Parte terza

FENOMENI ONDULATORI

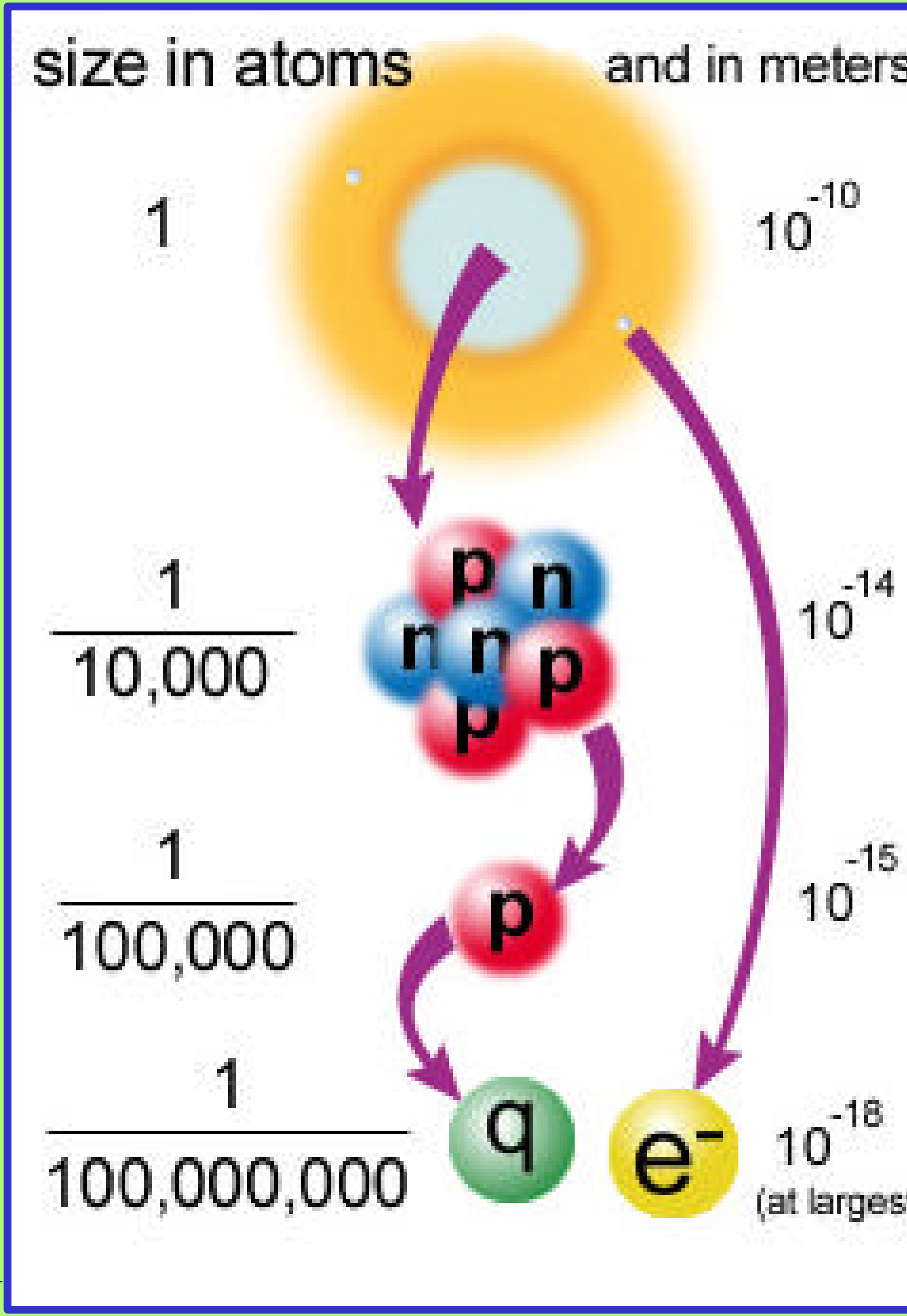
E ELETTROMAGNETICI

ELETTROSTATICA

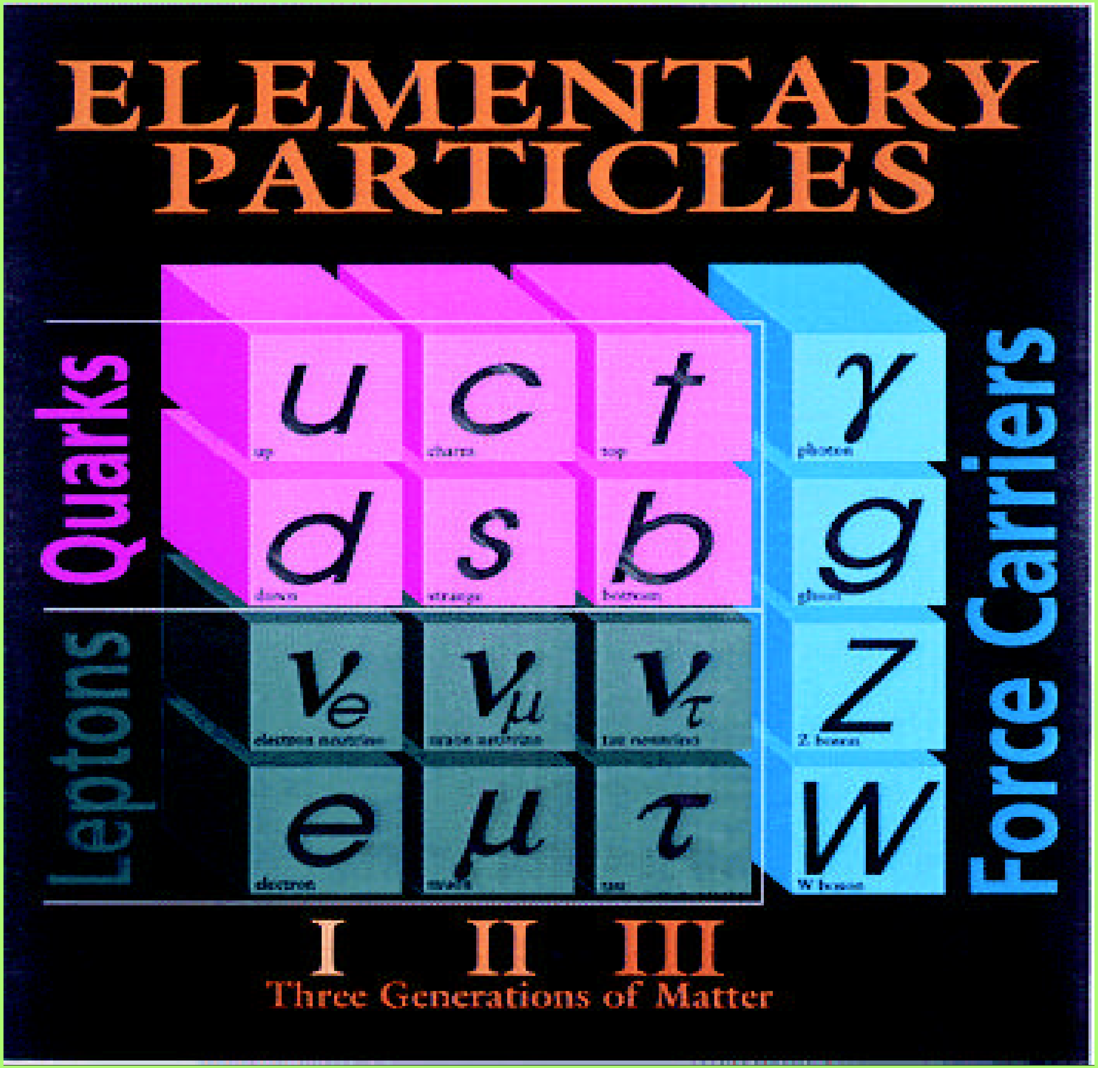
I corpi in natura possono essere ***conduttori, semiconduttori*** o ***isolanti***; la differenza e` dovuta alla frazione di elettroni liberi di muoversi nella banda di conduzione o legati nella banda di valenza.

La **carica elettrica elementare** e` quella dei protoni (positiva) e degli elettroni (negativa), ma in realta` la materia e` composta di ***quark*** (particelle con carica elettrica frazionaria che costituiscono i protoni e i neutroni) e di ***leptoni***.

