

# Messaggera del Cielo

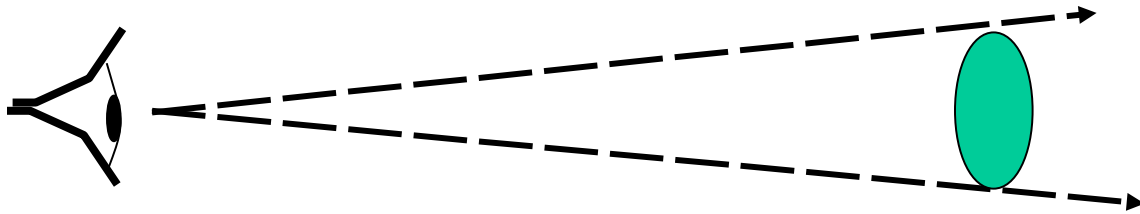
Breve storia della luce e delle sue  
applicazioni astronomiche

# La luce nell'antichità

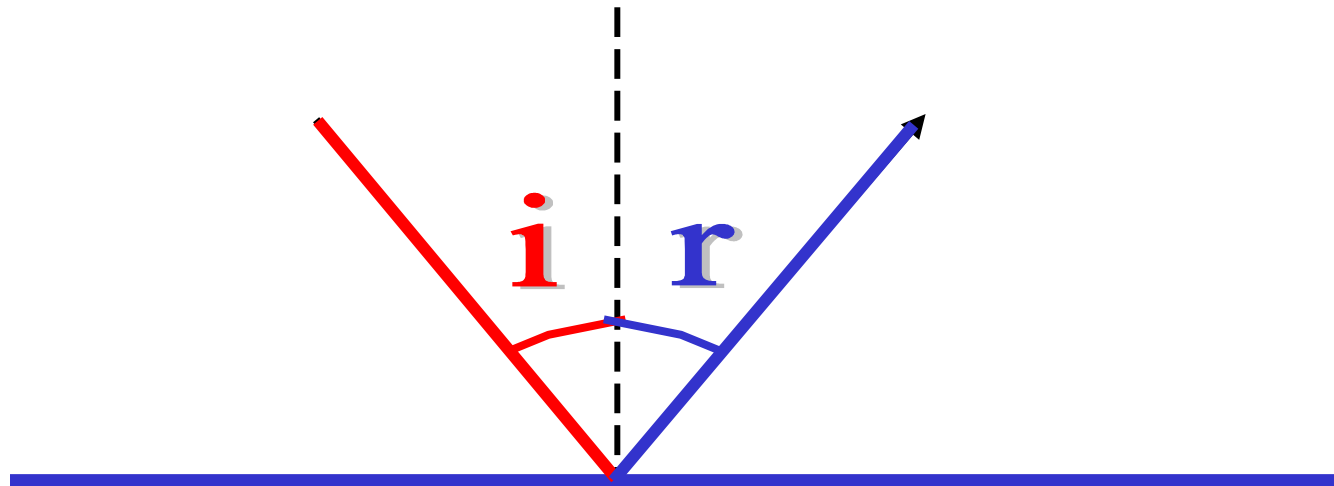
- Empedocle e il “raggio visivo”: si vedono gli oggetti perché la luce esce dall'occhio, va verso l'oggetto osservato e torna all'occhio
- Democrito e la natura atomica della luce: la luce si propaga mediante sottili “veli” di atomi, che formano le immagini (“éidola”)
- Aristotele: la luce non è sostanza ma qualità (attività dei mezzi trasparenti che, quando c'è una sorgente luminosa si riempiono istantaneamente di immagini).

# Euclide e l'ottica geometrica

- propagazione rettilinea della luce: teoremi sulle dimensioni apparenti degli oggetti (diametri angolari)

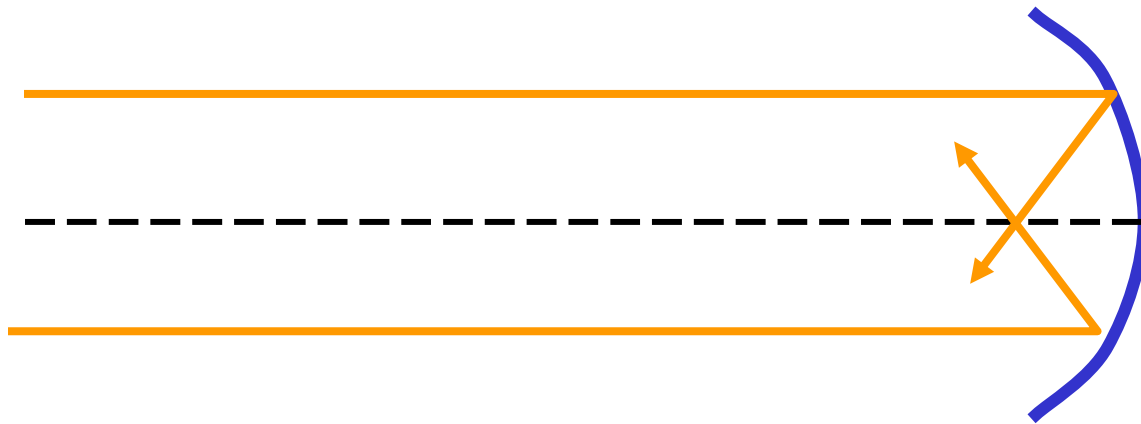


- leggi della riflessione

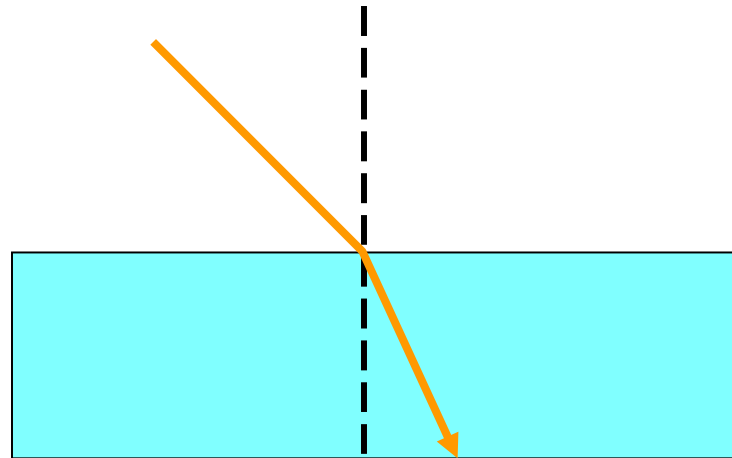


- raggio incidente, raggio riflesso e perpendicolare alla superficie di riflessione appartengono allo stesso piano
- l'angolo di incidenza (formato dal raggio incidente e dalla perpendicolare alla superficie di riflessione) è uguale all'angolo di riflessione (formato dal raggio riflesso e dalla stessa perpendicolare alla superficie di riflessione)

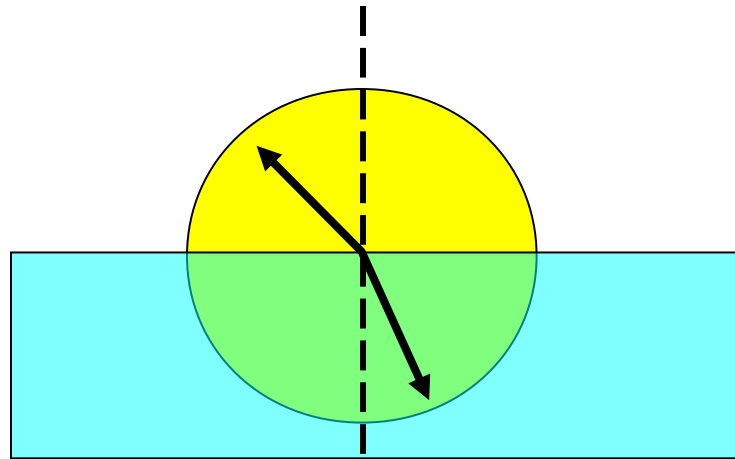
Diocle scopre che la forma degli specchi  
“ustori” deve essere parabolica per  
concentrare la luce in un punto (il “fuoco”)



- La rifrazione della luce (deviazione della luce nel passare da un mezzo materiale ad un altro) e il tentativo di descriverla matematicamente attraverso una relazione tra l'angolo tra un raggio di luce incidente la superficie di separazione dei mezzi e la perpendicolare alla stessa superficie e l'angolo formato tra il raggio rifratto e la stessa perpendicolare



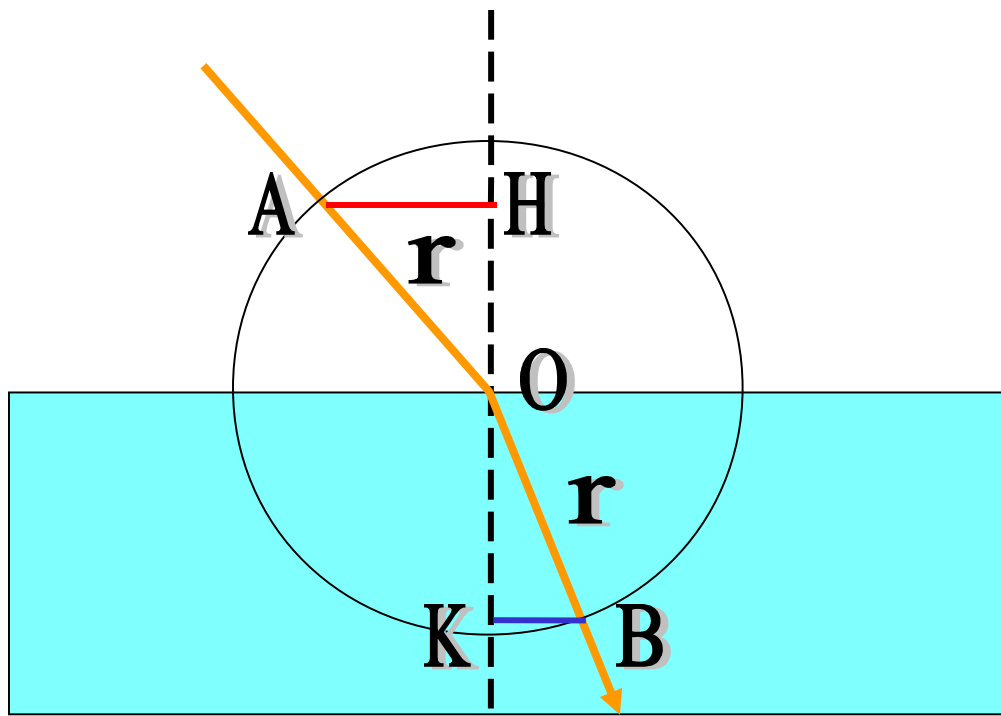
Tolomeo di Alessandria ci prova immergendo per metà nell'acqua un goniometro con due frecce uscenti dal suo centro; quindi le ruota tenendone una dentro l'acqua l'altra fuori finché non vede da fuori il pelo dell'acqua le due punte allineate con il perno centrale.



Ottiene due tabelle di dati (per gli angoli indicati dalle frecce dentro e fuori dell'acqua) che non riesce a mettere in semplice relazione numerica.

- Gli arabi studiano la forma perfetta delle lenti “ustrici”(Alhazèn)
- Alhazèn scopre la “camera oscura” (il foro “stenopeico”)
- XI° secolo: si comincia a parlare dell’uso degli occhiali (*“roidi da ogi”*)
- XIII° secolo: la luce è il fenomeno fisico più studiato per il suo importante ruolo cosmologico e teologico (R. Grossatesta e Ruggero Bacon)

- 1609: Galileo Galilei accoppia due lenti e realizza il “cannocchiale”; lo stesso Galileo utilizza per la prima volta il cannocchiale per osservare il Cielo
- 1611: Keplero scrive il primo trattato di ottica in cui si parla del cannocchiale (“*Dioptrice*”)
- 1617: Willebrod Snell trova la prima formulazione matematica della legge della rifrazione (che da allora diventerà “legge di Snell”):



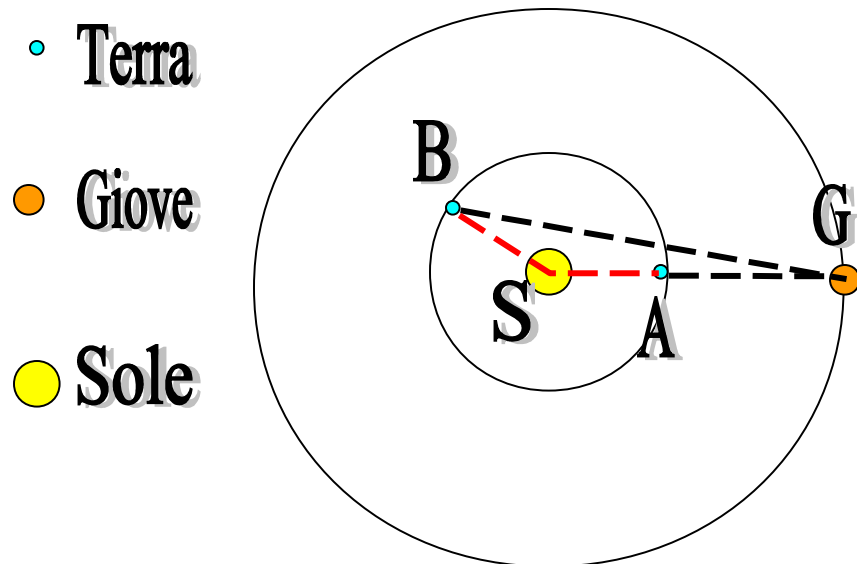
Il rapporto tra  $AH$  e  $BK$  resta costante se i due mezzi attraverso i quali la luce si propaga restano gli stessi: è “l’indice di rifrazione relativo”

Oggi la legge di Snell viene scritta nella forma:

$$\frac{\text{sen } \theta_2}{\text{sen } \theta_1} = n \quad (\text{indice di rifrazione del mezzo 2 rispetto al mezzo 1})$$

Prime misure della velocità della luce: Roemer attribuisce il ritardo delle eclissi di Io (satellite più interno di Giove) quando il pianeta è prossimo alla congiunzione, con il fatto che in quella fase il pianeta è più lontano dalla Terra e la sua luce impiega più tempo ad arrivare a noi (il tempo impiegato a descrivere circa due volte la distanza Terra - Sole).

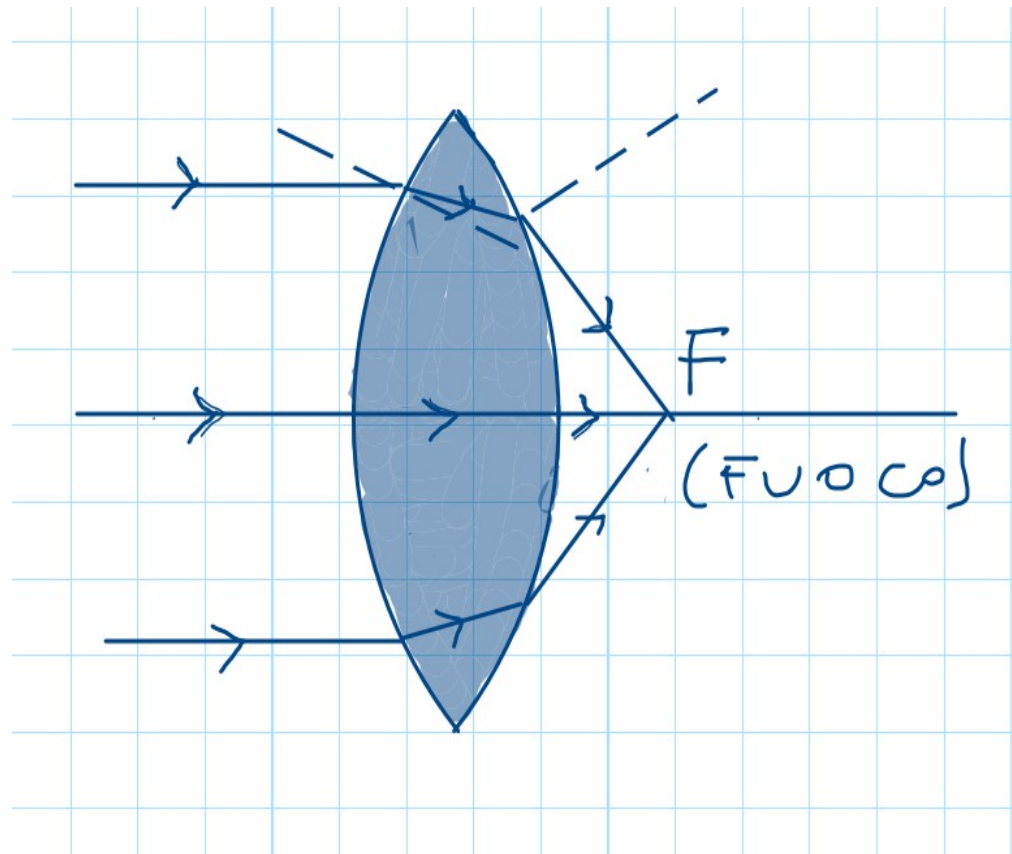
## La luce viaggia a velocità finita!



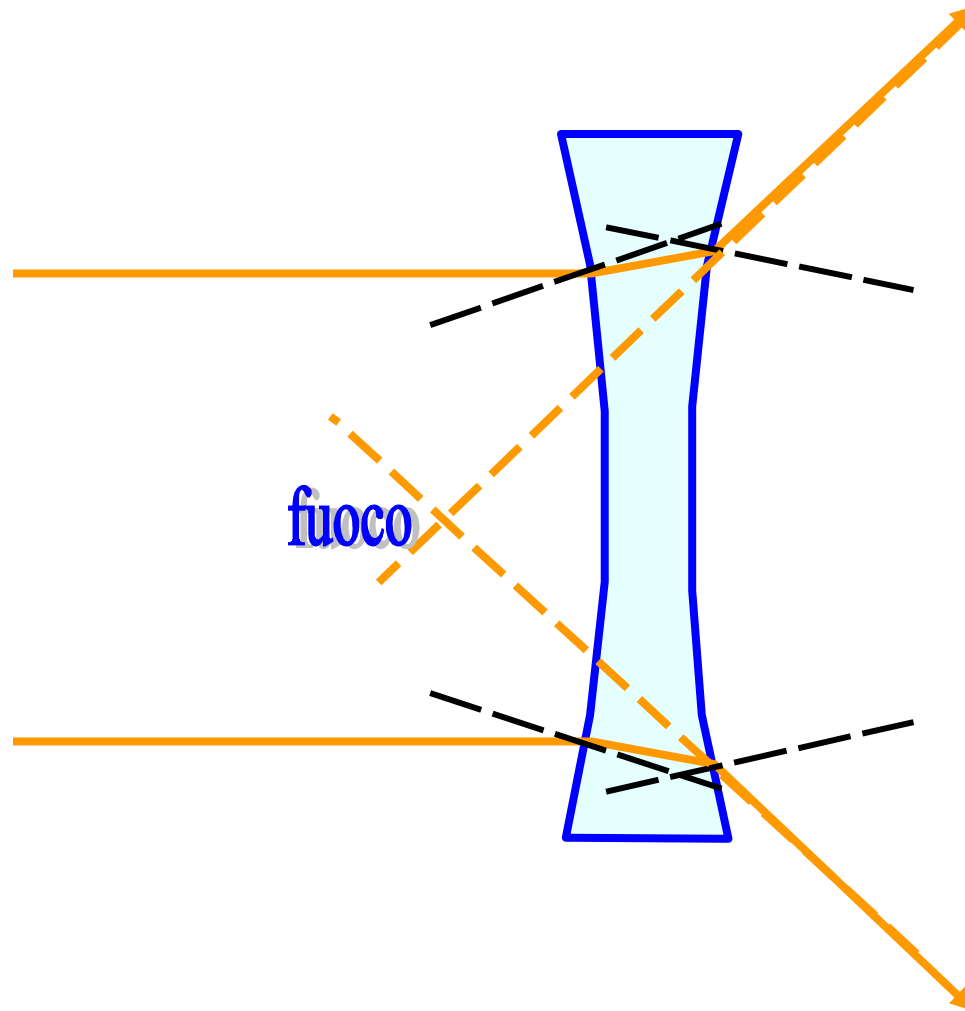
$$\Delta t = \frac{2d_{TS}}{c} \quad (\text{ritardo delle eclissi})$$

$$c = \frac{2d_{TS}}{\Delta t} \quad (\text{velocità della luce})$$

Focalizzazione dei raggi luminosi da una lente biconvessa spiegata mediante la legge della rifrazione (raggi paralleli all'asse della lente convergono nel fuoco in seguito ad una doppia rifrazione aria-vetro e vetro-aria).



