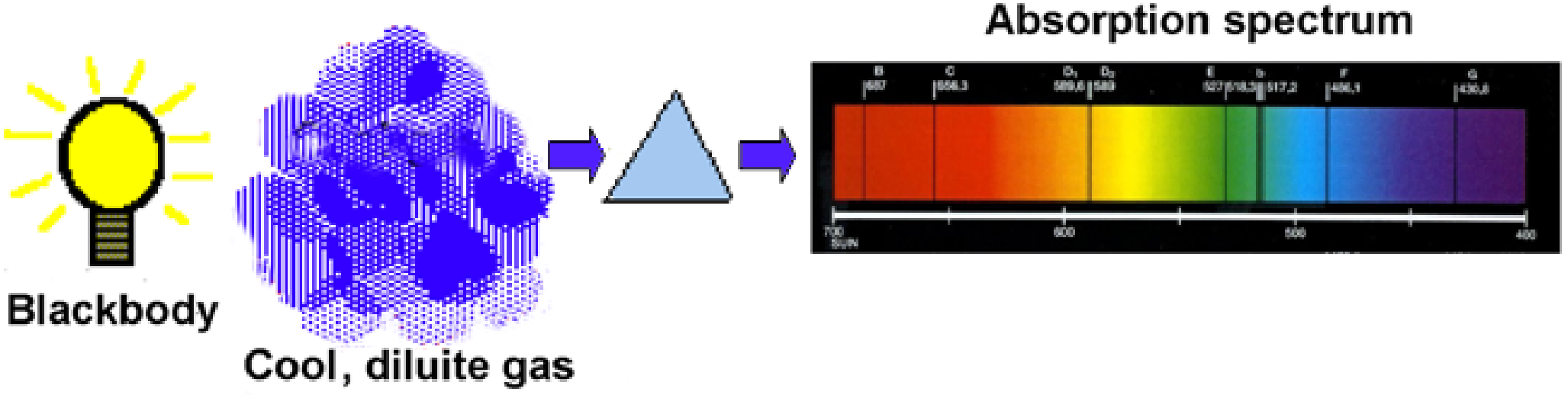
Gli spettri a bande sono degli spettri a righe dove queste ultime sono tanto numerose e vicine da formare delle zone colorate intervallate da spazi neri.

Gli spettri a bande sono emessi da gas caldi a basse pressioni costituiti da molecole a struttura complessa.

LA SPETTROSCOPIA – Spettri di assorbimento (1)

Gli *spettri d'assorbimento* sono spettri continui solcati da righe nere.

Si producono quando un fascio di luce attraversa un gas a temperatura inferiore a quella della sorgente.



LA SPETTROSCOPIA – Spettri di assorbimento (2)

Le righe nere sono dovute all'assorbimento di radiazione da parte del gas e si osservano alle stesse lunghezze d'onda alle quali il gas emetterebbe se fosse a temperatura elevata.

Ogni sostanza può assorbire radiazione e.m. alle stesse lunghezze d'onda alle quali può emettere.

(Principio di Kirchhoff)

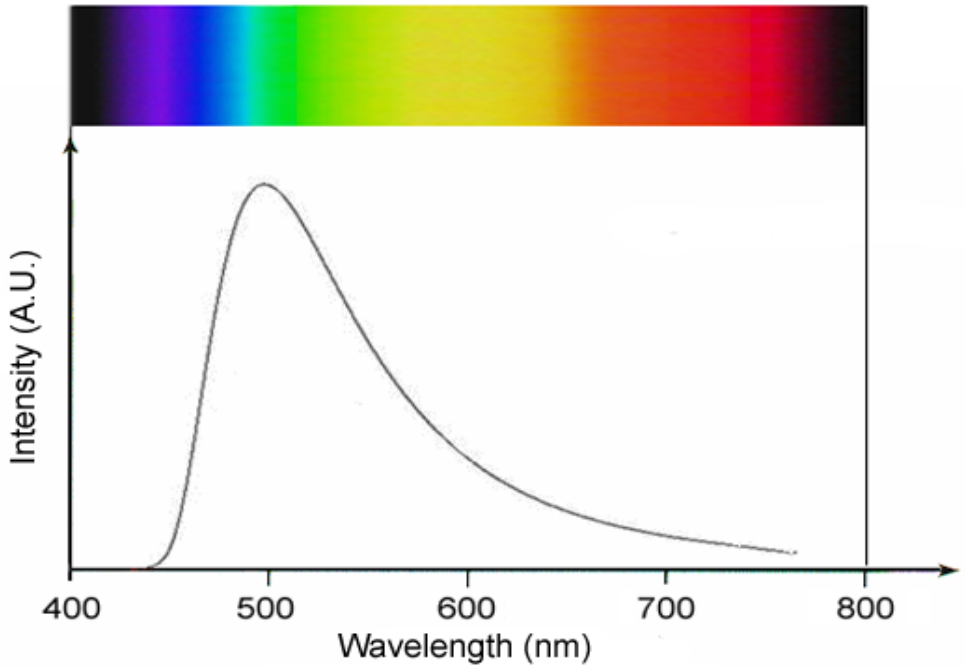
Le righe nere non sono dovute a totale assenza di emissione: il motivo per cui le vediamo nere è solo una questione di contrasto.