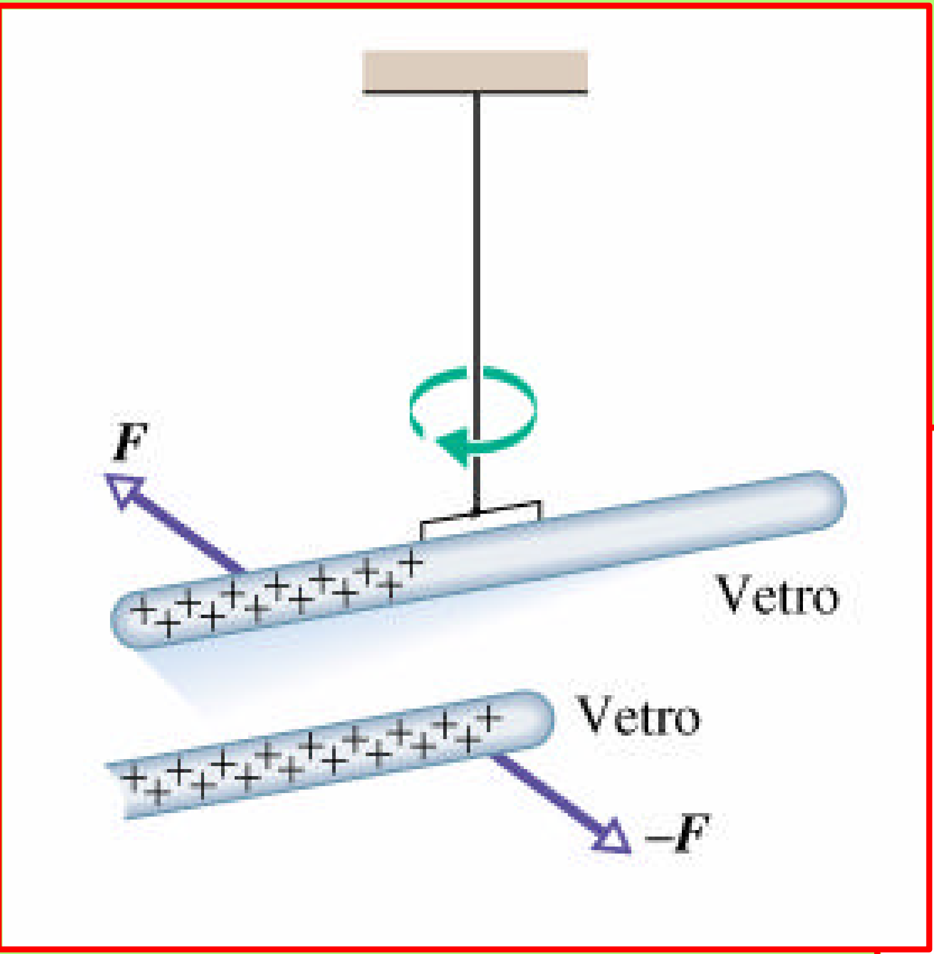
Le dimensioni in gioco

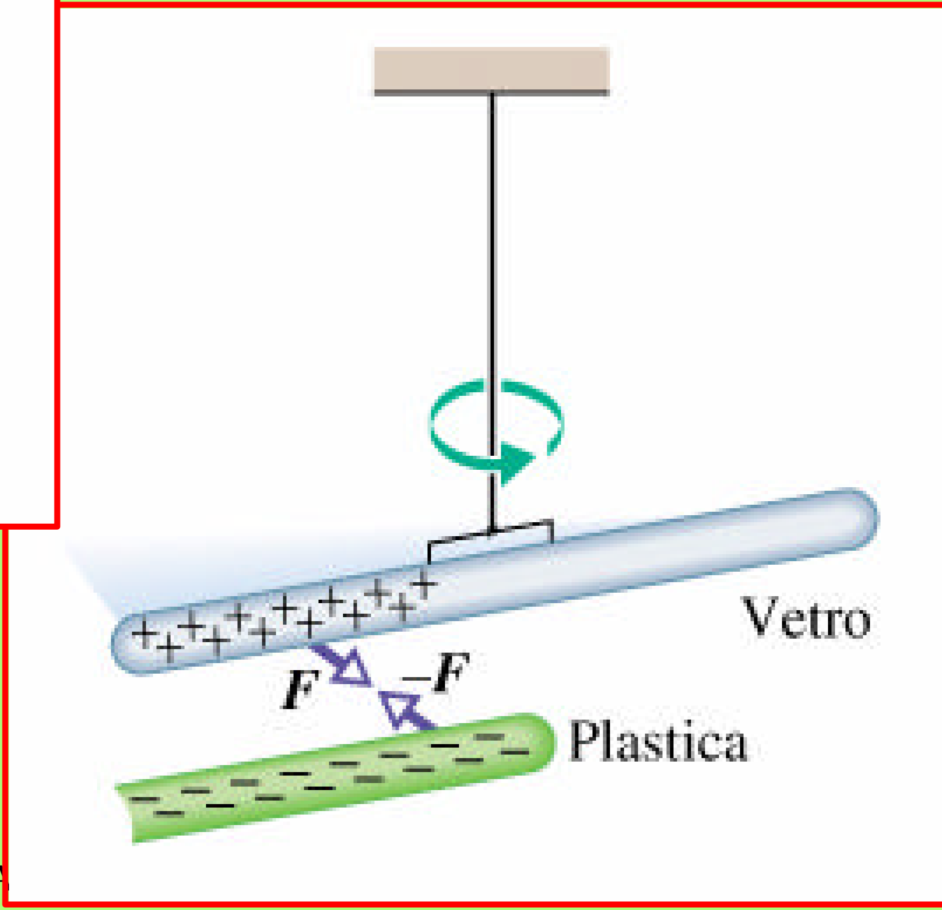


Le 3 generazioni della materia e le particelle di scambio



Forze elettrostatiche

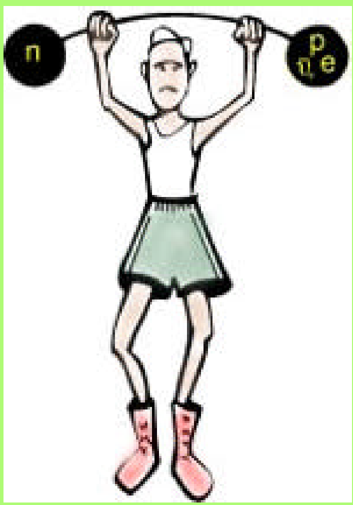




Le 4 interazioni fondamentali

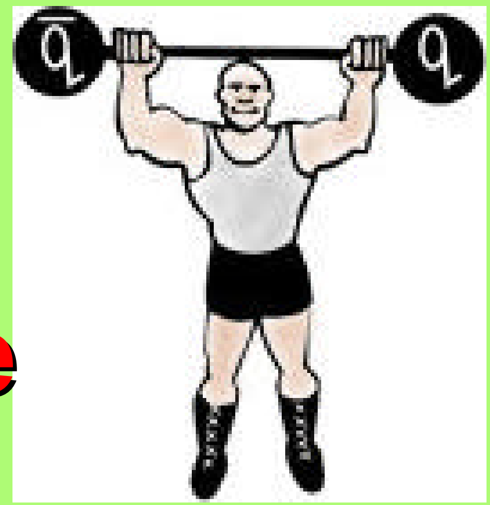
gravità

elettromagnetismo