Lente biconcava: i raggi luminosi paralleli all'asse della lente divergono in seguito ad una doppia rifrazione (aria-vetro e vetro-aria).



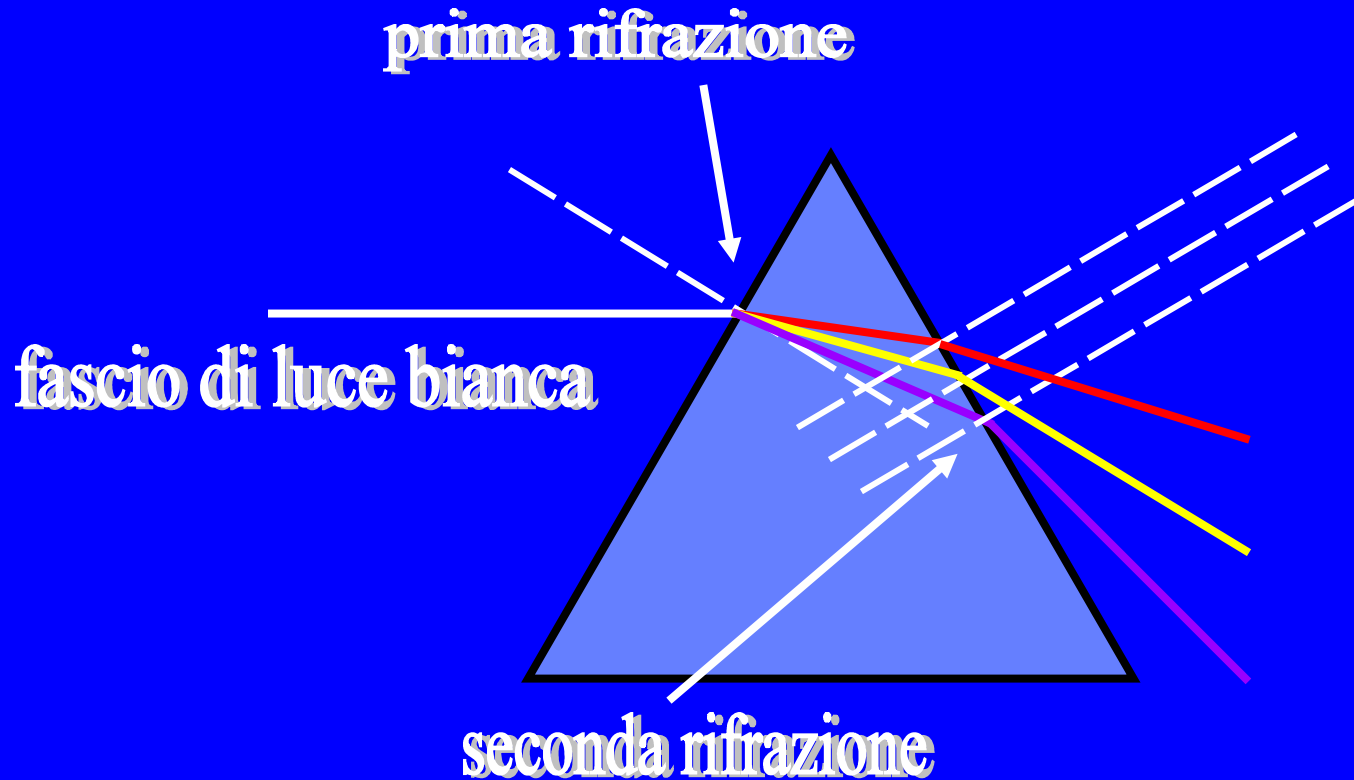
# **Il dibattito tra Newton e Hooke: la luce è fatta di corpuscoli o di onde?**

**1704: Newton scrive il trattato “Opticks”:**

- la natura della luce è corpuscolare : la sua propagazione si deve al fatto che i corpuscoli vengono messi in moto dalle vibrazioni dell’etere (in particolare la rifrazione si deve al fatto che i corpuscoli vengono accelerati quando entrano in un mezzo più denso)
- la luce bianca è la composizione della luce di tutti i colori dell’arcobaleno (scomposizione della luce solare con un prisma)

Newton teorizza inoltre la possibilità di realizzare telescopi che come obiettivo utilizzano non una lente ma uno specchio parabolico concavo (il telescopio Newton).

# Scomposizione della luce con un prisma

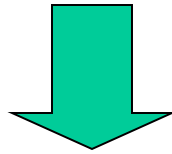


- P. Fermat (1662) introduce il “principio del tempo minimo”: la luce si propaga tra due punti seguendo il percorso corrispondente al minimo tempo di percorrenza.

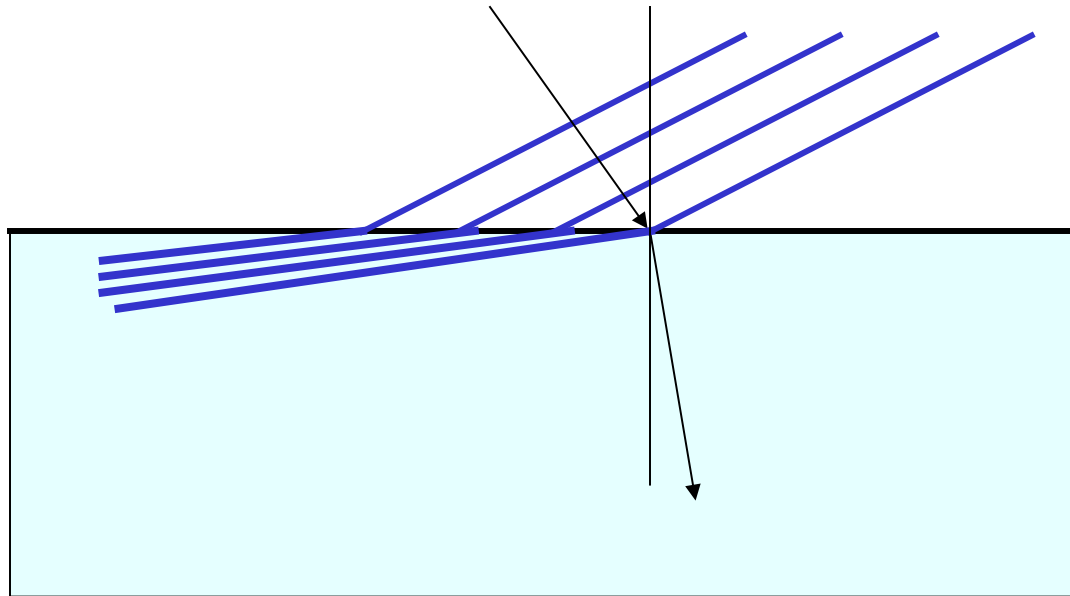
Ciò comporta che perché sia soddisfatta legge della rifrazione la velocità della luce nei mezzi più densi deve diminuire (contrariamente a quanto afferma Newton)

- Padre Grimaldi (Bologna 1665) osserva frange colorate ai lati dell'ombra di un filamento: il fenomeno della diffrazione della luce (deviazione del percorso della luce alle estremità di un ostacolo o di una sottile fenditura)

- Per Hooke la luce è dovuta soltanto alle vibrazioni dell'etere che si propagano nello spazio come onde (secondo le modalità definite dal principio di Huygens)

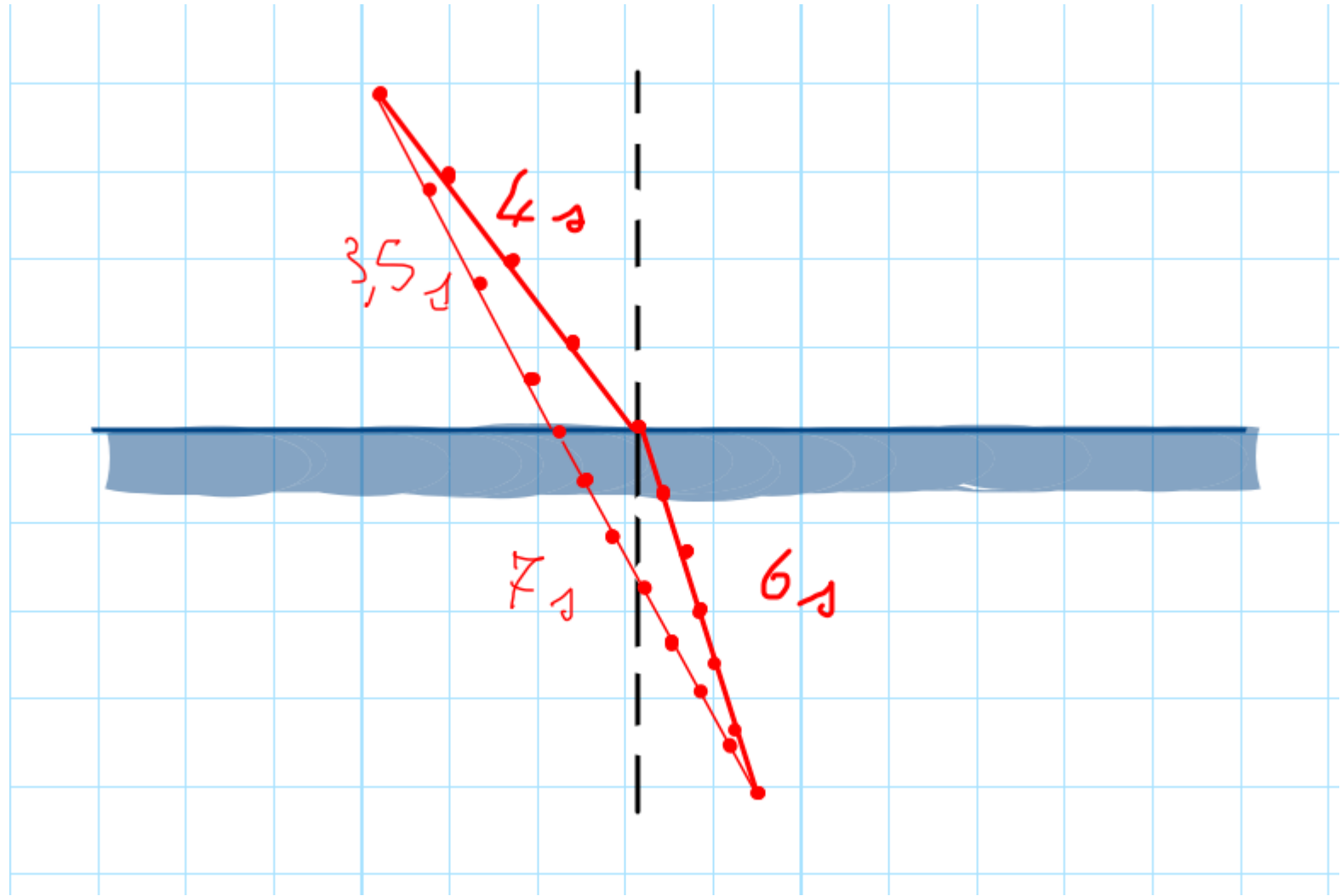


## Interpretazione ondulatoria della rifrazione



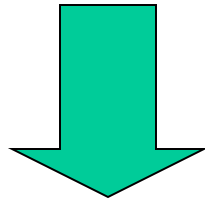
La velocità dell'onda diminuisce nel passaggio dal mezzo meno denso al mezzo più denso

La luce non si propaga lungo il percorso di minima lunghezza, ma segue il percorso di minima durata (principio del tempo di minimo di P. Fermat).



# La natura ondulatoria della luce e la sua scoperta

- 1801: R. Young presenta alla Royal Society un suo esperimento che mostra come due fasci di luce uscenti da due sottili fenditure si sommano su di uno schermo producendo una sequenza di frange chiare e scure: la figura di interferenza



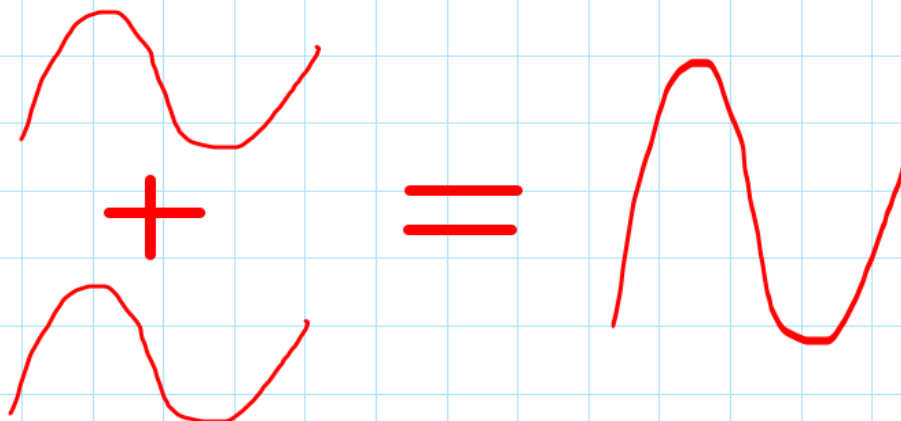
La luce non può essere fatta di corpuscoli, ma deve essere un fenomeno ondulatorio