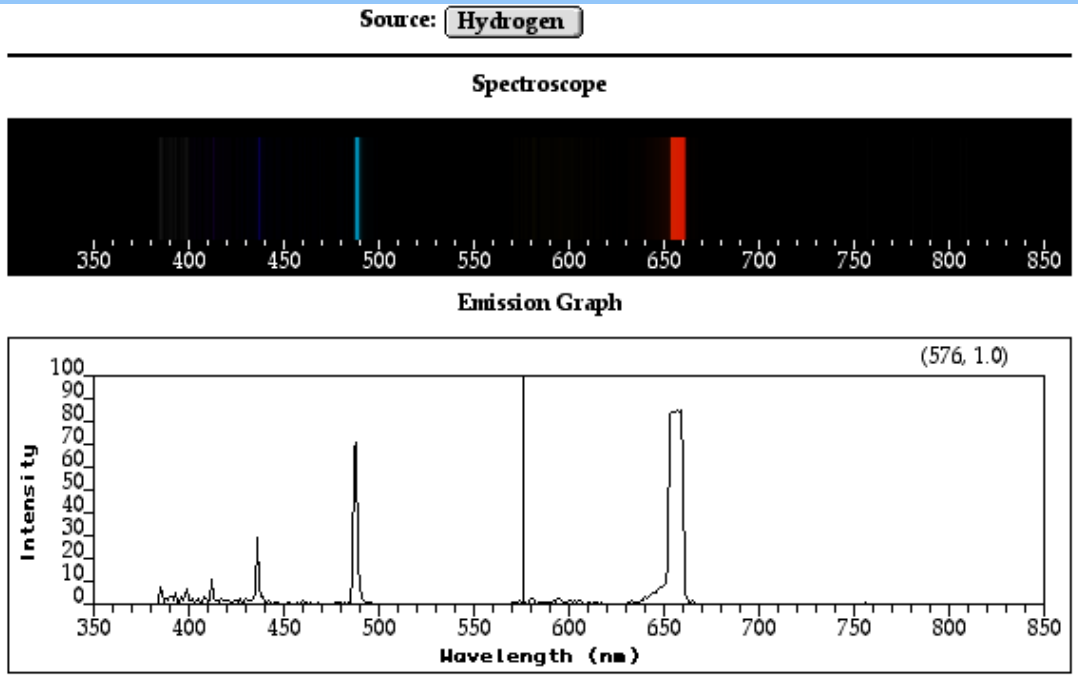
Gli spettri di assorbimento hanno lo stesso potere diagnostico di quelli di emissione a righe.

LA SPETTROFOTOMETRIA - Caratteristiche

La spettrofotometria fornisce maggiori informazioni quantitative rispetto alla spettrometria e alla spettroscopia.