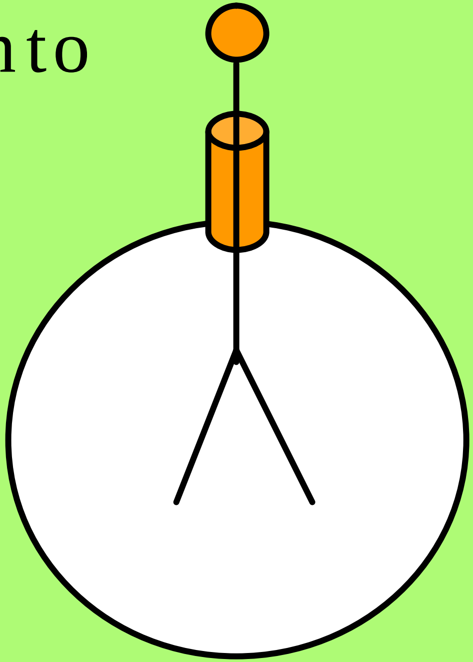


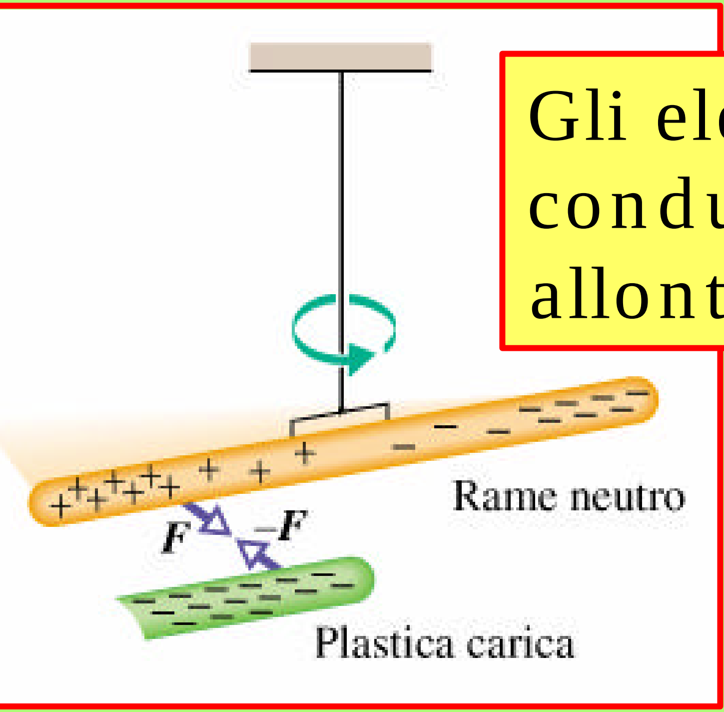
debole

forte



L'**elettroscopio** e` uno strumento in grado di misurare la carica elettrica di un corpo.





Gli elettroni di conduzione si allontanano

La **ionizzazione** e` un fenomeno che produce cariche elettriche (ioni positivi o negativi e