# Come si sommano le onde: l'interferenza

Onde in fase



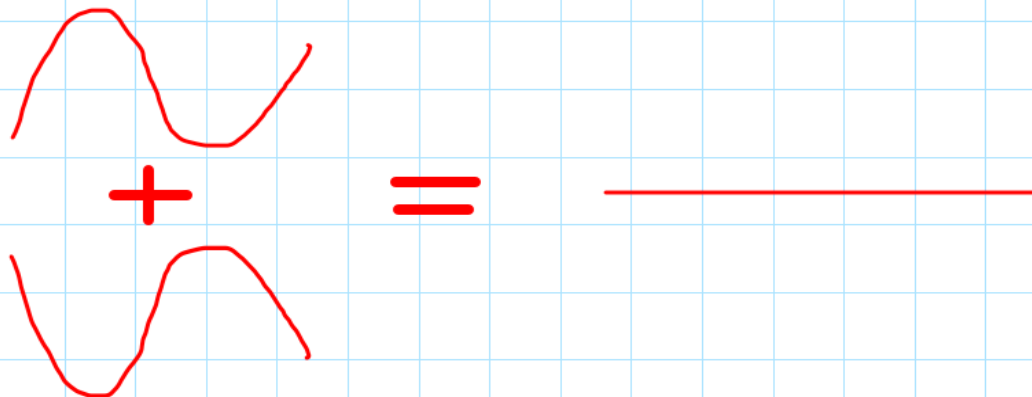
Interferenza  
costruttiva

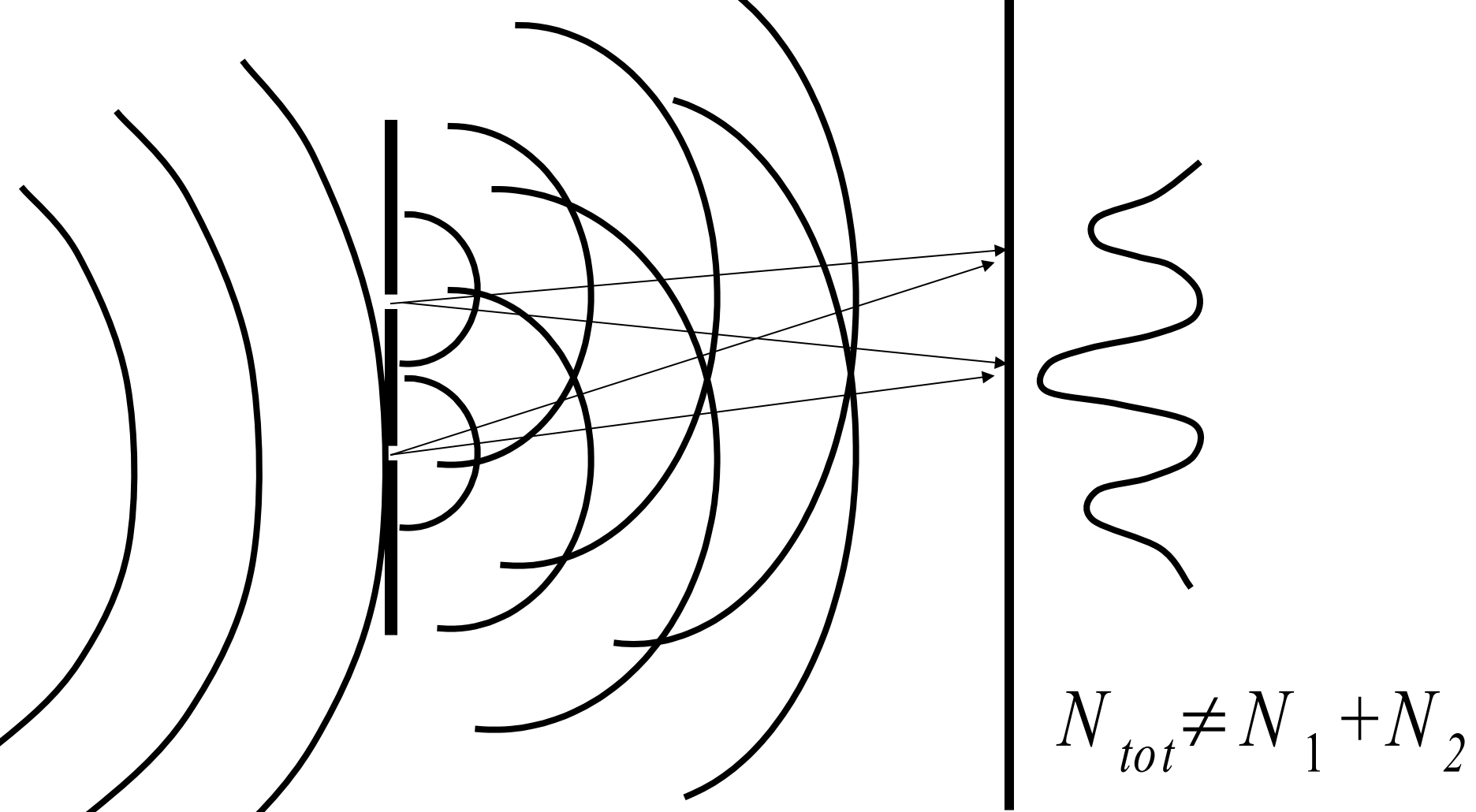


Onde in  
opposizione di  
fase

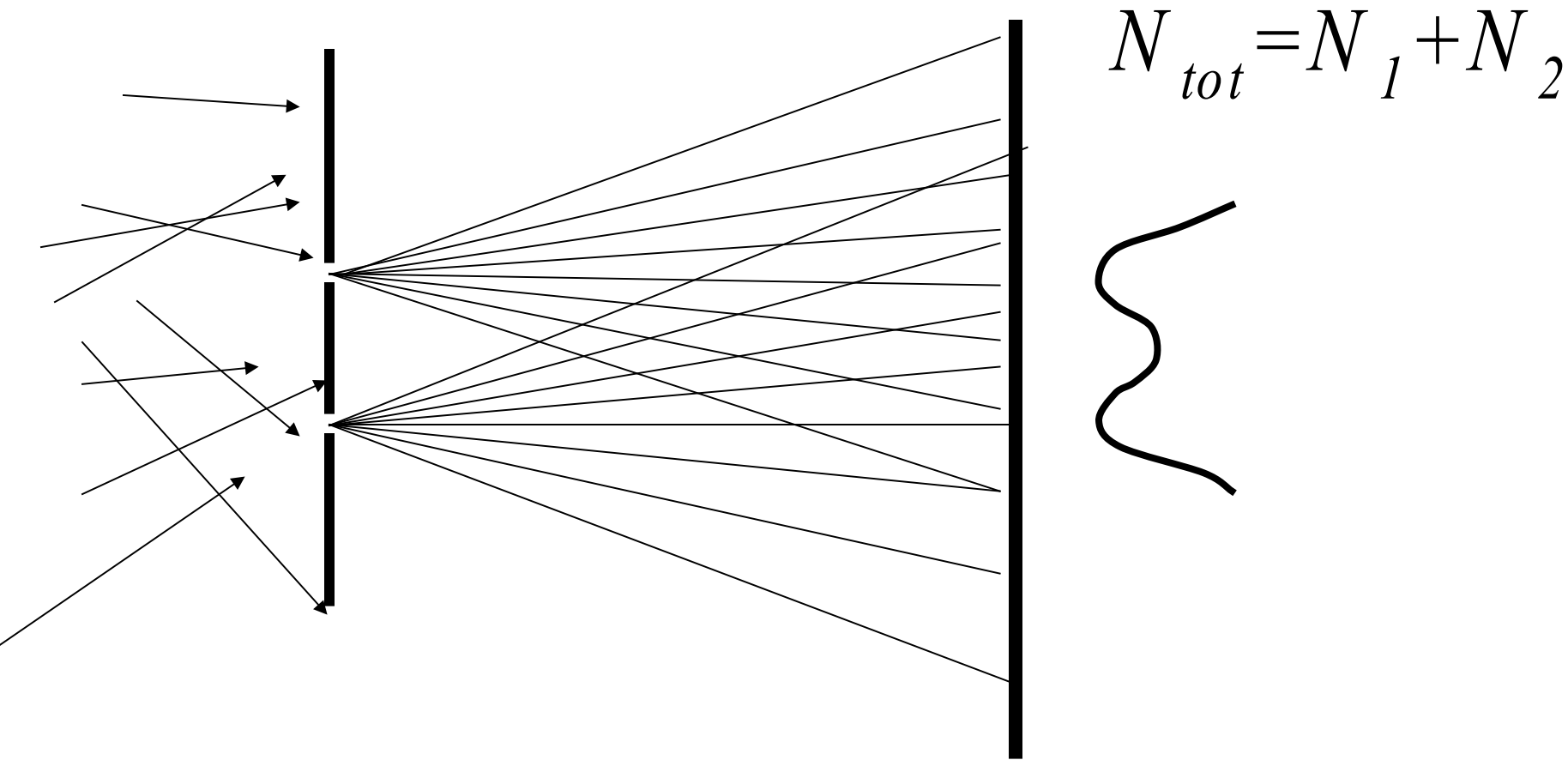


Interferenza  
distruttiva





La somma di 2 onde: l'interferenza  
sullo schermo si alternano punti in cui le onde si sommano  
in fase (interferenza costruttiva), e punti in cui le onde si  
sommano in opposizione di fase (interferenza distruttiva).

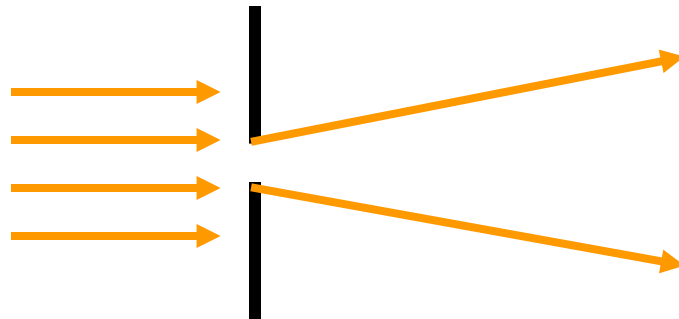


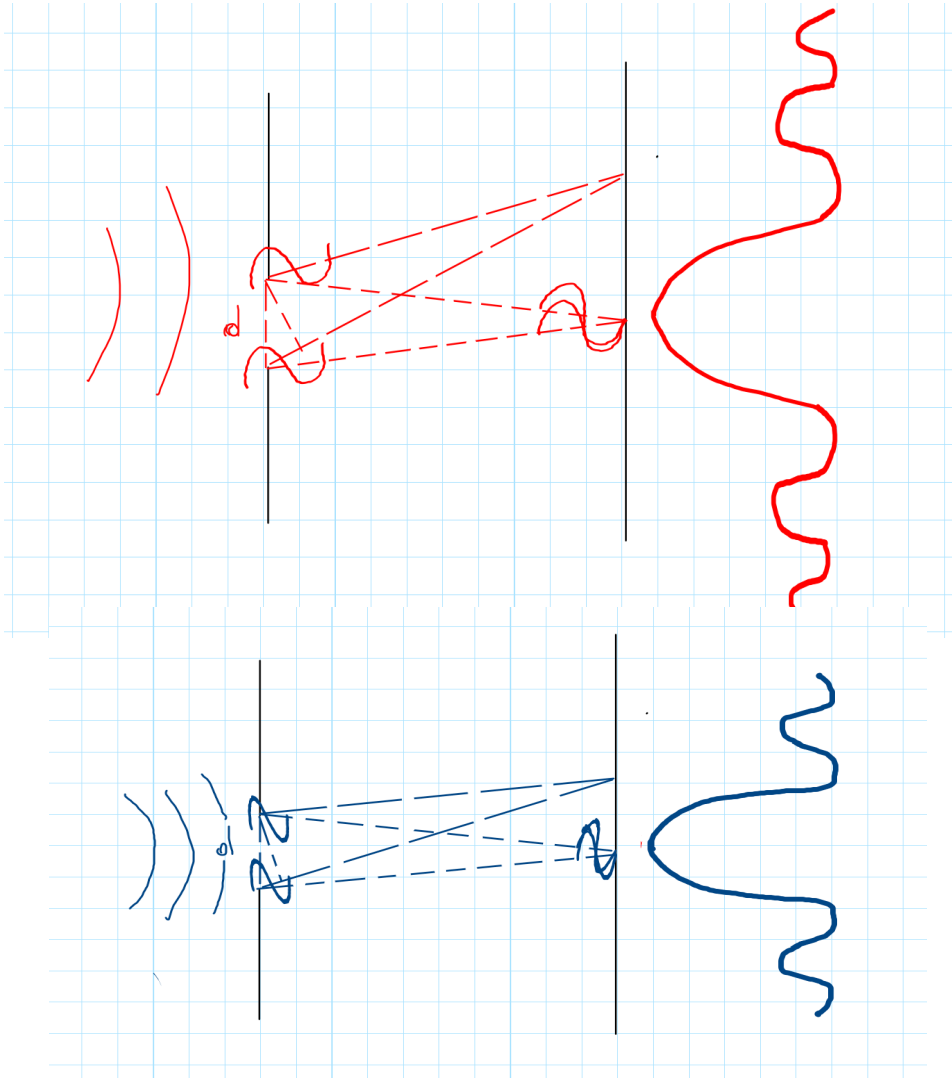
Somma di due fasci di corpuscoli: in ogni punto dello schermo si sommano i corpuscoli che arrivano dalle due fenditure.

•Fresnel e l'interpretazione ondulatoria della diffrazione:

una fenditura è un insieme continuo di sorgenti puntiformi di onde che si sommano (interferiscono) l'una con l'altra.

Il fatto che i punti del bordo della fenditura siano essi stessi sorgenti puntiformi spiega perché una fenditura irraggiata da un fascio di luce ben collimato (in una unica direzione ben definita) lascia passare invece un fascio con una certa apertura angolare  $\theta$





Il massimo centrale (la frangia più grande e luminosa) è in direzione  $\theta = 0$ .

$$d \sin \theta = \left( 2n + 1 \right) \frac{\lambda}{2}$$

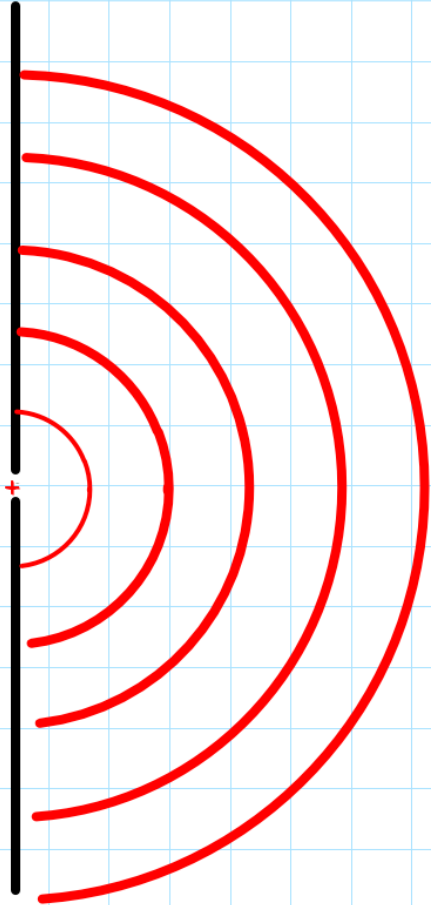
Posizioni dei massimi di ordine superiore al primo (cioè delle frange luminose laterali)

$$d \operatorname{sen} \theta = n\lambda$$

Relazione che definisce le direzioni dalla fenditura alle frange scure (interferenze distruttive) sullo schermo

$$\theta \approx \operatorname{sen} \theta = \frac{\lambda}{d}$$

Relazione che definisce la semilarghezza angolare del massimo centrale e la distanza angolare tra due frange scure successive e tra due frange luminose laterali successive (massimi di diffrazione secondari) sullo schermo.



SE LA LARGHEZZA DELLA  
FENDITURA È

$$d \approx \lambda \quad \text{LA}$$

SEMILARGHEZZA DEL

MASSIMO PRINCIPALE

$$\text{È} \quad \sin \theta \approx 1$$

$$\theta \approx \frac{\pi}{2}$$



LA FENDITURA GENERA  
UN'ONDA SECONDARIA

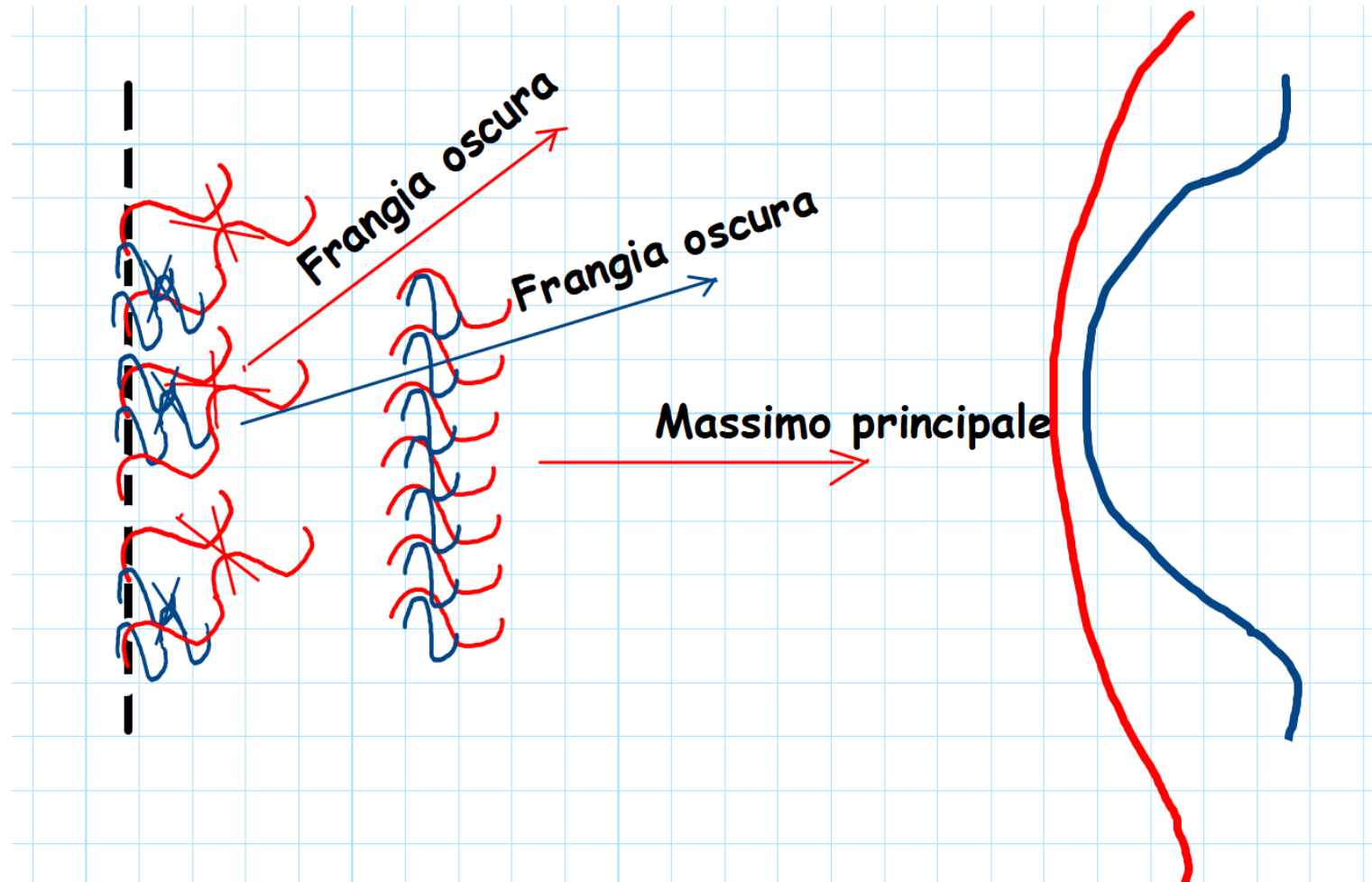
- La diffrazione dipende dalla lunghezza d'onda:

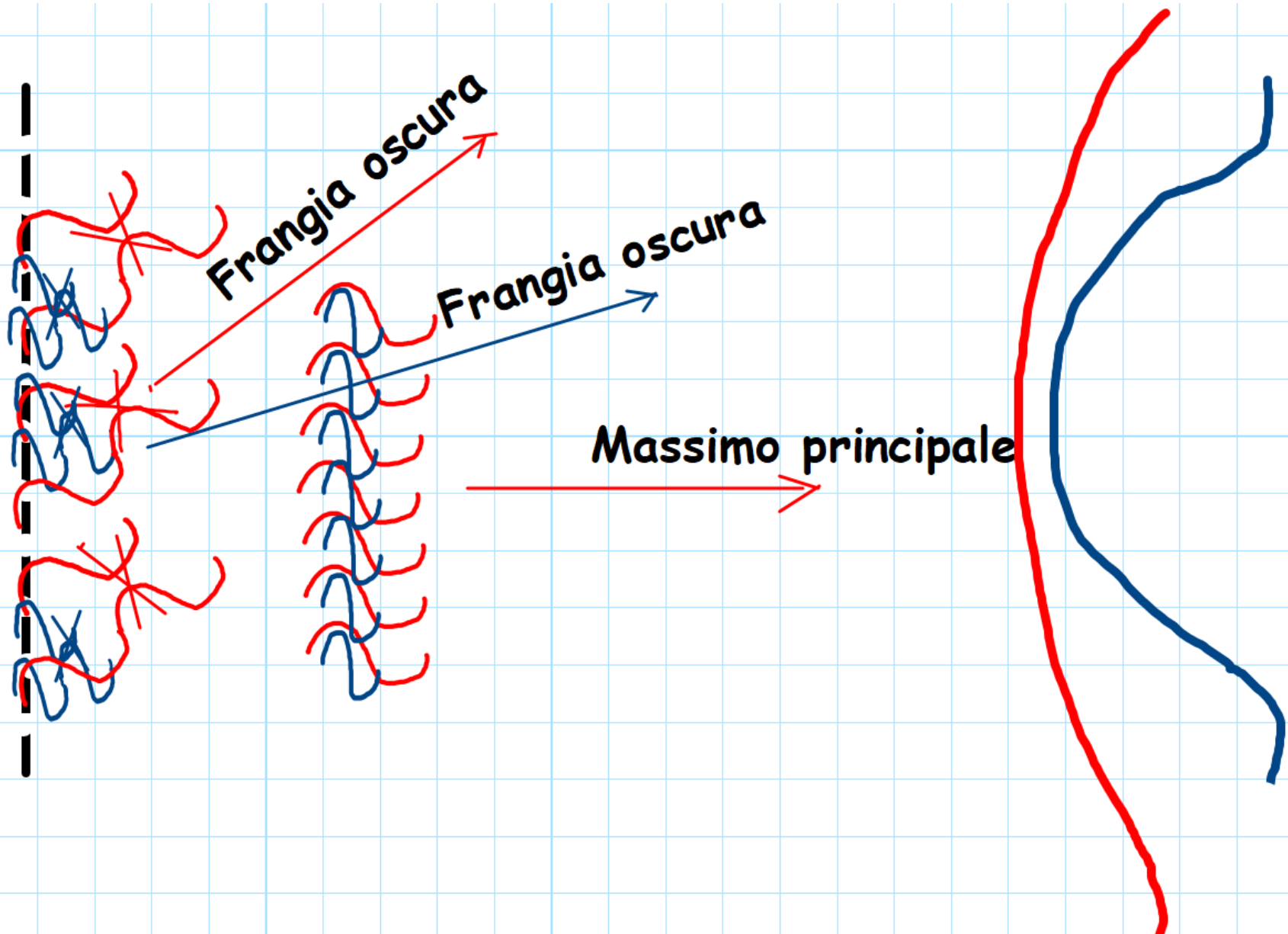
La distanza tra le frange luminose cresce con il crescere della lunghezza d'onda: i massimi principali sono tutti sovrapposti, ma le frange laterali (i massimi di ordine superiore) dei vari colori sono separate



In tal modo con la diffrazione si potrebbe ottenere lo spettro di una sorgente luminosa: ma quando quest'ultima è debole la luce che passa attraverso la fenditura è poca e se è molto diffratta non si vede un ben niente. Per questo si usa il ...