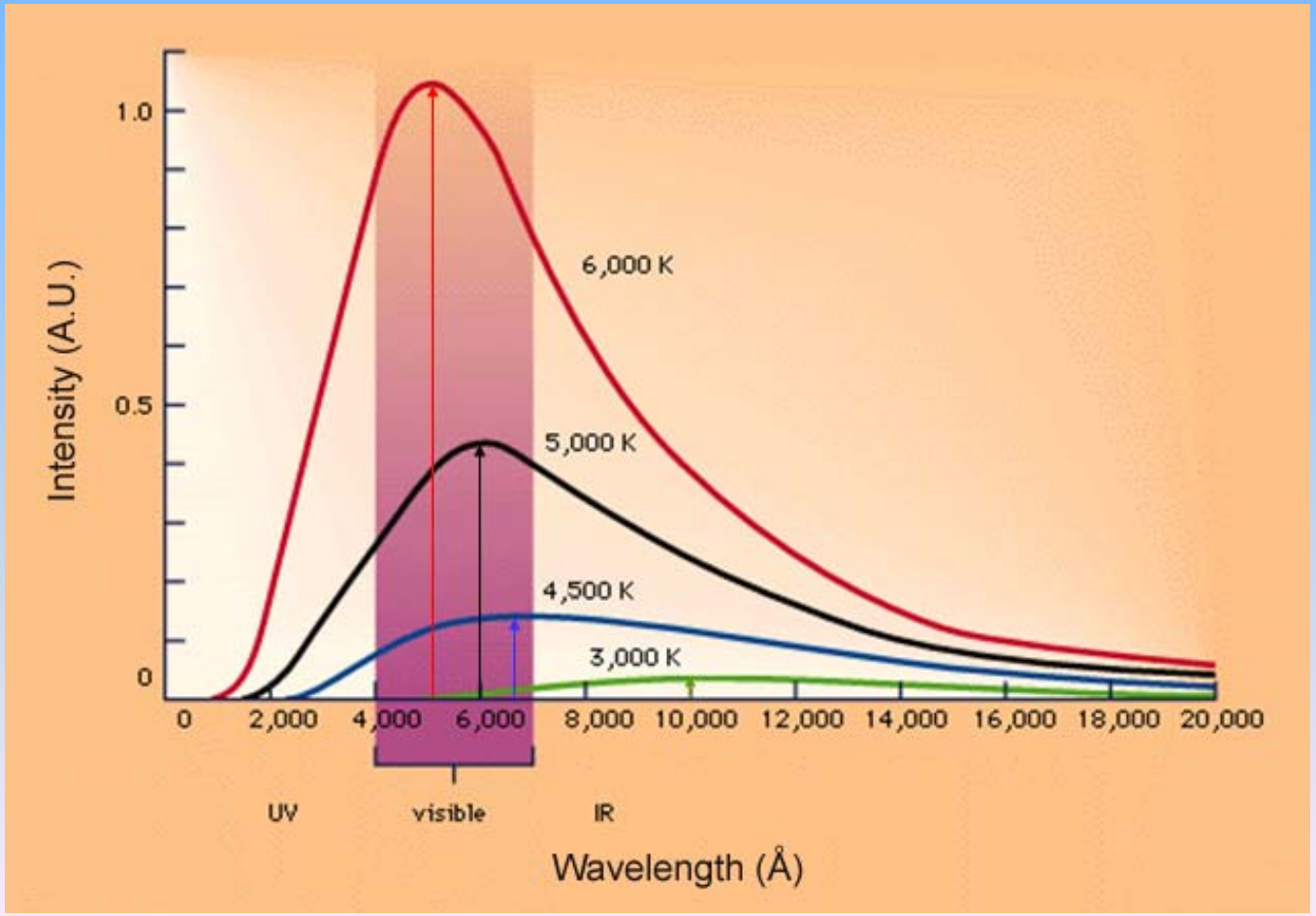
E' utilissima sia nel caso di uno spettro continuo (dove la spettroscopia dà poche informazioni) che di uno a righe.





LA SPETTROFOTOMETRIA – Legge di Wien

Il colore di una sorgente, e più precisamente la lunghezza d'onda alla quale questa emette più energia, dipende dalla temperatura.



Legge di Wien:

$$\lambda_{MAX} = \frac{3 \times 10^7}{T}$$

(con λ_{MAX} in Ångstrom e T in gradi Kelvin).

LA FOTOMETRIA STELLARE – Magnitudine (1)

La scala di luminosità stellare risale ad Ipparco (II secolo a.C.).

Le 4000-5000 stelle visibili ad occhio nudo erano suddivise in *sei classi di grandezza*, poi indicate con 1^m, 2^m, …, 6^m (dove *m* sta per *magnitudo*).

Attenzione: queste classi non hanno niente a che vedere con le dimensioni delle stelle; sono invece *classi di luminosità*.

Ipparco riunì nella 1^a grandezza tutte le stelle più luminose; nella 6^a quelle appena visibili ad occhio nudo.

LA FOTOMETRIA STELLARE – Magnitudine (2)

La classificazione di Ipparco ha funzionato bene per 21 secoli.

Intorno al 1870 essa è stata estesa e ritoccata da Pogson con l'introduzione della cosiddetta *magnitudine* di una stella definita come:

$$m = -2.5 \log I + k$$

dove I è l'intensità della luce stellare mentre k è una costante scelta assegnando ad una stella-campione una magnitudine fissata per convenzione (originariamente $m = 2$ per la Stella Polare, di 2^m nel catalogo di Ipparco).

LA FOTOMETRIA STELLARE – Magnitudine (3)

Considerazioni sulla definizione di magnitudine

$$m = -2.5 \log I + k$$

a) *m* è detta *magnitudine visuale apparente* poiché I è l'intensità della luce stellare che giunge sulla Terra nel visibile e non quella emessa dalla stella nella stessa regione spettrale;
b) la dipendenza logaritmica da I tiene conto della fisiologia dell'occhio umano: la sensazione visiva cresce con il logaritmo del segnale luminoso (legge di Weber-Fechner);
c) Il fattore – 2.5 fa sì che, date due stelle, la differenza tra le loro magnitudini apparenti è circa pari alla differenza tra le loro grandezze nel catalogo di Ipparco.

LA FOTOMETRIA STELLARE – Magnitudine (4)

Considerazioni sulla definizione di magnitudine

$$m = -2.5 \log I + k$$

d) il segno negativo implica che le stelle più brillanti (alta *I*) hanno magnitudine più bassa, in accordo con la classificazione di Ipparco (le stelle di 1^m sono più luminose di quelle di 2^m e così via).