# Reticolo di diffrazione

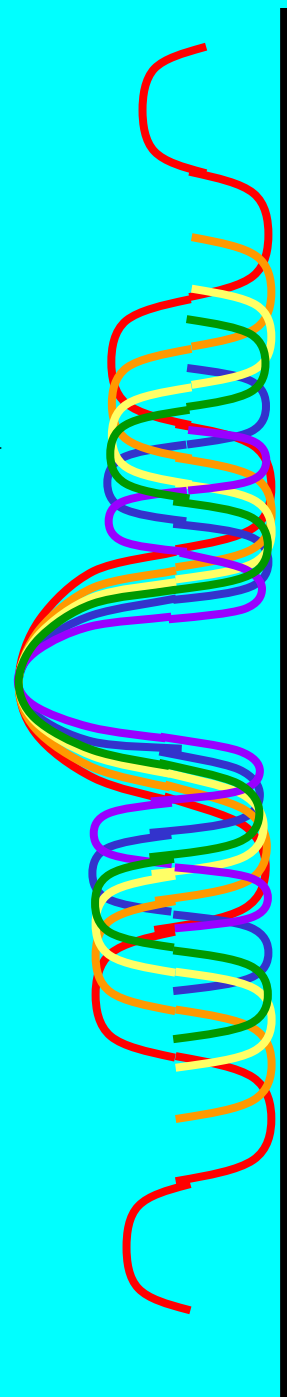




frange colorate  
(massimi secondari separati)



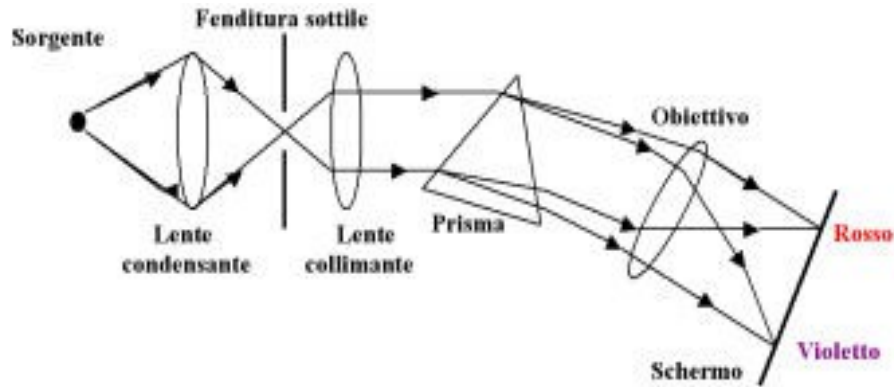
massimo centrale  
(bianco al centro, arancione e rosso all'esterno)



## Il reticolo di diffrazione può essere

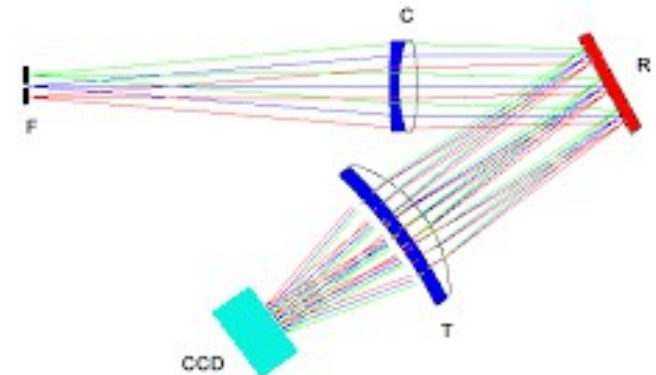
- A trasmissione (microfenditure per cui passa la luce o microsolchi) in una pellicola trasparente
- A riflessione (microsolchi in una superficie riflettente, come nei CD e nei DVD).

# Schemi ottici di spettroscopi

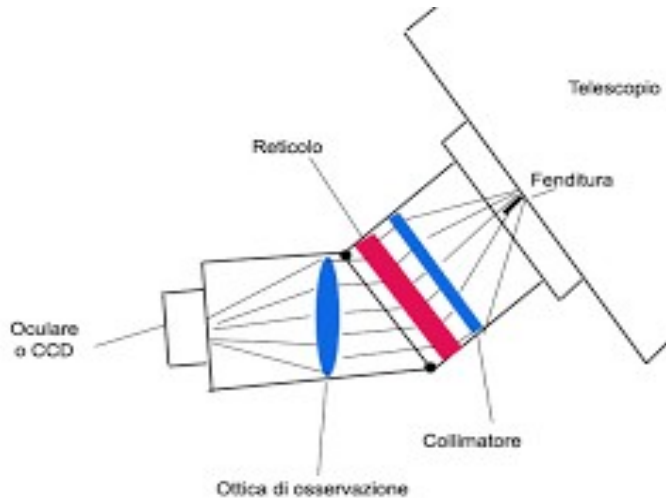


A prisma

A reticolo a riflessione



F: Fenditura  
C: Collimatore  
R: Reticolo  
T: Ottica di osservazione o della camera

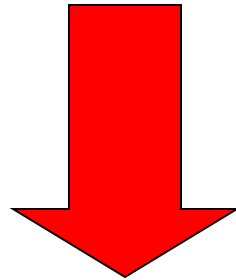


A reticolo a trasmissione

## Gli spettri luminosi

- 1814: J. Fraunhofer scopre righe scure sullo spettro del Sole
- 1846: G. Kirchoff e R. Bunsen classificano gli spettri luminosi in tre categorie: spettri a righe di emissione (prodotto da gas fluorescente), spettri continui ( da sorgenti solide o liquide incandescenti) e spettri a righe di assorbimento (sorgenti incandescenti avvolte in una tenue atmosfera gassosa)

1859: J.C. Maxwell pubblica un sistema di equazioni che descrive i fenomeni elettromagnetici

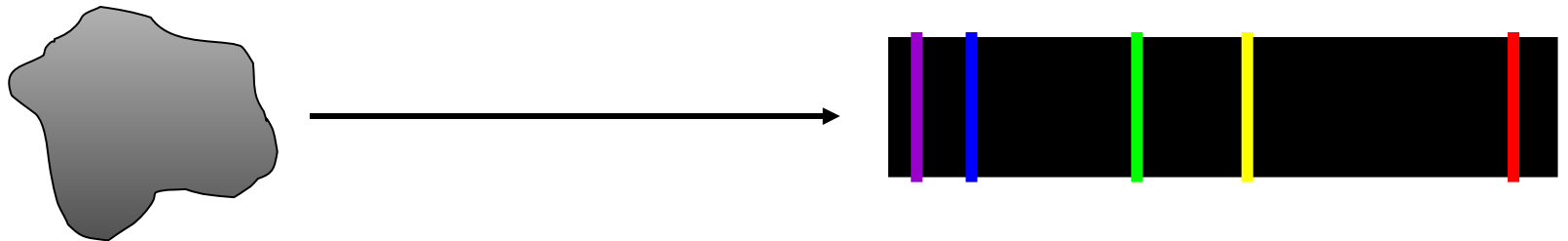


La luce è fatta di onde elettromagnetiche (campi elettrici e magnetici oscillanti)

Spettro a righe di emissione: righe colorate staccate, su fondo nero



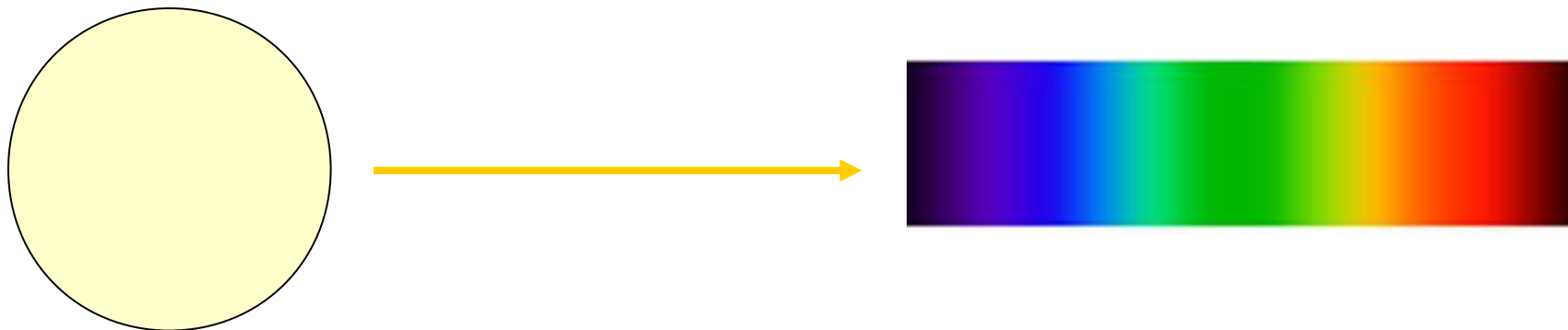
Causa fisica: gas o vapore riscaldato (luce a fluorescenza)



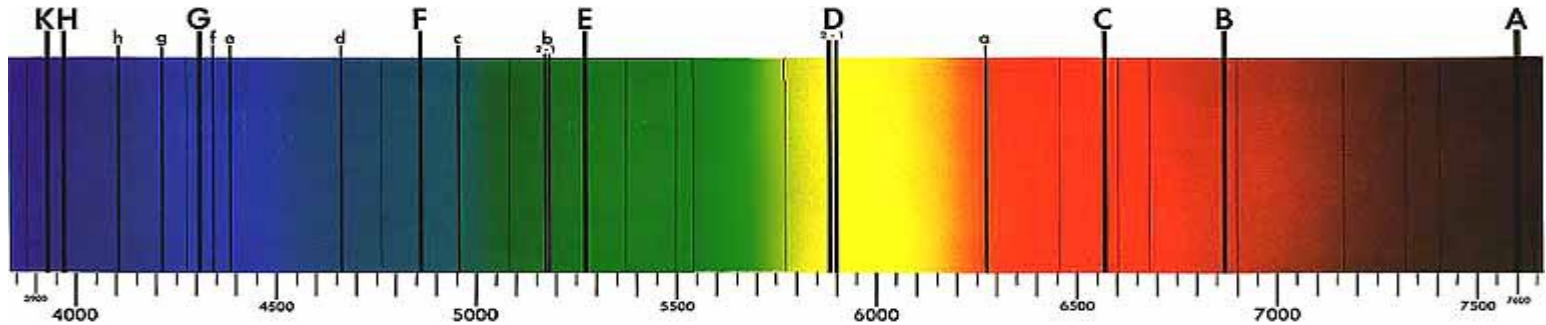
Spettro continuo: tutti i colori dell'iride in sequenza l'uno sfumato nell'altro



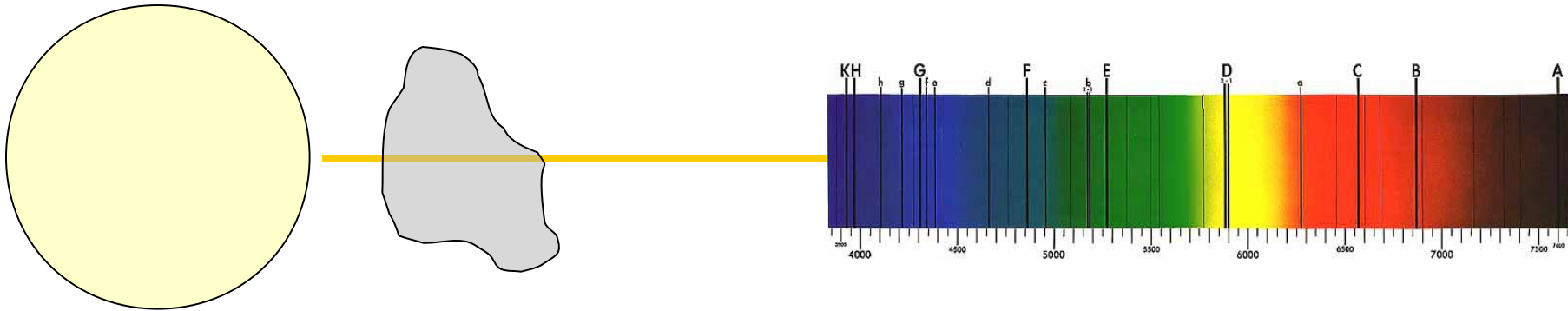
Causa fisica: corpi incandescenti (luce a incandescenza)



Spettro di assorbimento: spettro continuo con righe scure longitudinali sovrapposte



Causa fisica: corpo incandescente con gas o vapore più freddi frapposti tra sorgente e osservatore



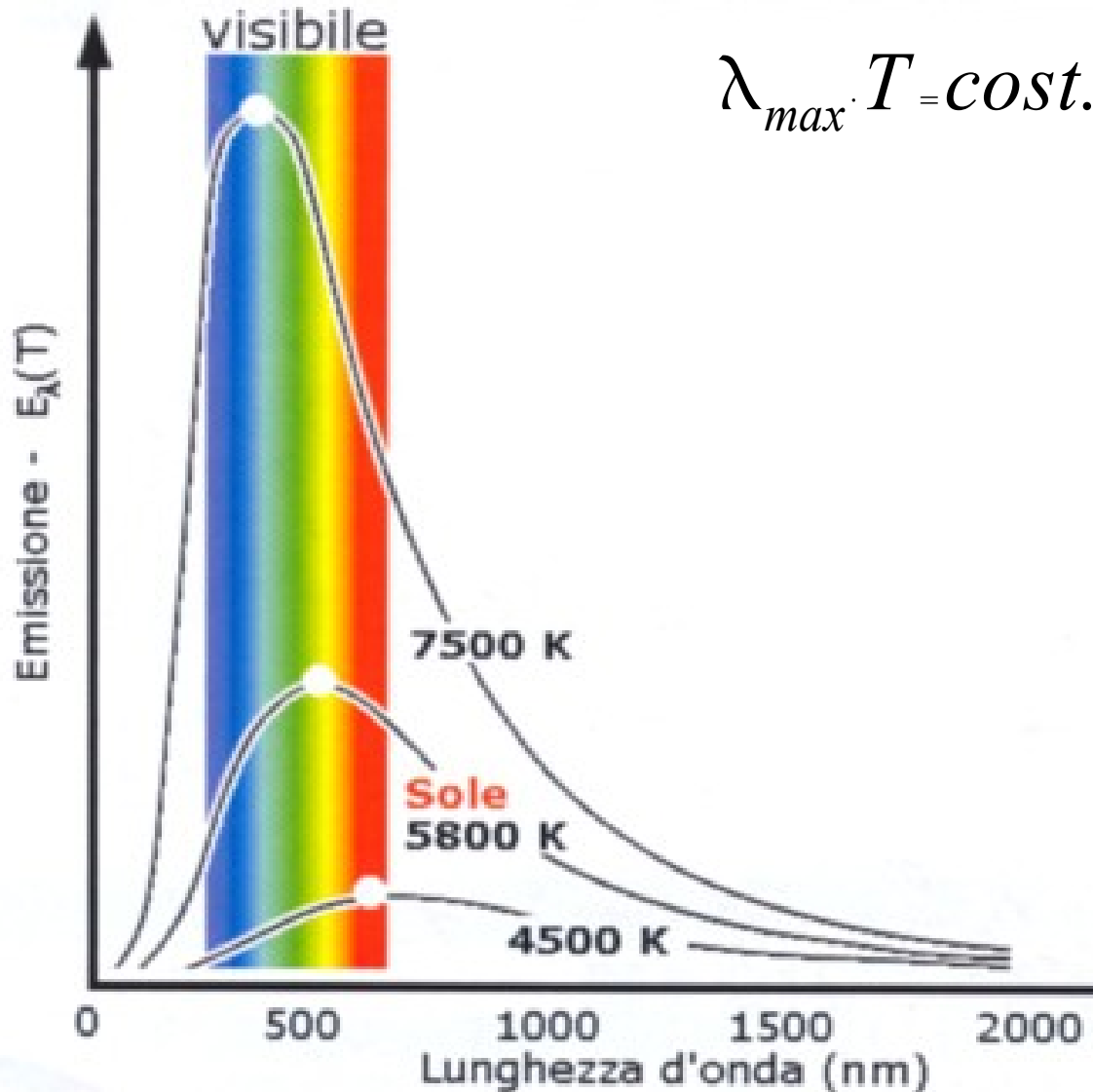
# Informazioni fisiche che provengono dagli spettri luminosi

Spettro (definizione quantitativa): distribuzione della radiazione in lunghezza d'onda, descrivibile matematicamente come l'intensità luminosa espressa in funzione della lunghezza d'onda (che si può rappresentare con un diagramma cartesiano con la lunghezza d'onda in ascissa e l'intensità luminosa in ordinata).