CONCLUSIONE

La scala di magnitudini stellari di Pogson è compatibile con le classi di luminosità di Ipparco.

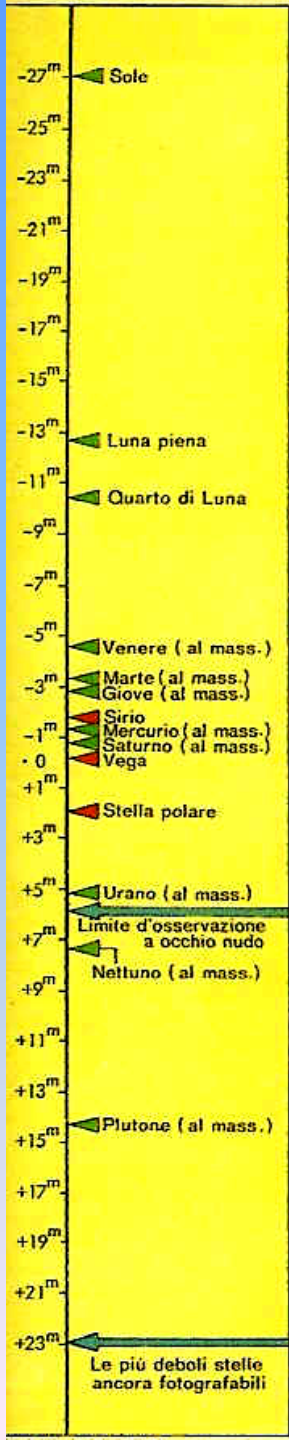
LA FOTOMETRIA STELLARE – Scala di magnitudini

La magnitudine apparente può essere misurata per tutte le sorgenti celesti: dal Sole (-27^m o $m = -27$) alle stelle più deboli, osservabili solo al telescopio ($+24^m$ o $m = +24$).

Escluso il Sole, la stella più luminosa è Sirio di $-1^m,46$.

Una sorgente di 1cd a 1m di distanza ha la stessa luminosità di un ipotetico oggetto celeste di quasi -14^m.

La magnitudine apparente può essere misurata anche a lunghezze d'onda diverse dal visibile.

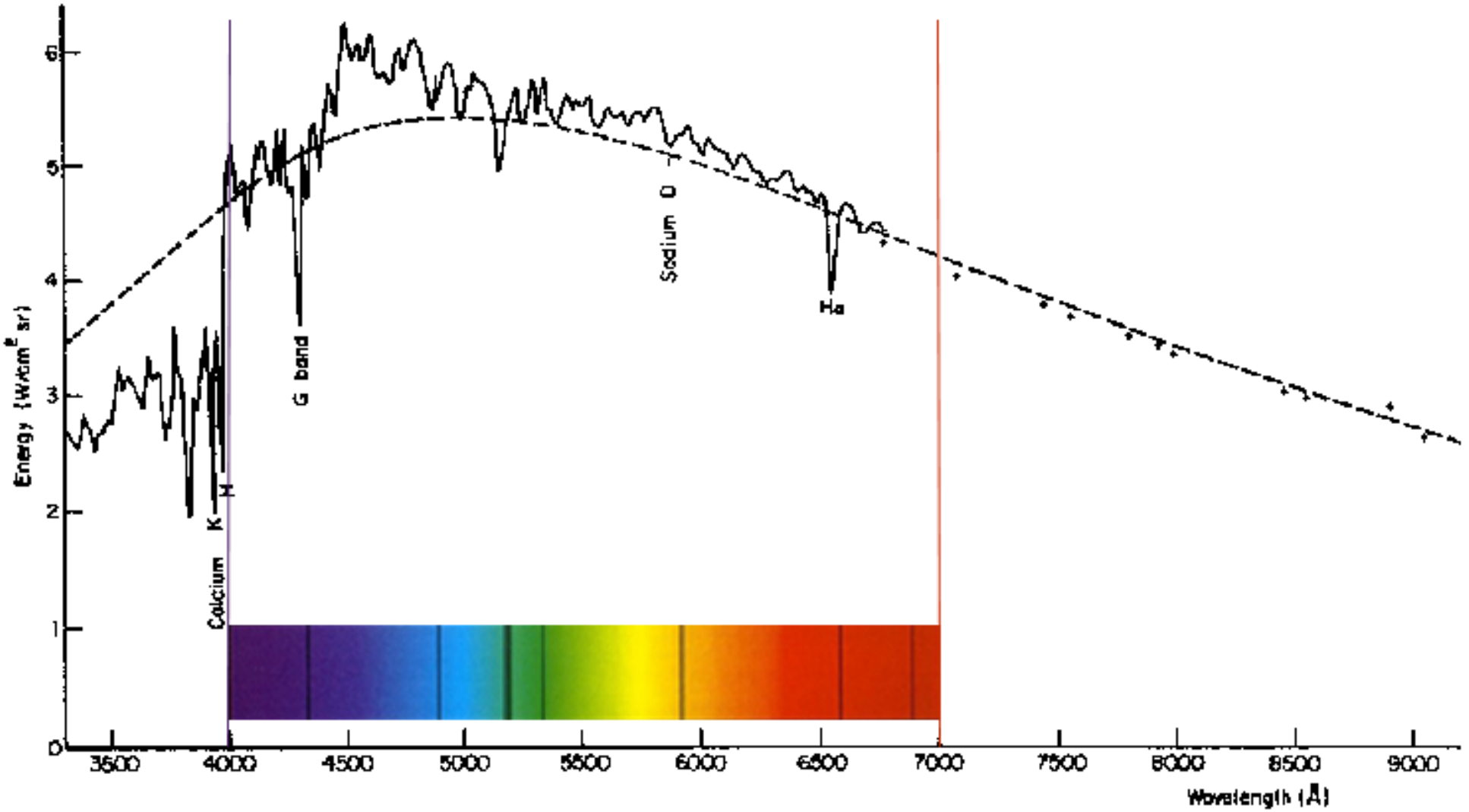


LA SPETTROFOTOMETRIA STELLARE – Tecnica ed obiettivi (1)

Gli spettrografi e gli spettro-fotometri vengono applicati all'estremità del telescopio dove l'obiettivo o lo specchio concentrano la luce (esattamente nel piano focale di questi ultimi)

Con la spettrofotometria è possibile ottenere: a) la composizione chimica della sorgente; b) la sua temperatura.

LA SPETTROFOTOMETRIA STELLARE – Tecnica ed obiettivi (2)



LA SPETTROFOTOMETRIA STELLARE – Tecnica ed obiettivi (3)

L’identificazione delle righe in assorbimento in uno spettro stellare (ad esempio quello del Sole) permette di effettuare un’*analisi chimica qualitativa* dell’atmosfera stellare.

Più difficile si presenta un’*analisi quantitativa*.

Un elemento può essere massicciamente presente in una stella pur senza produrre righe in assorbimento.

Le temperature superficiali delle stelle si possono ottenere tramite la legge di Wien dalla misura della lunghezza d’onda di massima emissione.

LA FOTOMETRIA – Intensità luminosa (1)

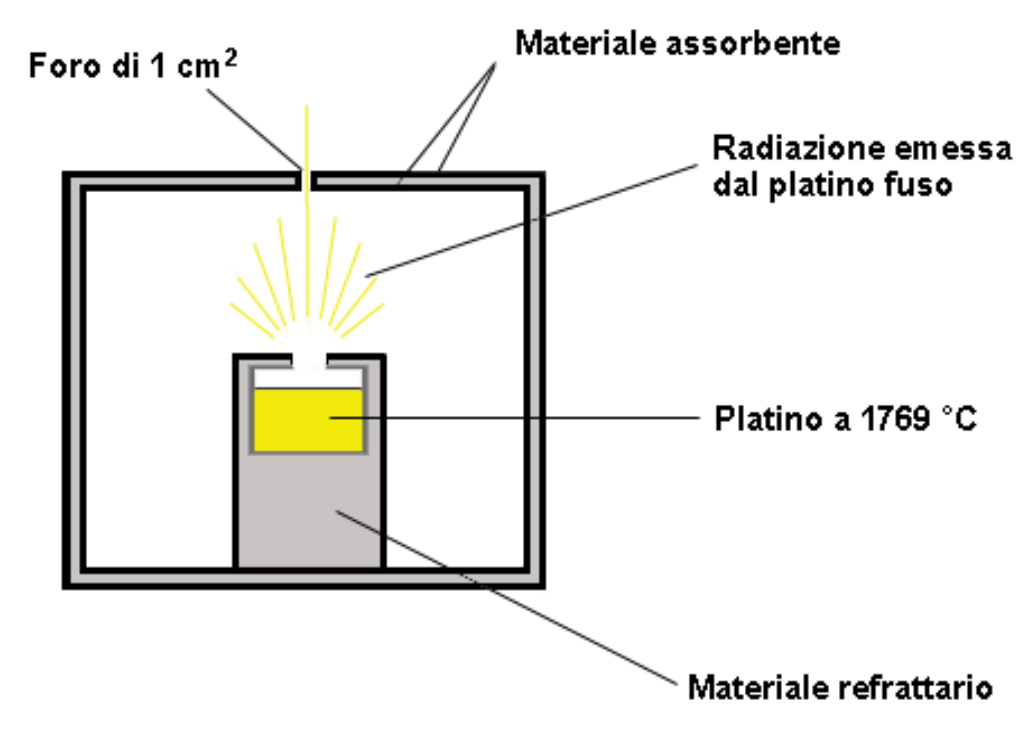
In passato l'interesse non è stato tanto quello di misurare l'energia luminosa emessa da una sorgente ma piuttosto valutare l'intensità della *sensazione visiva* che la luce provoca nell'occhio umano.