Ad esempio lo spettro continuo viene descritto matematicamente dalla seguente curva:

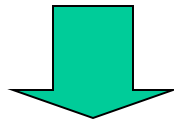
# Legge di Wien

$$\lambda_{max} \cdot T = cost.$$



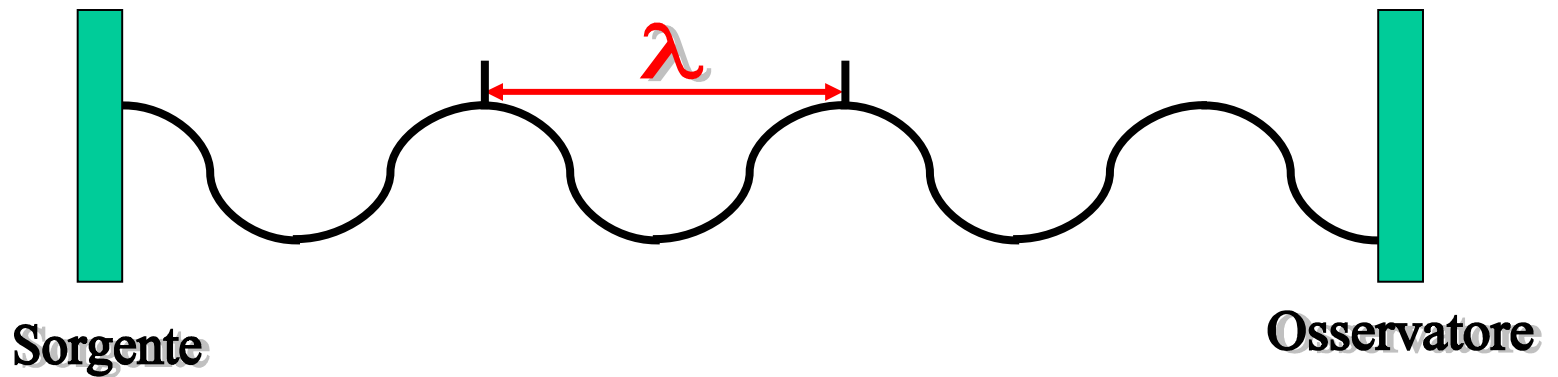
- Dallo spettro continuo si può ricavare la temperatura superficiale della sorgente incandescente (ad esempio la  $T$  superficiale di una stella)

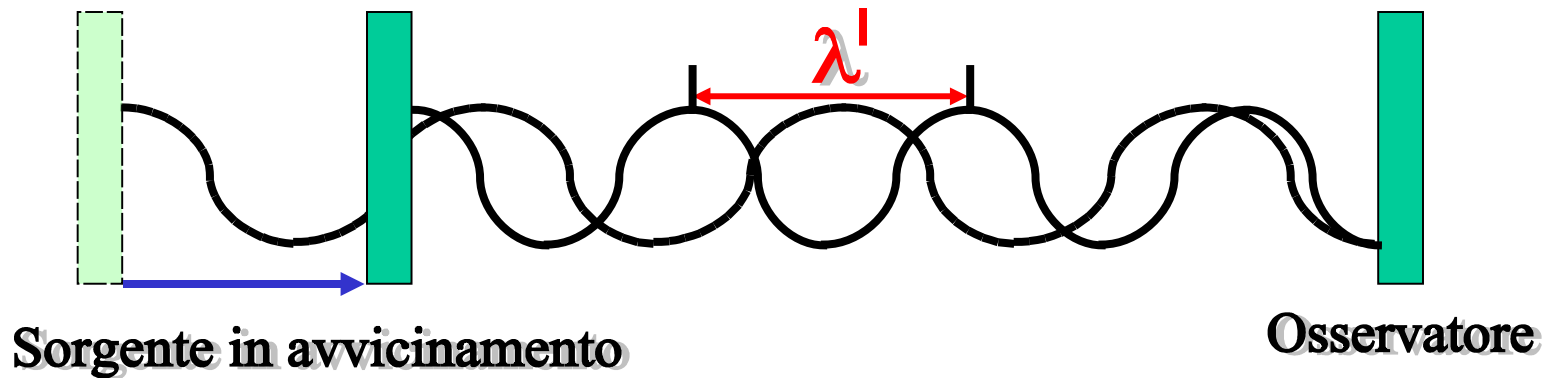
Per quanto riguarda gli spettri a righe, Kirchoff e Bunsen (ed i loro successori “spettroscopisti”) scoprirono che ogni elemento chimico emette o assorbe una ben precisa sequenza di righe.



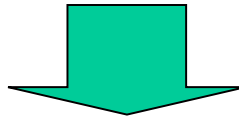
- Dagli spettri a righe si può ricavare la composizione chimica del gas che assorbe e che emette

In base all'interpretazione ondulatoria della luce, a ogni colore corrisponde una data lunghezza d'onda (la minima è  $0,3 \mu\text{m}$ , corrispondente al violetto, la massima è  $0,8 \mu\text{m}$ , corrispondente al rosso):





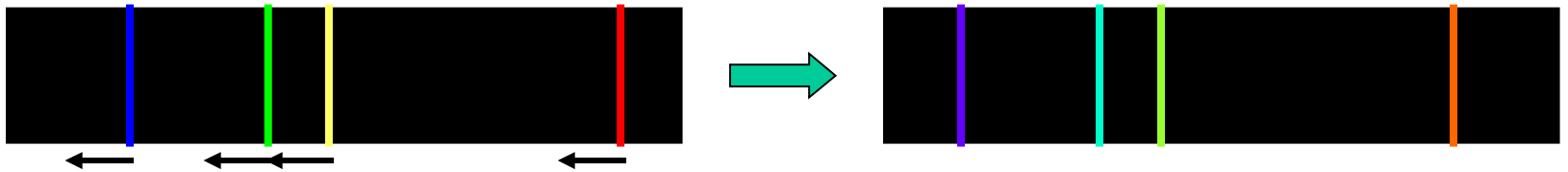
Se la sorgente si avvicina la lunghezza d'onda risulta minore rispetto a quella osservata nel caso in cui la sorgente sia in quiete ( $\lambda' < \lambda$ )



Se le righe di emissione o di assorbimento di una sorgente luminosa risultano spostate verso il blu (“blueshift”) ciò indica che la sorgente si sta avvicinando a noi.

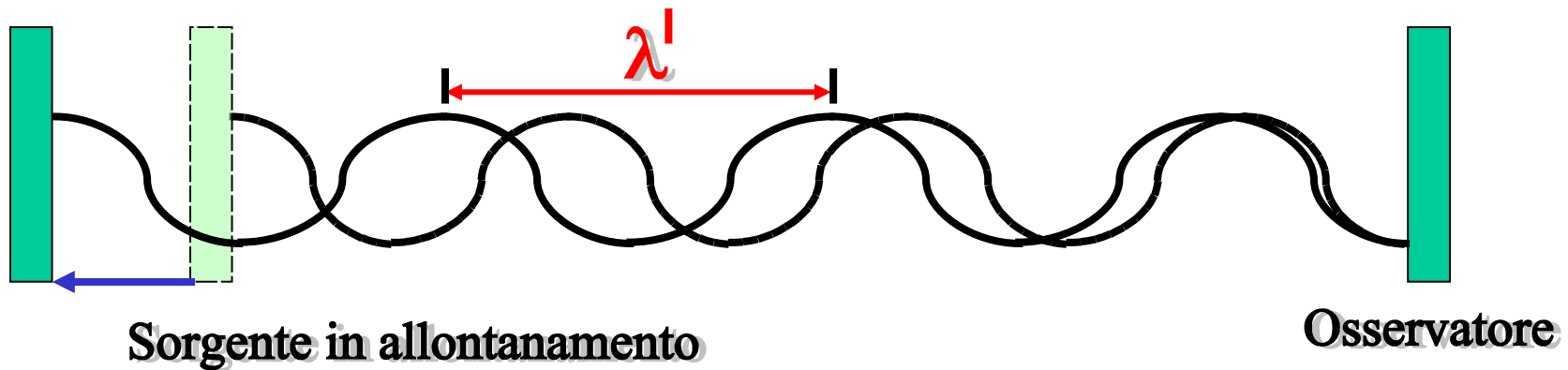
# Blueshift

In emissione:

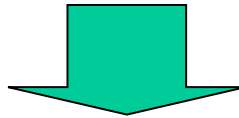


In assorbimento:





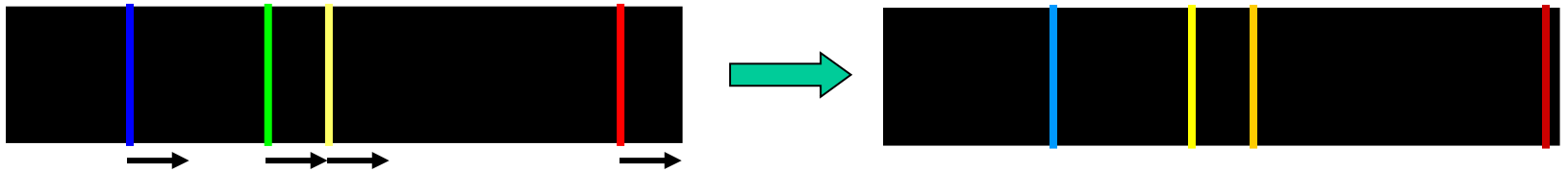
Se la sorgente si avvicina la lunghezza d'onda risulta maggiore rispetto a quella osservata nel caso in cui la sorgente sia in quiete ( $\lambda' > \lambda$ )



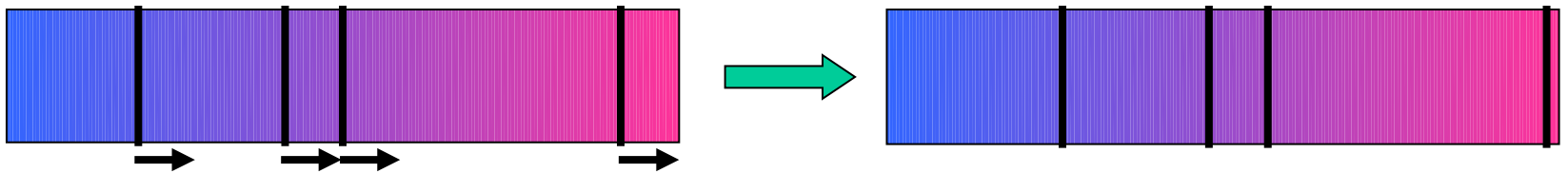
Se le righe di emissione o di assorbimento di una sorgente luminosa risultano spostate verso il rosso (“redshift”) ciò indica che la sorgente si sta allontanando da noi.

# Redshift

In emissione:



In assorbimento:



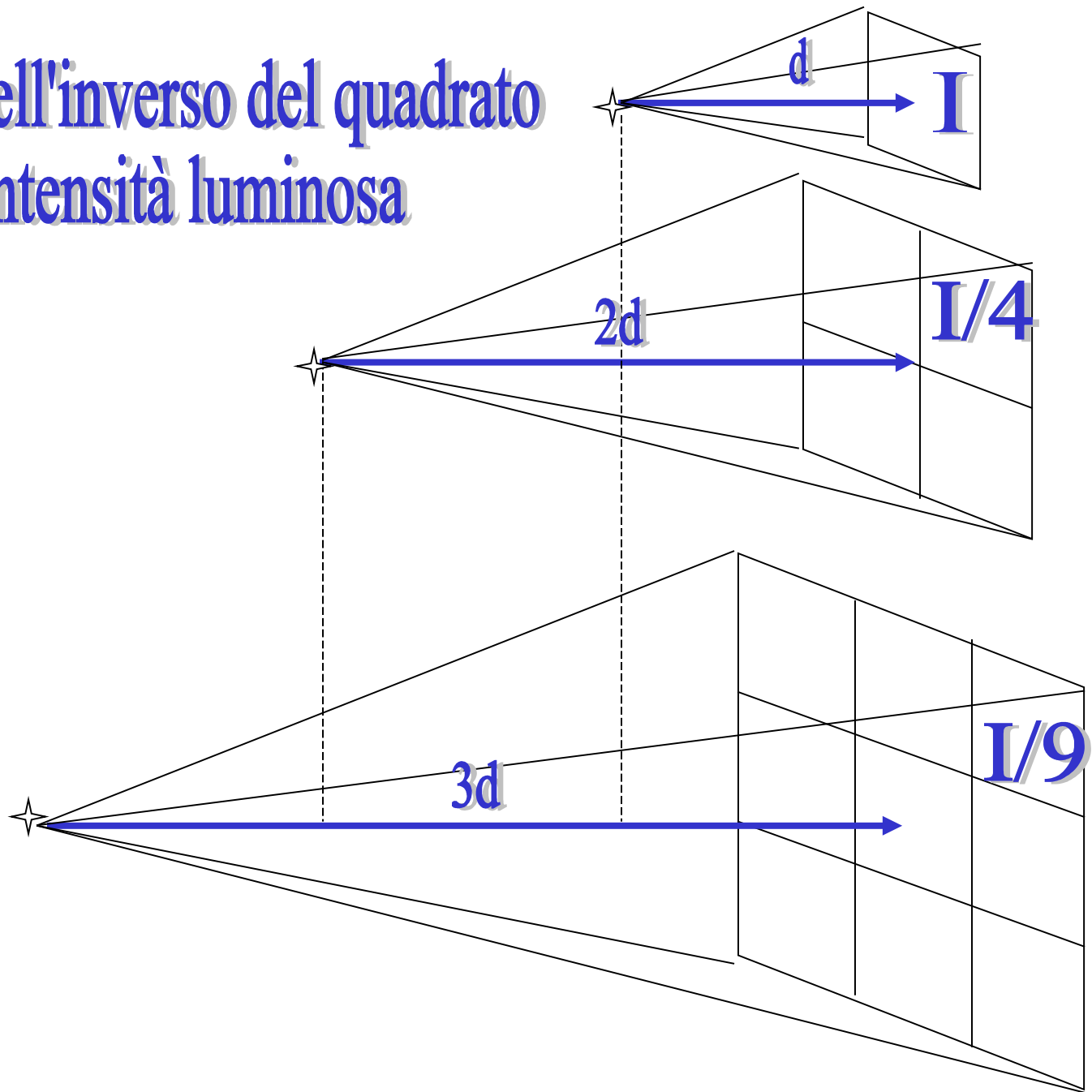
Ricapitolando, gli spettri luminosi consentono di ottenere:

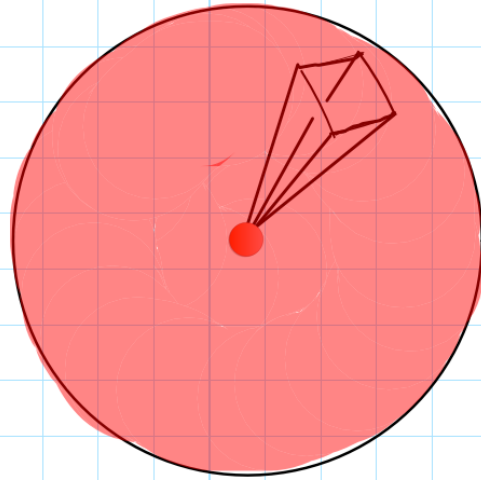
- le temperature fotosferiche delle stelle
- la composizione chimica della materia delle stelle e delle galassie
- Le condizioni fisiche densità e pressione
- la velocità di avvicinamento o allontanamento di stelle e/o galassie rispetto a noi.,

Detto così sembra tutto facile ... ma si dà il caso che la Scienza da Galileo in poi sia quantitativa ...

Quindi il primo problema che ci dobbiamo porre per ricavare elementi di conoscenza delle stelle dalla luce che ci arriva è misurarla, e per prima cosa vediamo come si esprimono le grandezze coinvolte e le loro unità di misura.

# La legge dell'inverso del quadrato dell'intensità luminosa

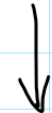




LUMINOSITÀ



$$I = \frac{L}{4\pi d^2}$$



FLUSSO  
LUMINOSO

$$L = \frac{\text{ENERGIA EMESSA}}{\text{TEMPO}}$$

$$I = \frac{\text{ENERGIA EMESSA}}{\text{TEMPO} \times \text{SUPERFICIE}}$$

M = magnitudine assoluta (legata alla luminosità)

m = magnitudine apparente (legata al flusso e  
misurata con i fotometri)

$$m = -2,5 \log \left( \frac{I}{I_0} \right)$$

$$M = -2,5 \log \left( \frac{I_{10}}{I_0} \right)$$

$I_0$  = FLUSSO A MAGNITUDINE 0 (STELLA  
D' RIFERIMENTO)

$I_{10}$  = FLUSSO LUMINOSO DELLA STELLA  
PORTATA A 10 pc DI DISTANZA.

# Relazione tra $M$ , $m$ e la distanza $d$

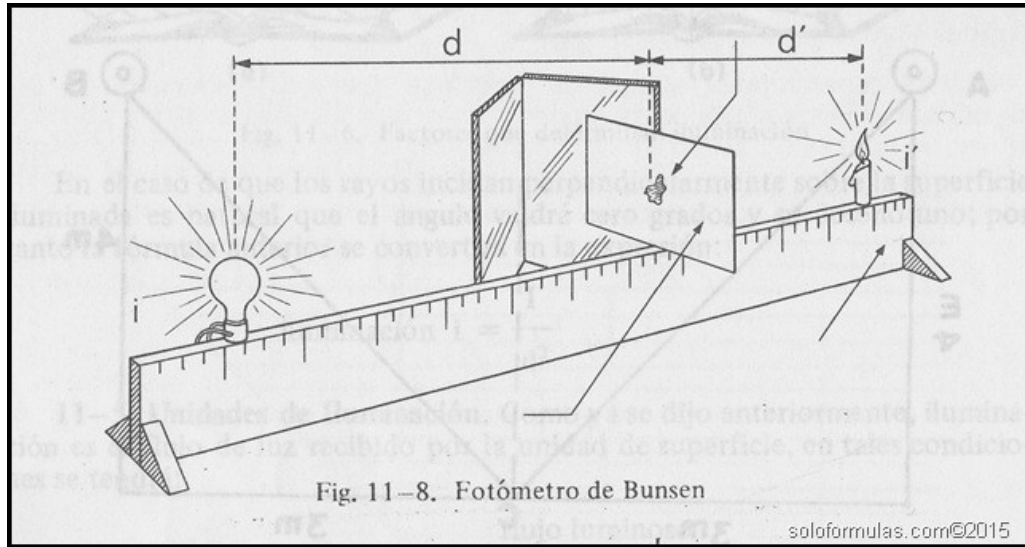
FORMULA DI POGSON

(LEGGE DELL'INVERSO DEL QUADRATO)  
IN SCALA LOGARITMICA

$$M - m = 5 - 5 \log d$$

# Come contare la luce

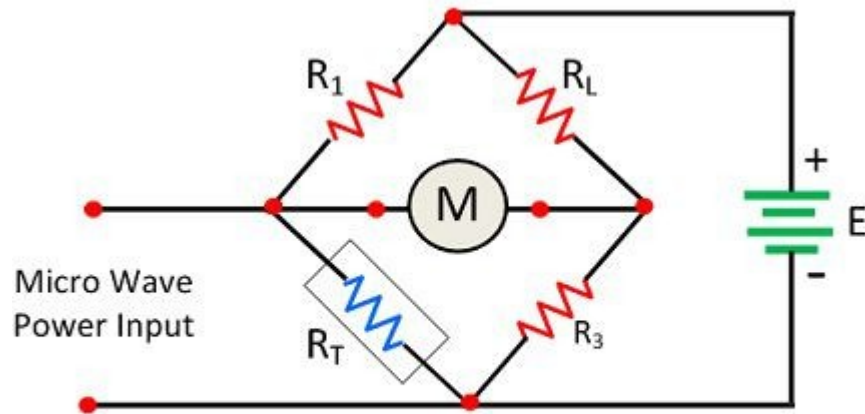
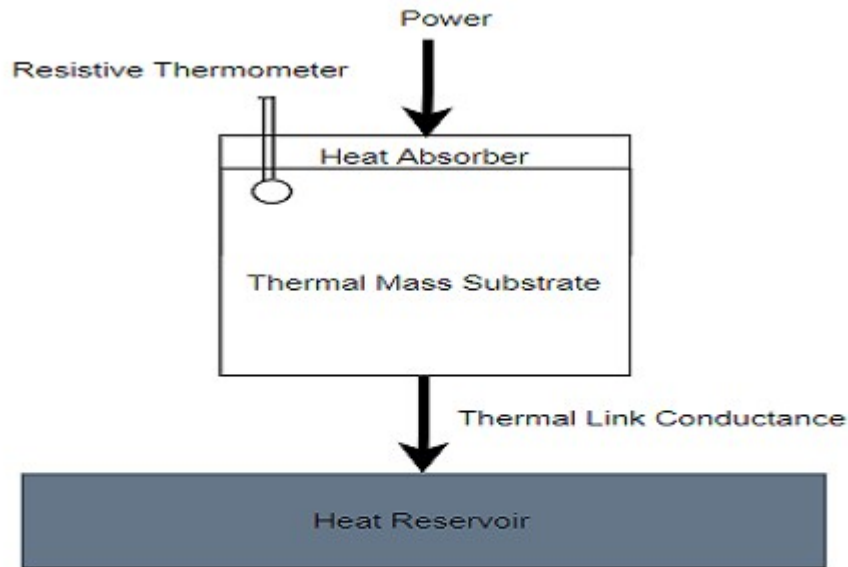
- Metodi ottici visuali e fotografici (per confronto con una sorgente nota tarata)
- Metodi termoelettrici: il bolometro
- Metodi fotoelettrici (utilizzando l'effetto fotoelettrico di A. Einstein)



Fotometro di  
Bunsen (e  
derivati)



Fotometro a  
cuneo di  
Töpfer



Basic Bolometer Bridge Circuit

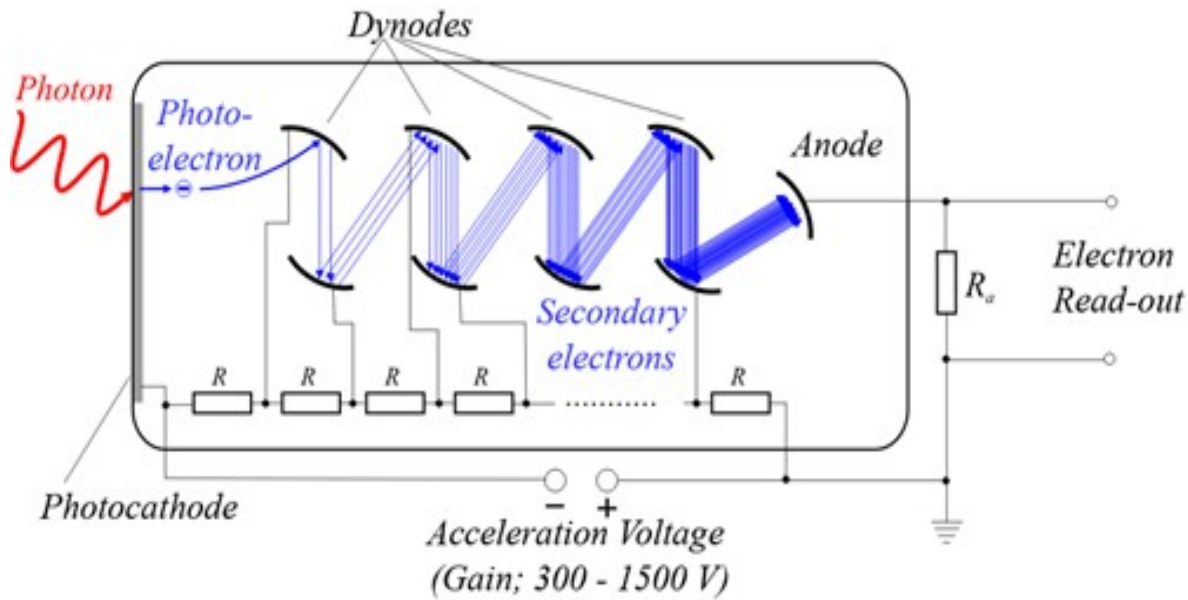
Circuit Globe

Il Bolometro di Langley (1880) riceve energia dalla luce trasformata in calore da un osservatore collegato a una riserva termica (una spirale di fili di Platino ricoperti di nerofumo). Collegato ad una resistenza inserita in un ponte di Weathstone, la riscalda quel tanto che basta da cambiarne la resistività producendo una minuscola corrente elettrica nel ramo centrale (M).



Bolometro a ragnatela: utilizzato nella misura della radiazione cosmica di fondo (usa termoresistenze a semiconduttore). L'esperimento BOOMERanG (acronimo inglese di Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics).

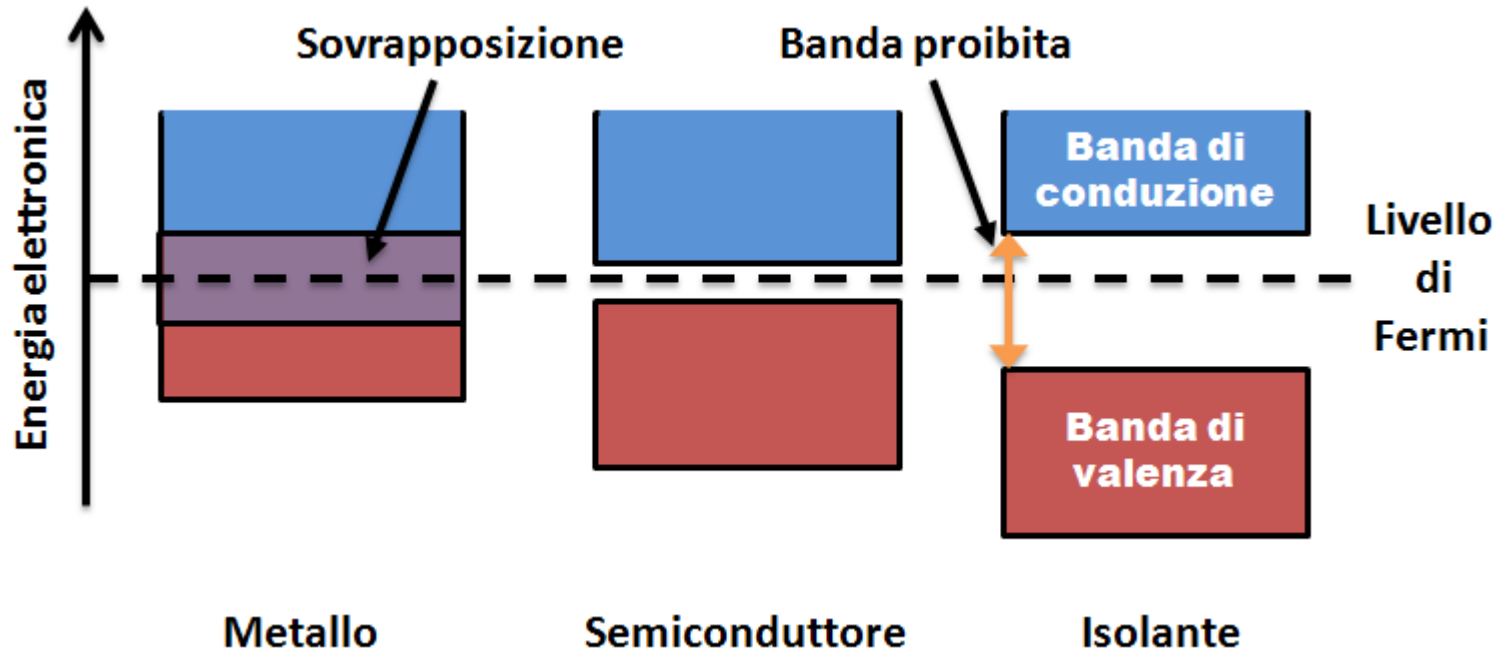
Esperimento che ha misurato la radiazione cosmica di fondo di una porzione dello spazio, tramite tre voli sub-orbitali di un pallone di alta quota. È stato il primo esperimento in grado di fornire un'immagine ad alta definizione delle anisotropie della temperatura della radiazione cosmica di fondo.



Schema di un **fotomoltiplicatore**: il debole impulso elettrico prodotto da un fotone viene amplificato “a cascata” mediante una serie di differenze di potenziale in serie tra gli elettrodi intermedi (dinodi)

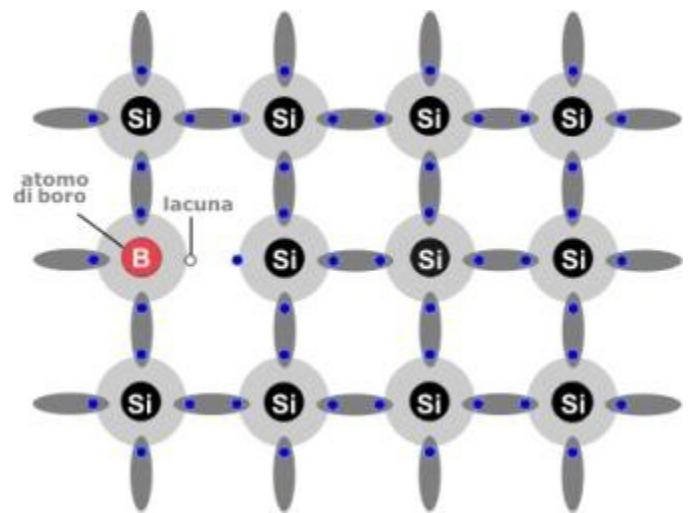
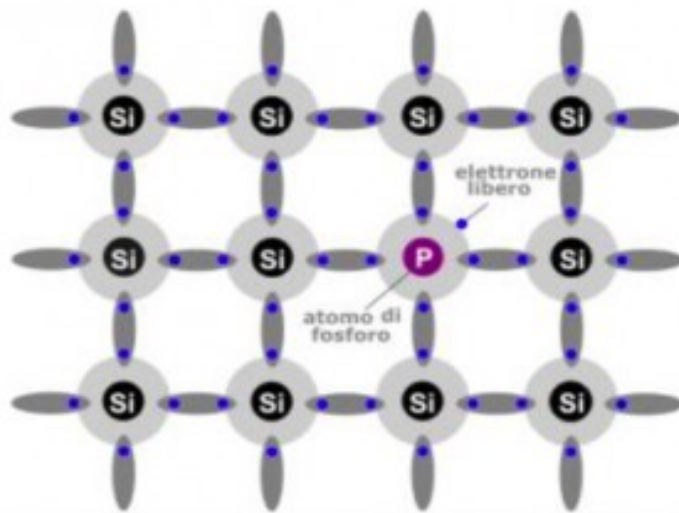


# Fotometria a semiconduttori



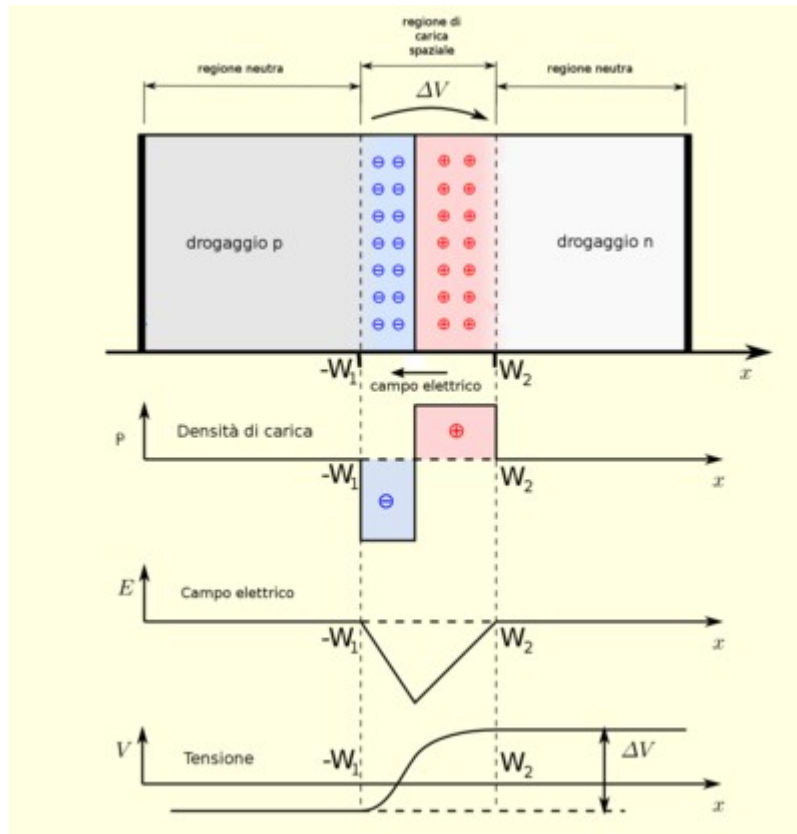
Che cos'è un semiconduttore: lo schema mostra che nel semiconduttore la banda di valenza (elettroni “prigionieri” degli ioni del cristallo) è separata da quella di conduzione (elettroni condivisi dalla struttura cristallina) da un “fosso” energetico  $\leq 1$  eV. Pertanto basta che assorbano un po' di energia per diventare conduttori.

# Giunzione a semiconduttori: il diodo e il transistor



Semiconduttore di tipo n: silicio o germanio (valenza IV) con impurità al fosforo (valenza V), quindi con un elettrone in eccesso nella struttura cristallina

Semiconduttore di tipo p: silicio o germanio (valenza IV) con impurità al boro (valenza III), quindi con un elettrone in difetto nella struttura cristallina



Quando p ed n vengono messi a contatto, si forma una giunzione: gli elettroni tendono a trasferirsi da n (dove sono maggioritari rispetto alle lacune) a p (dove sono in minoranza rispetto alle lacune) formando quindi una regione di carica spaziale. Si può collegare la giunzione a un circuito secondo due schemi base.



**La corrente non attraversa la giunzione**

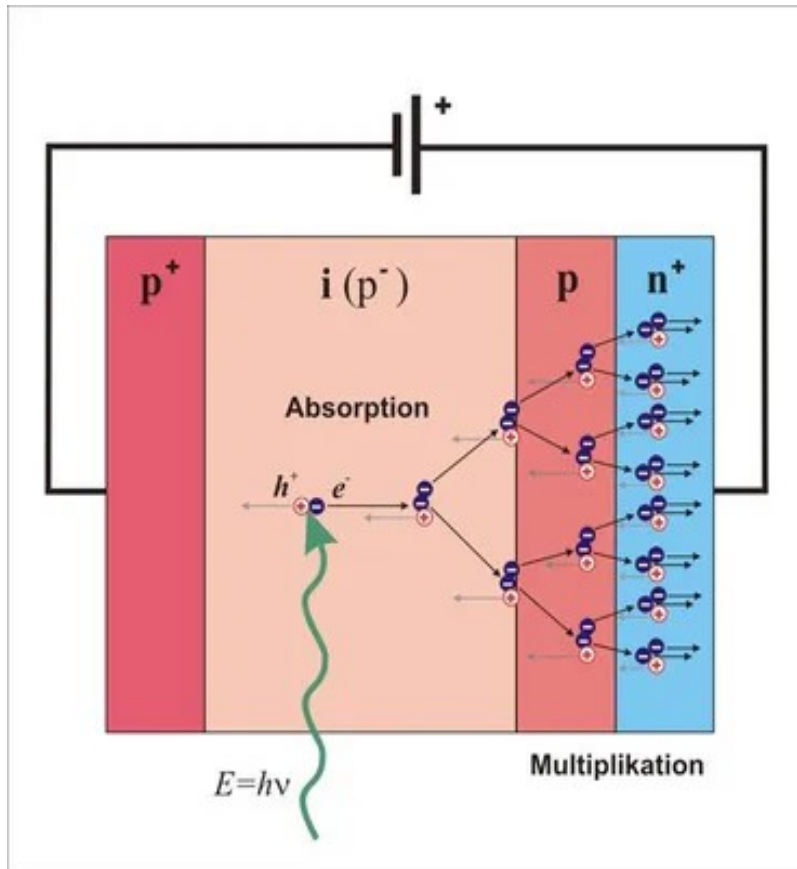
Polarizzazione inversa: la corrente è prodotta dai portatori di carica minoritari ( $I \approx 0$  non rilevata)



**La corrente attraversa la giunzione**

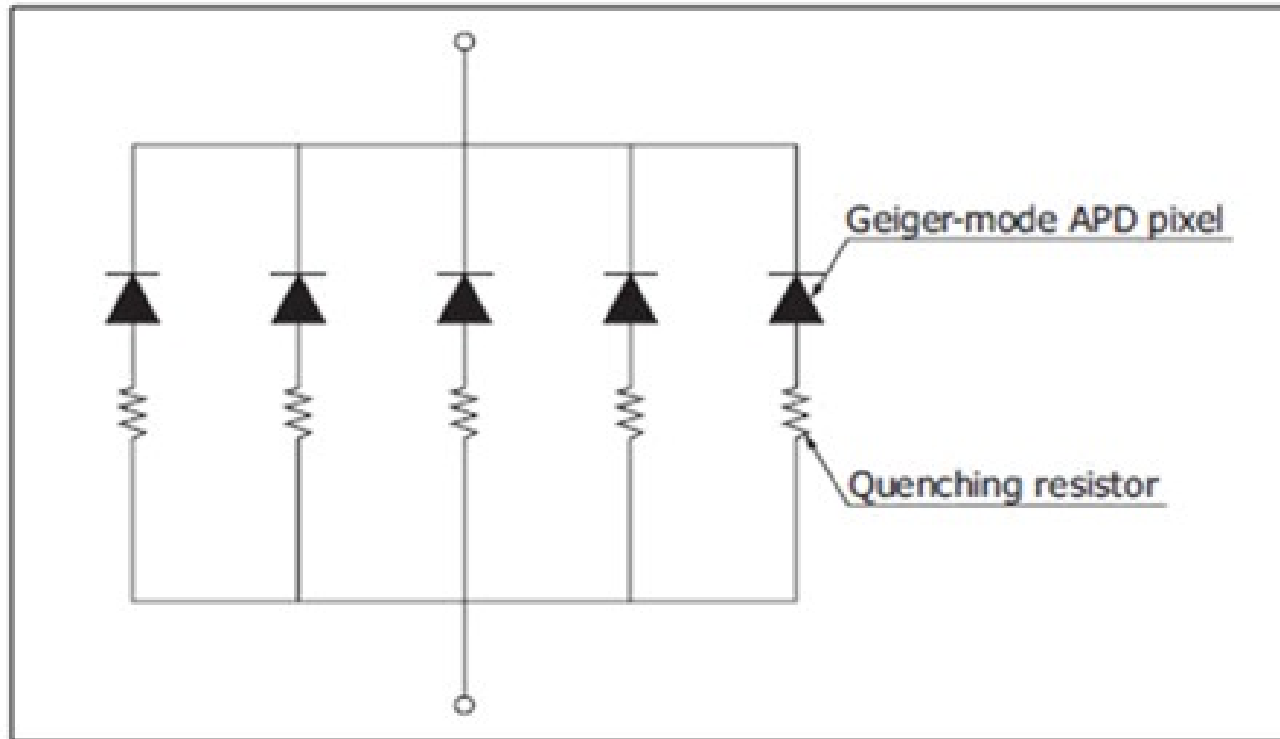
Polarizzazione diretta: la corrente è prodotta dai portatori di carica maggioritari ( $I$  rilevata)

# Fotodiodi e fotomoltiplicatori al Silicio



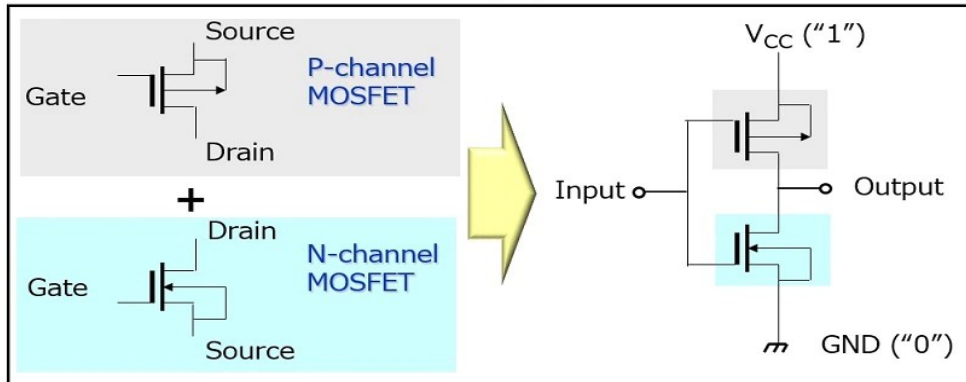
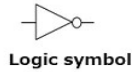
Diodo a polarizzazione inversa nel quale gli elettroni creati dai fotoni nel semiconduttore p producono una corrente in funzione dell'irraggiamento luminoso. Questo meccanismo è alla base di ...