Unità di misura scelta per l'intensità luminosa *I* di una sorgente: la *candela* (cd).

Nel Sistema Internazionale la candela si univa alle quattro unità di misura fondamentali: *metro*, *chilogrammo*, *secondo*, *ampère*.

LA FOTOMETRIA – Intensità luminosa (2)

Si definisce candela la 60ma parte dell'intensità luminosa emessa da un corpo nero di Burgess alla temperatura di fusione del platino.



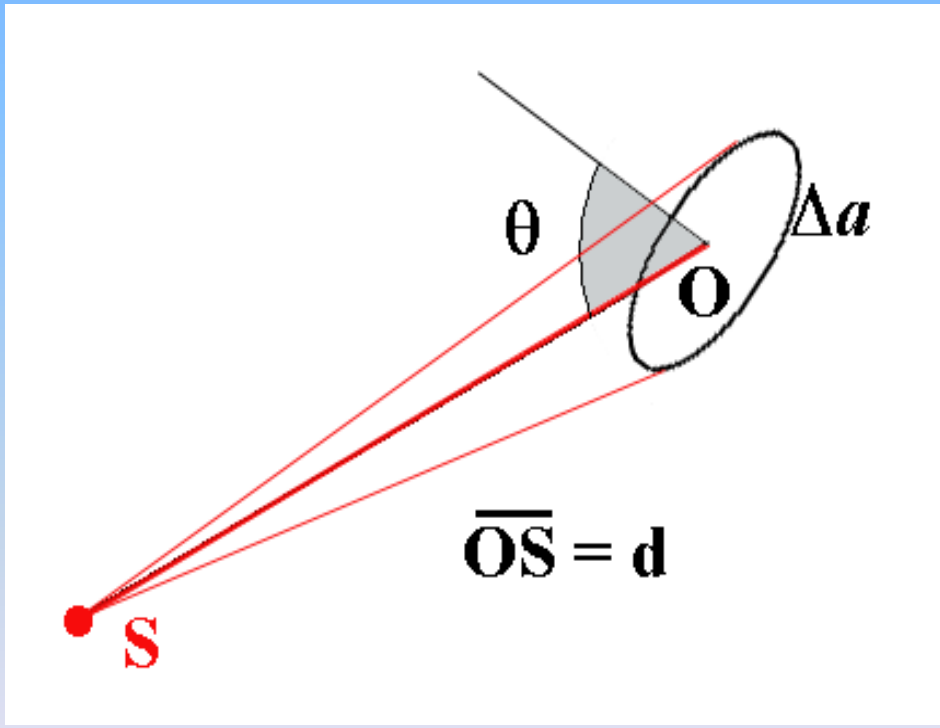
Schema di corpo nero di Burgess (sorgente-campione)

Oggi si preferisce misurare l'intensità luminosa in *joule*.

LA FOTOMETRIA – Illuminanza (1)

L'*illuminanza* o *intensità di illuminazione E* di una superficie Δa è una grandezza che misura l'energia radiante raccolta da Δa. Essa è data dalla *legge di Lambert*:

$$E = \frac{I}{d^2}\cos\theta$$

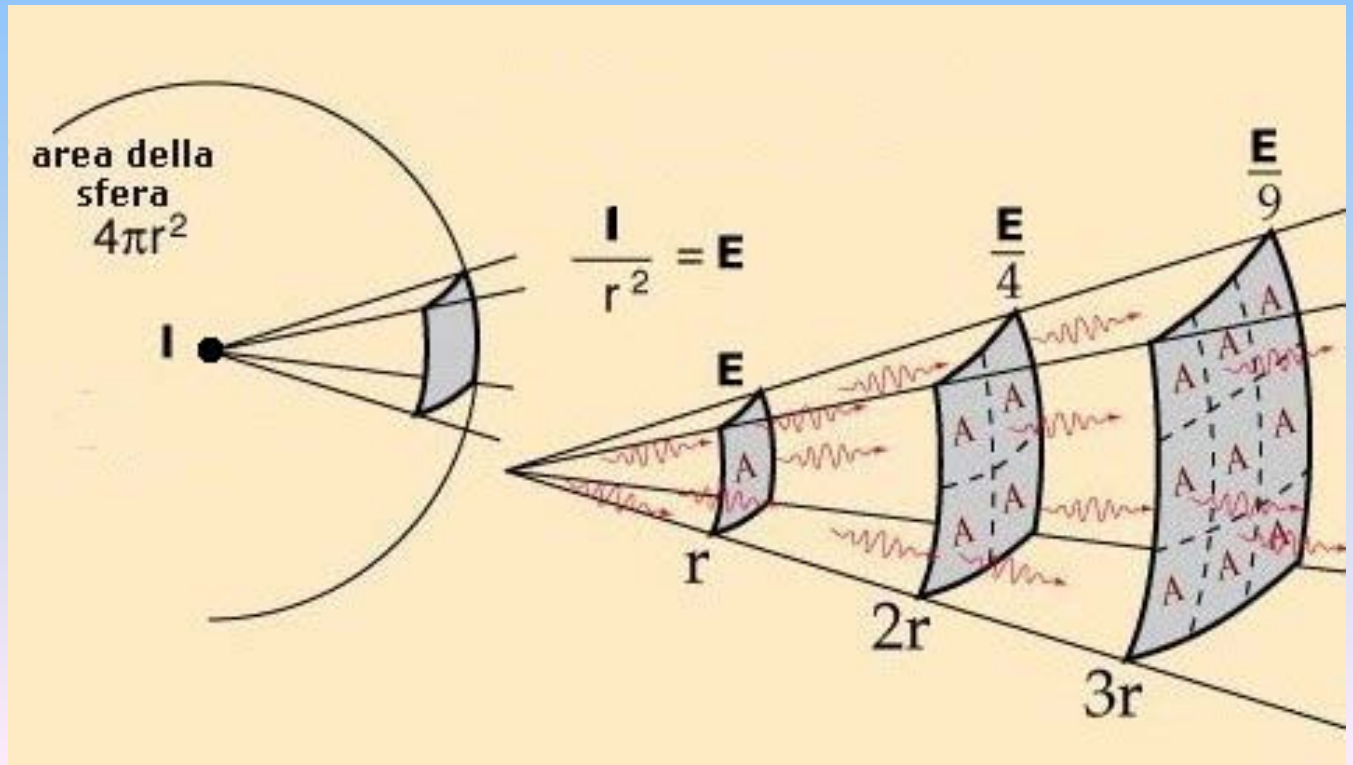


L'illuminanza della superficie Δa è direttamente proporzionale all'intensità luminosa I della sorgente S e al coseno dell'angolo θ tra la direzione di incidenza e la normale a Δa ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza d tra S e Δa.

LA FOTOMETRIA – Illuminanza (2)

Conseguenza della legge di Lambert:

Una superficie A di area unitaria posta su una sfera di raggio r centrata intorno alla sorgente ha un'illuminanza pari a *4 volte* quella della stessa superficie A posta su una sfera di raggio 2r.



LA SPETTROSCOPIA – Livelli energetici atomici

In un atomo ogni elettrone possiede una certa energia di posizione rispetto al nucleo, tanto maggiore quanto più grande è la distanza elettrone-nucleo.

Al contrario dei pianeti, solo alcune orbite di energia ben definita (*quantizzata*) E_1, E_2, E_3, …. sono consentite all'elettrone.

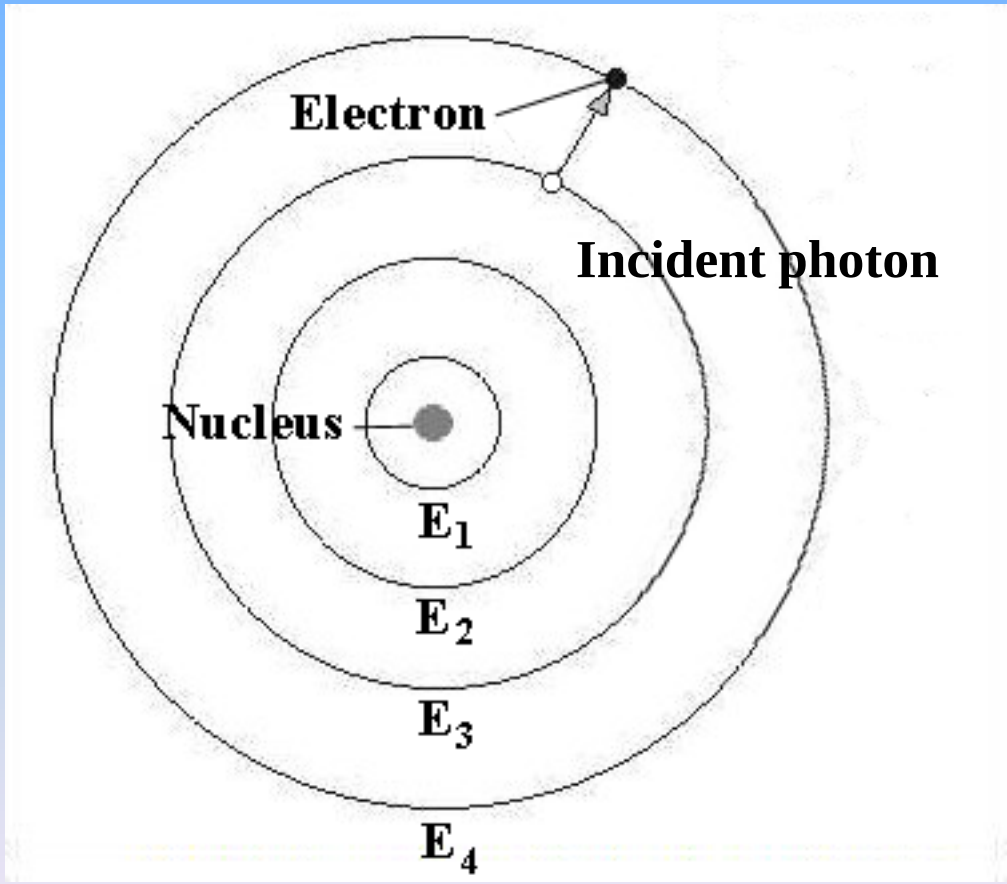
L'elettrone in un atomo ha a disposizione un serie di livelli energetici quantizzati.

In genere l'elettrone tende a stare nel livello energetico più vicino al nucleo (*livello fondamentale*); tutti gli altri sono detti *livelli eccitati*.

LA SPETTROSCOPIA – Assorbimento ed emissione di radiazione (1)

Si consideri ad esempio un atomo con un elettrone posto sull'orbita con energia E_3 (*livello eccitato*).

Se questo interagisce con un fotone di energia $\Delta E = E_4 - E_3$, l'elettrone può assorbirla e saltare al livello superiore di energia E_4 (con vita-media dell'ordine di 10^{-8} s).

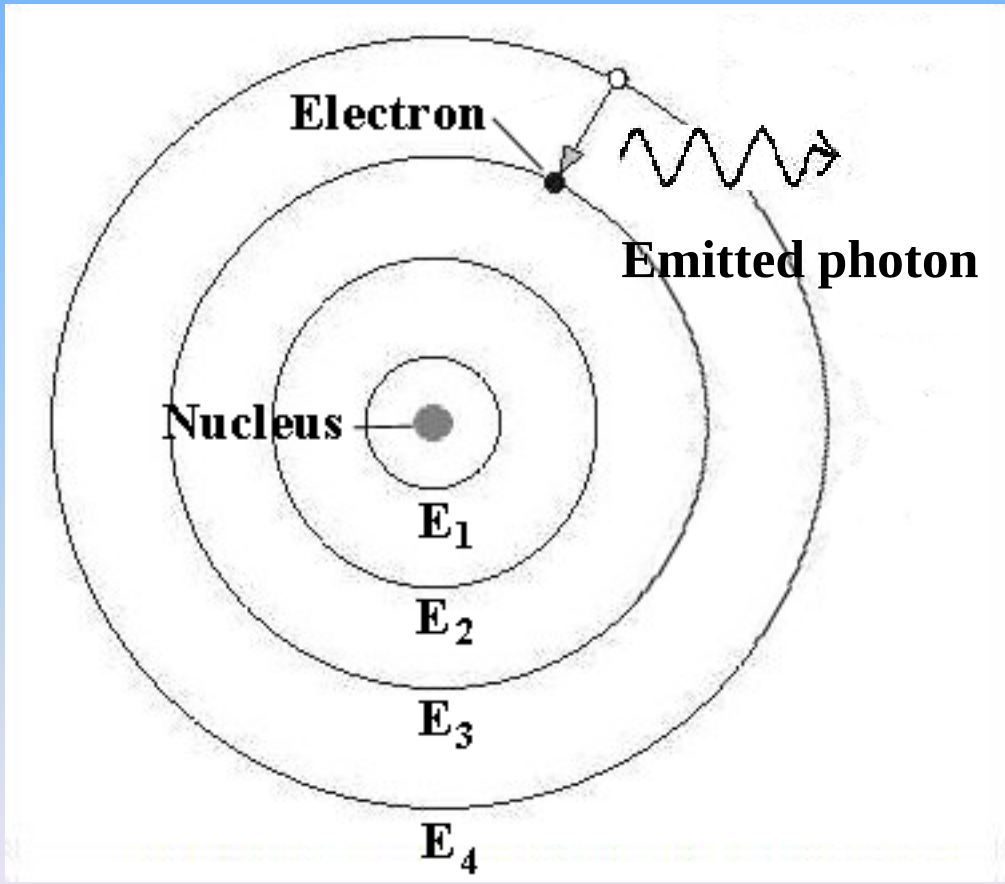


LA SPETTROSCOPIA – Assorbimento ed emissione di radiazione (2)

Dal livello E_4 l'elettrone può ritornare al livello E_3 o ad uno più basso, emettendo un fotone di frequenza:

$$\nu = \frac{\Delta E}{h}$$

Più grande è il salto energetico ΔE, maggiore è la frequenza della radiazione emessa.



LA SPETTROSCOPIA – Assorbimento ed emissione di radiazione (3)

Sia l'assorbimento che l'emissione di radiazione da parte di un atomo sono associati ad una variazione dell'orbita di uno dei suoi elettroni.

Il salto dell'elettrone ad un livello energetico superiore non è sempre prodotto dall'assorbimento di un fotone: l'atomo può assorbire energia anche per collisioni con altre particelle (altri atomi o ioni o elettroni liberi).