# Fotomoltiplicatori al silicio: diodi in parallelo

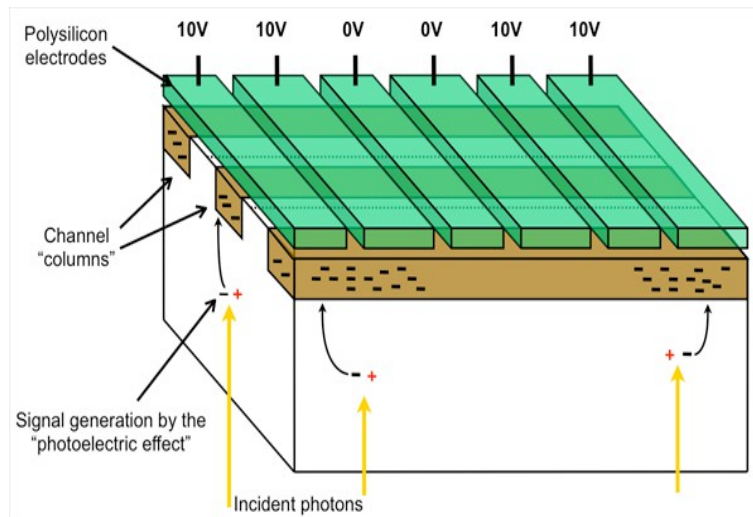


# Sensori fotoelettrici digitalizzabili come ...

Inverter



CMOS



CCD, ecc ...

# Colori delle stelle e spettroscopia

Ricavare il colore di una stella non è mai stato facile (quando le guardiamo la notte sembrano tutte bianche con qualche lieve sfumatura di colore distinguibile meglio al telescopio ...)

I sistemi fotoelettrici utilizzano fotorivelatori (fotodiodi e simili tecnologie) e filtri che selezionano sistemi di frequenze cui le fotocellule sono sensibili.

# Sistema UBV (Johnson - Morgan)

Ultravioletto: 364 nm

Blu: 442 nm

Visuale: 540 nm

# Indice di colore

$$IC = m_{pg} - m_v$$

$m_{ph}$  = MAGNITUDINE FOTOGRAFICA

$m_v$  = MAGNITUDINE VISUALE

NEL SISTEMA FOTOELETTRICO  
UBV

$$IC \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} B - V = m_B - m_V \\ U - B = m_U - m_B \end{array} \right.$$

# Dall'indice di colore alla temperatura

Per trovare la temperatura bisognerebbe dedurla dalla curva di Planck, ma come si fa se gli spettri stellari sono una roba di questo genere?



Oggi con i sistemi fotometrici si possono usare gli indici di colore per trovare la “temperatura di colore”. Infatti ...

PER LA FORMULA DI POGSON

$$m_{\lambda_1} = M_{\lambda_1} + 5 \log d - 5 + A(\lambda_1)$$

$$m_{\lambda_2} = M_{\lambda_2} + 5 \log d - 5 + A(\lambda_2)$$

$A(\lambda)$  = COEFFICIENTE DI ARROSSAMENTO  
(A CAUSA DELL'ASSORBIMENTO DEL  
MEZZO INTERSTELLARE)

$$IC = M_{\lambda_2} - M_{\lambda_1} = M_{\lambda_2} - M_{\lambda_1} + \boxed{A(\lambda_2) - A(\lambda_1)}$$

$E(\lambda_1, \lambda_2)$   
ECESSO  
DI COLORE

$$M_{\lambda} = -2,5 \log_{10}(B_{\lambda}) + \text{Cost.}$$

Ricordando che ...

$$B(\lambda) = \frac{8\pi^5 h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}$$

È la curva di Planck che esprime lo spettro della brillantezza superficiale della stella in funzione della lunghezza d'onda, segue che ...

$$m_{\lambda_2} - m_{\lambda_1} = -2,5 \log_{10} \left[ \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \left( \frac{e^{\frac{hc}{\lambda_2 T}} - 1}{e^{\frac{hc}{\lambda_1 T}} - 1} \right) \right] + E(\lambda_1, \lambda_2)$$

$$m_{\lambda_2} - m_{\lambda_1} = C + \frac{1,56}{T_c} \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) + 2,5 \log_{10} \left( \frac{1 - e^{-\frac{hc}{\lambda_2 T_c}}}{1 - e^{-\frac{hc}{\lambda_1 T_c}}} \right)$$

Dove l'eccesso di colore è un valore costante tabulato.

Pertanto ...

$$\left\{ \begin{array}{l} m_B - m_V = C + \frac{1,56}{T_c} \left( \frac{1}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda_V} \right) + f(T_c) \\ m_U - m_B = C + \frac{1,56}{T_c} \left( \frac{1}{\lambda_U} - \frac{1}{\lambda_B} \right) + f(T_c) \end{array} \right.$$

$$\Downarrow$$

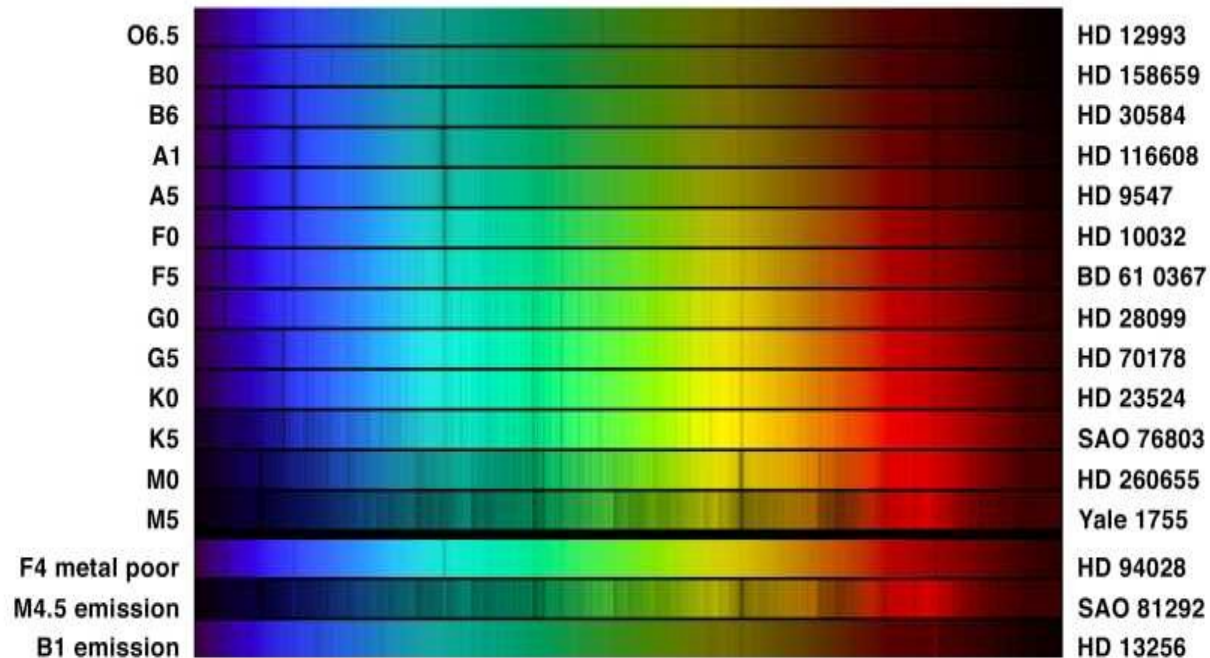
$$\boxed{T_c}$$

# Le righe di assorbimento

Lo spettro continuo è quindi ricavato come una curva teorica ricostruita in base alla temperatura di colore così calcolata.

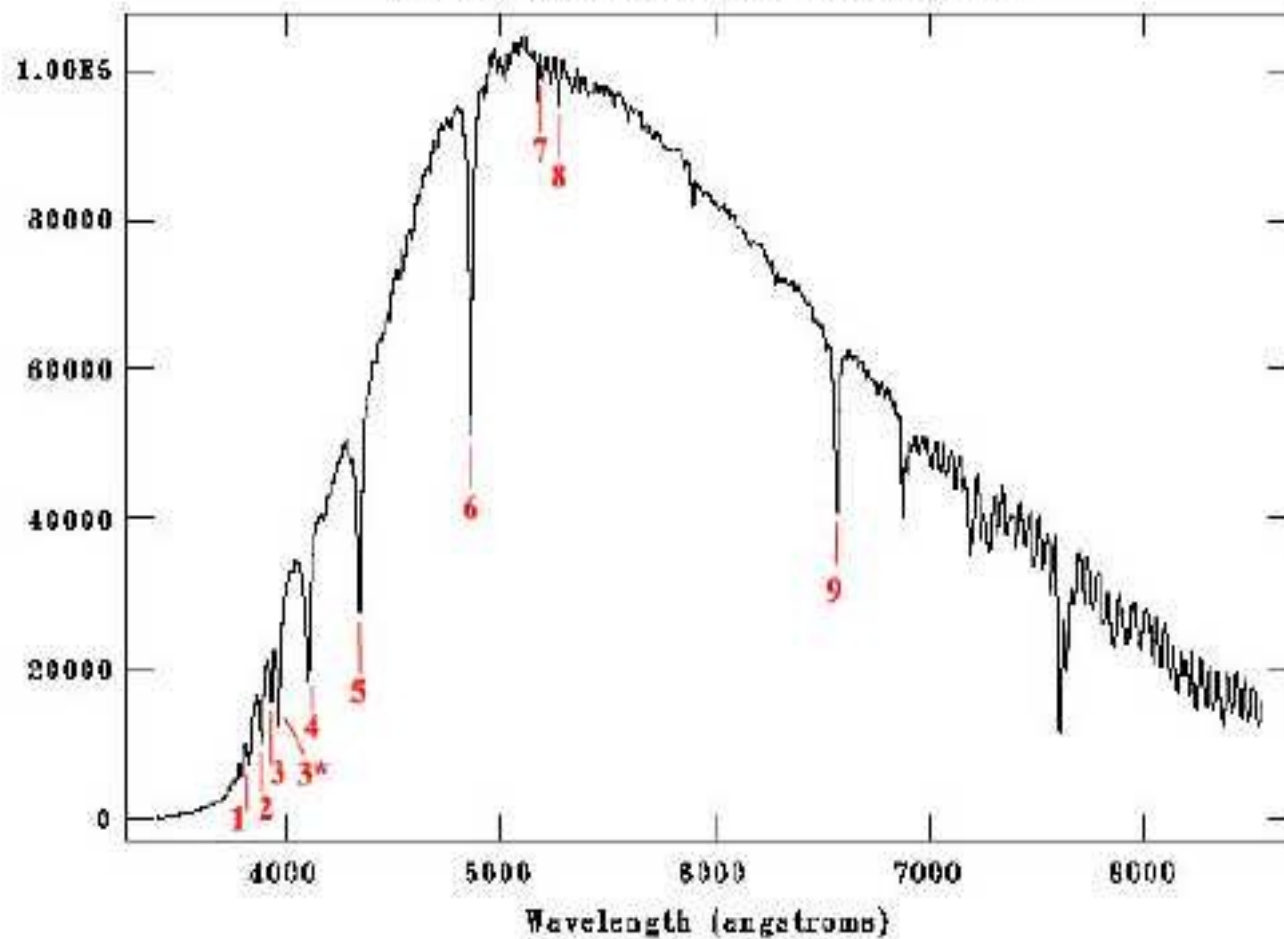
Le frequenze del sistema UBV sono scelte significativamente lontane da righe importanti (che abbassano l'intensità misurata rispetto a quella richiesta per dedurre la temperatura di colore).

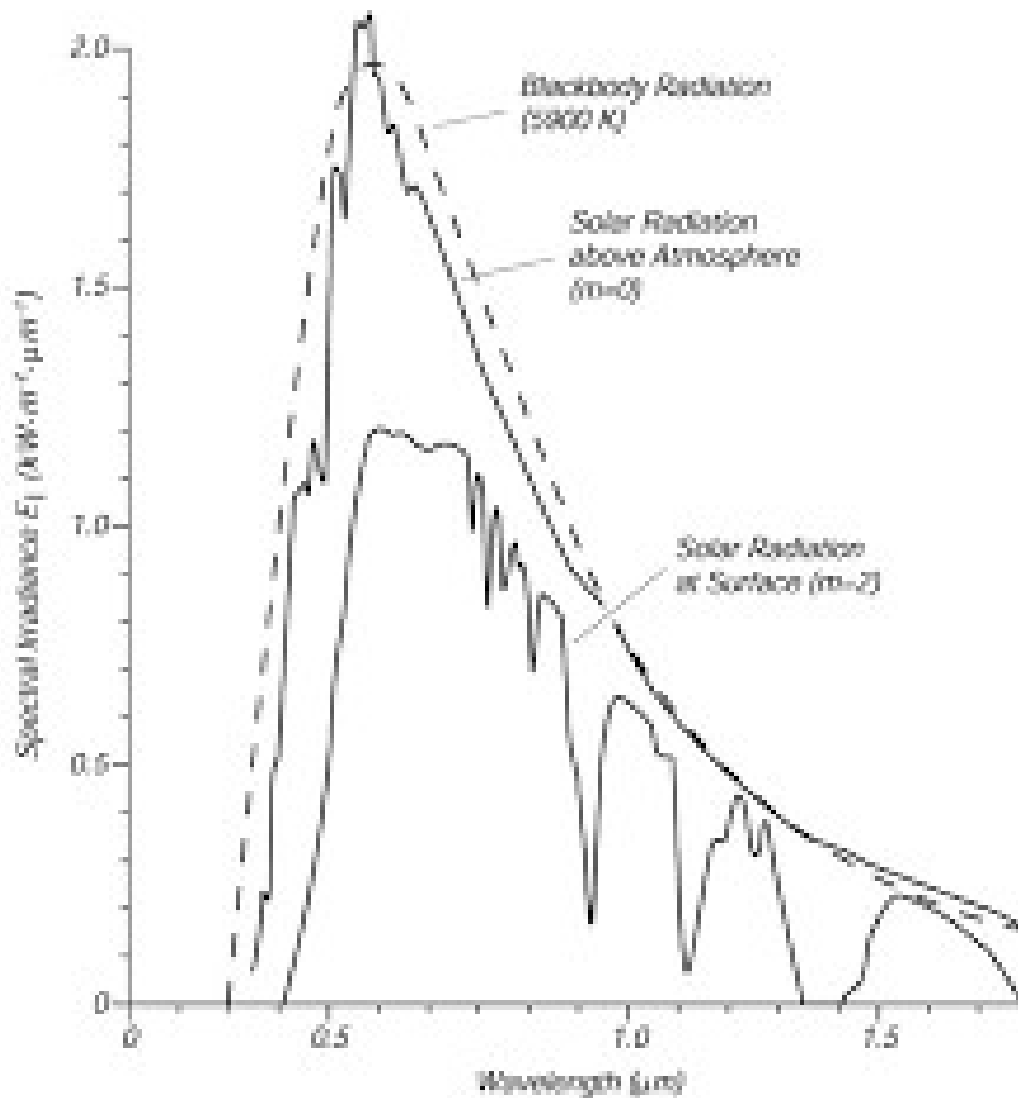
Riecco come appaiono le righe nello spettro: non si capisce dove cominciano e dove finiscono ed è difficile distinguerle tra di loro perché sono sfumate.



I sistemi tecnologici di fotometria digitale permettono di trasformare tutto questo in una mappa, ed il software lo trasforma in un grafico che rappresenta l'intensità luminosa in funzione della lunghezza d'onda (o della frequenza).

NOAO/IRAF V2.12.2a - EXPORT stud@localhost.localdomain Thu 18:49:41 14-Nov-2  
[Agr4.fits[+.1,1]]: HR 0206 G. ap:1 beam:1

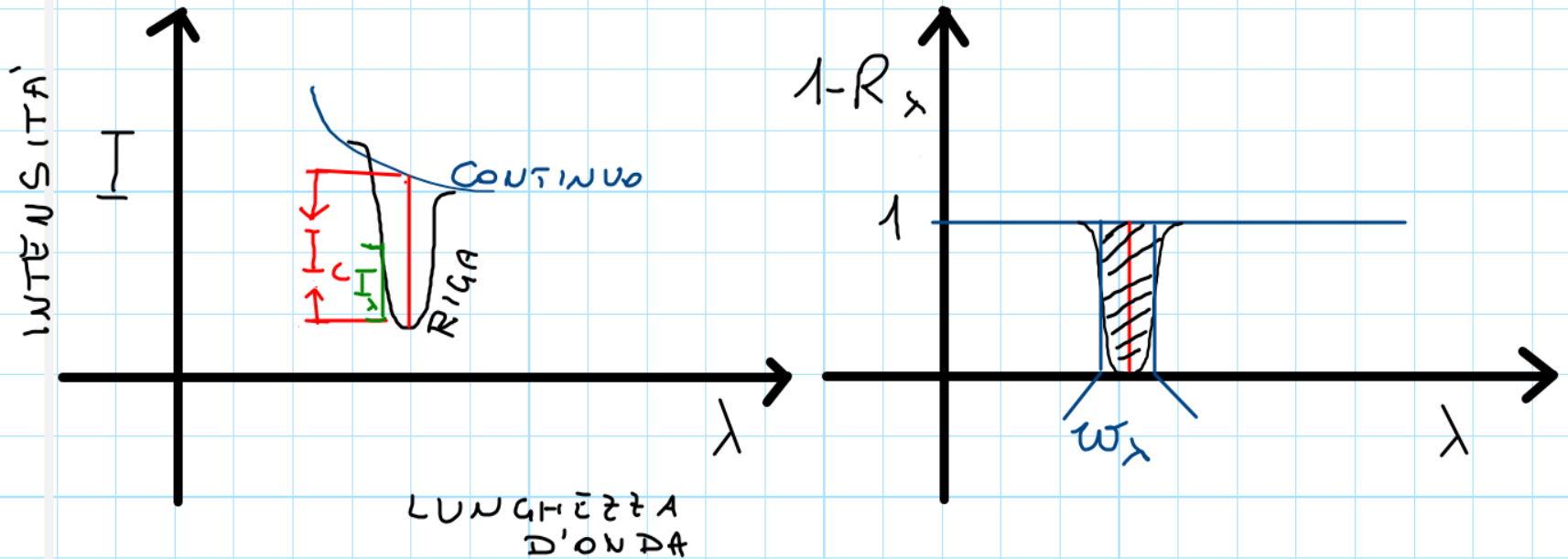




Intanto bisogna capire qual è l'influenza dell'atmosfera terrestre, e bisogna eliminarla (riaggiungendo al profilo di intensità la luce che le sue componenti gassose sottraggono).

Poi confrontare lo spettro con una curva di corpo nero teorica che possa rappresentare la brillantezza superficiale fotosferica visibile)

# Larghezza e profondità di riga (grandezze utili e loro determinazione)



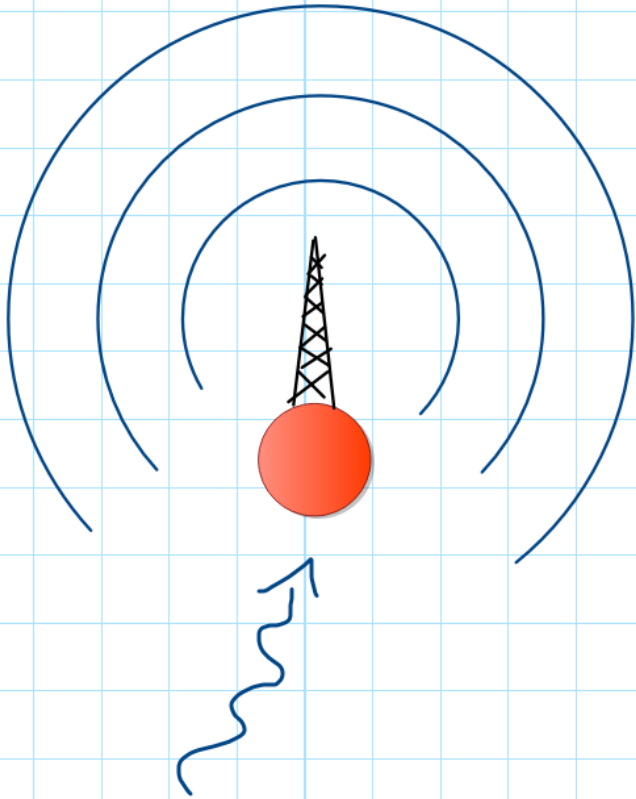
$$1-R_\lambda = \frac{I_c - I_\lambda}{I_c}$$

$$\int_0^{+\infty} (1-R_\lambda) d\lambda = \omega_\lambda$$

LARGHEZZA  
EQUIVALENTE

L'ATOMO "ANTENNA"

RICEVITORE È  
DIFFUSORE DI  
ENERGIA.



Considerando ogni atomo come un'antenna che riceve (assorbe) e diffonde un'onda elettromagnetica (oscillatore forzato) ...

... si ottiene una larghezza di riga “naturale” e inevitabile, legata alla durata dell'impulso ...

FOTONE = IMPULSO LUMINOSO

$$\Delta t \cdot \Delta \nu \approx 1$$

DURATA  
DELL'IMPULSO

↑  
BANDA DI  
FREQUENZA

(INCERTEZZA  
SULL'ISTANTE  
DEL FENOMENO)  
GENERATORE

Che corrisponde all'incertezza quantistica sull'energia del fotone assorbito, legata all'indeterminazione della durata temporale della transizione elettronica (che produce l'assorbimento) dalla relazione di indeterminazione Energia – Tempo.

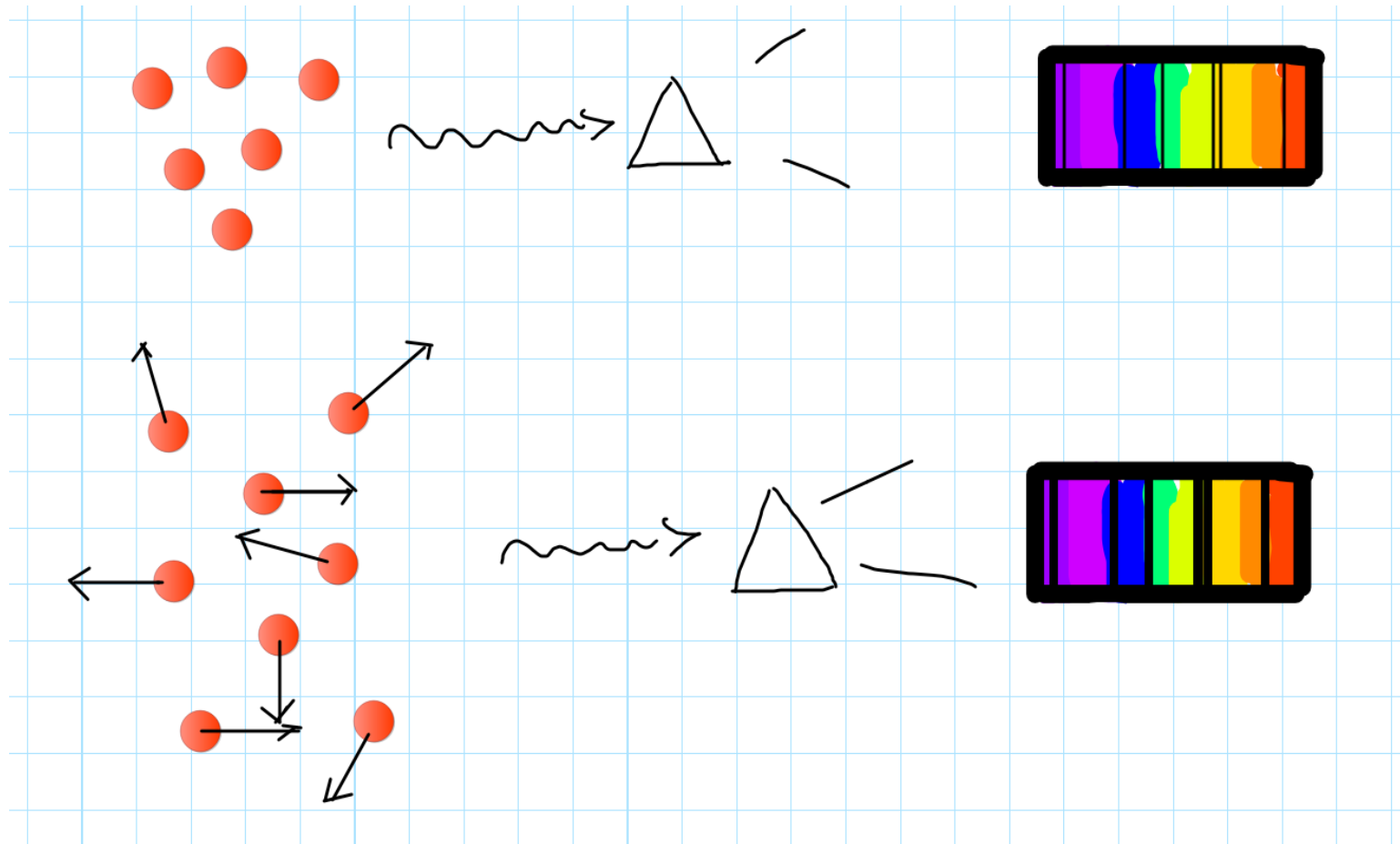
$$\Delta t \cdot h \Delta \nu = h$$

$$\Delta t \cdot \Delta E \approx h$$

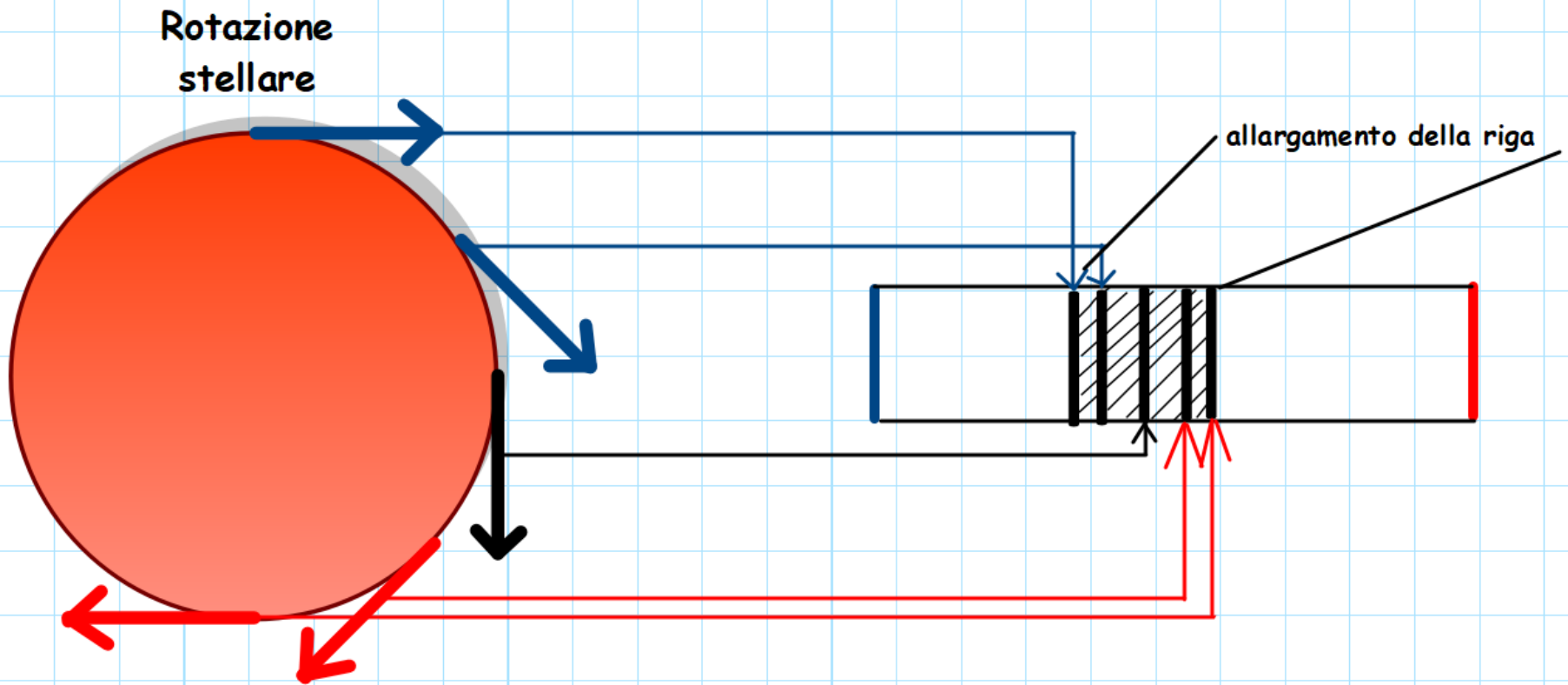
INDETERMINAZIONE  
ENERGIA TEMPO.

La larghezza eccedente rispetto a questo valore fissato può essere dovuta ad altri fattori, come ad esempio ...

Temperatura (legata al moto termico che produce una distribuzione di spostamenti Doppler legata alla distribuzione isotropa delle velocità)

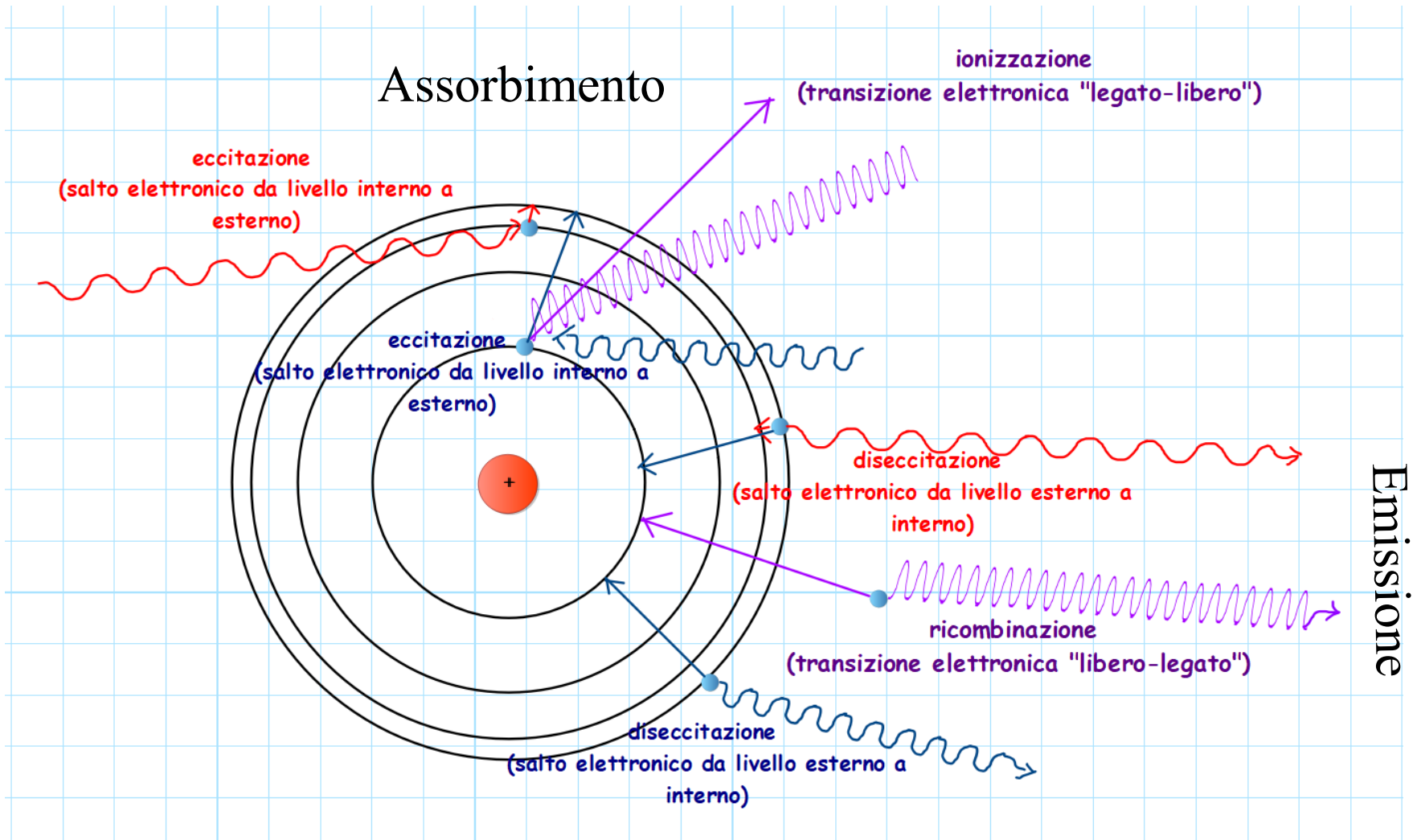


# Rotazione stellare

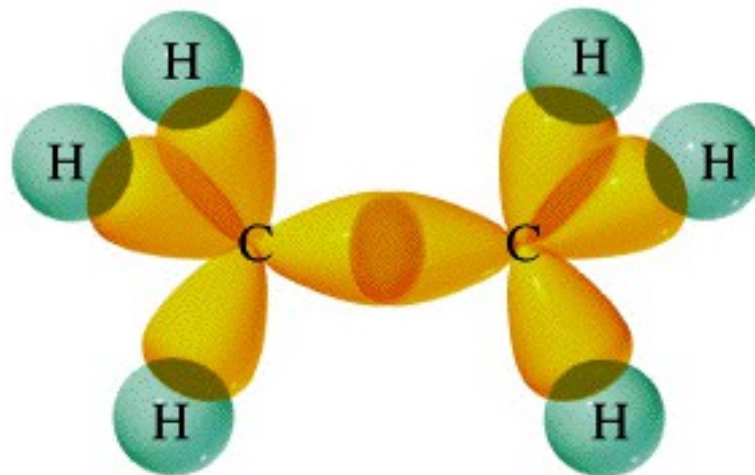


# Causa atomica delle righe e condizioni fisiche stellari (cenni)

# Causa atomica delle righe e condizioni fisiche stellari (cenni)



A questi casi si aggiungono le bande energetiche di gruppi molecolari prodotte da salti di livello negli orbitali della molecola.



Quando un atomo si eccita, l'elettrone assorbe un fotone saltando dal livello fondamentale ad un livello più esterno, ma poi tende a tornare nello stato iniziale riemettendo il fotone e l'atomo si diseccita.

Così quando un atomo si ionizza un elettrone assorbe un fotone abbastanza energetico ( $E >$  energia di ionizzazione), poi si ricombina, riemettendo il fotone.

Perché allora ci sono le righe di assorbimento?

# Risposta:

Perché il processo di riemissione di un fotone assorbito è un processo di “diffusione” (come la luce di una fonte luminosa viene diffusa da un vetro opalescente o vetro opalino viene diffusa in tutte le direzioni in modo che noi non vediamo dov'è).

Infatti le righe di assorbimento non sono del tutto buie, ma sono zone dello spettro in cui la luminosità è inferiore a quella del continuo.



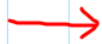
# Equilibrio di eccitazione e ionizzazione

Tra le due tendenze contrapposte nel gas delle atmosfere stellari si instaura una situazione di equilibrio che dipende dalle sue condizioni fisiche (temperatura, pressione densità).

L'equilibrio è descritto da due equazioni che legano le grandezze fisiche termodinamiche del gas all'energia di eccitazione e di ionizzazione.

# Densità degli stati eccitati di un gas in equilibrio termodinamico

densità degli stati eccitati



$$N_r = N_0 \frac{g_r e^{-\frac{\chi_r}{kT}}}{\sigma(T)}$$

densità degli atomi al livello fondamentale



$$g_r$$

$$\sigma(T)$$



$$e^{-\frac{\chi_r}{kT}}$$

$$-\frac{\chi_r}{kT}$$

differenza di energia tra livello eccitato e livello fondamentale



Temperatura

Somma di stato (funzione di normalizzazione)

EQUAZIONE DI BOLTZMANN

## Equilibrio di ionizzazione (rapporto tra le densità degli stati di ionizzazione)

$$\frac{N_{s+1}}{N_s} P_e = \frac{g_{s+1} \sigma_{s+1}(T)}{\sigma_s(T)} \left( \frac{2\pi m}{h^3} \right)^{3/2} kT^{5/2} e^{-\frac{\chi_s}{kT}}$$

EQUAZIONE DI SAHA

Densità degli atomi ionizzati s+1 volte →  $N_{s+1}$   
Densità degli atomi ionizzati s volte →  $N_s$   
Pressione elettronica →  $P_e$   
Temperatura →  $kT$   
Energia per ionizzare un atomo già ionizzato s volte →  $\chi_s$

La presenza di righe di elementi ionizzati dipende dunque dalla temperatura e dalla pressione elettronica: pertanto stelle con le stesse righe ma con una maggiore gravità superficiale (e quindi una maggiore pressione elettronica) hanno bisogno di avere temperature atmosferiche più alte produrre le stesse righe di assorbimento (si veda il caso della differenza di temperatura tra giganti rosse e nane rosse con lo stesso spettro di assorbimento).

# E perché le nebulose hanno righe di emissione?

Risposte principali:

1. Perché all'interno hanno stelle molto calde che riscaldano il gas (e quindi producono ionizzazione ed eccitazione per urto)
2. Il processo di ricombinazione il più delle volte avviene a step intermedi (con formazione di livelli eccitati dell'atomo che poi emette nello spettro della luce visibile diseccitandosi).



# M 57 visible spectrum