elettroni) libere di muoversi in una sostanza liquida o gassosa.

La forza elettrostatica (***attrattiva*** o ***repulsiva***) che si esercita tra due cariche elettriche e` stabilita dalla **legge di Coulomb**:

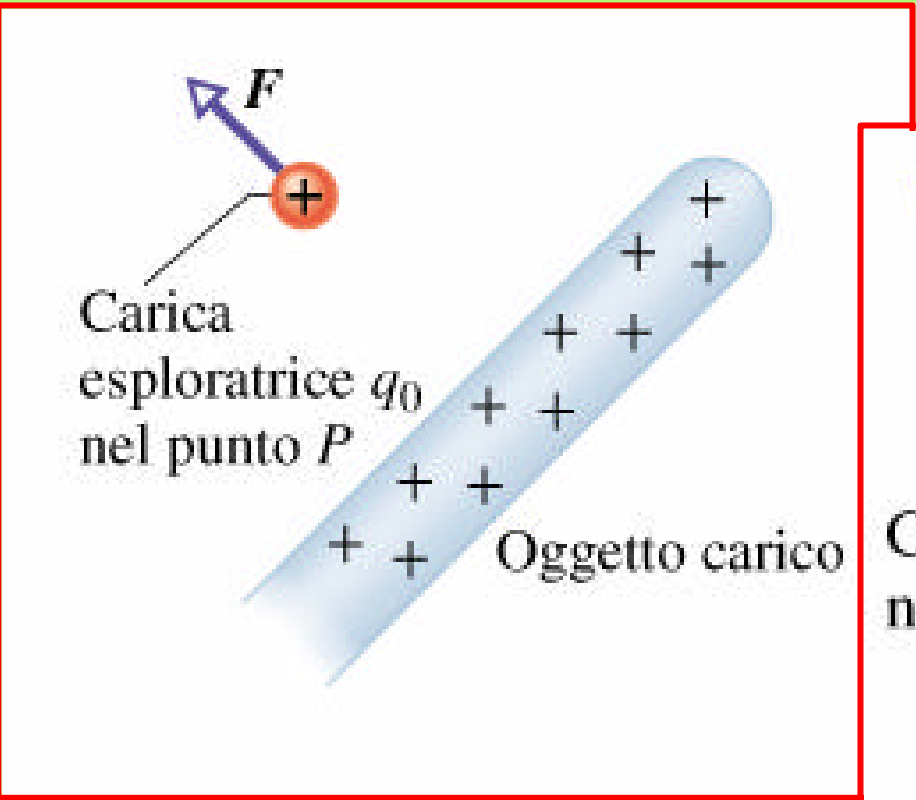
$$\boxed{F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4pe}\frac{q_1 q_2}{r^2}}$$

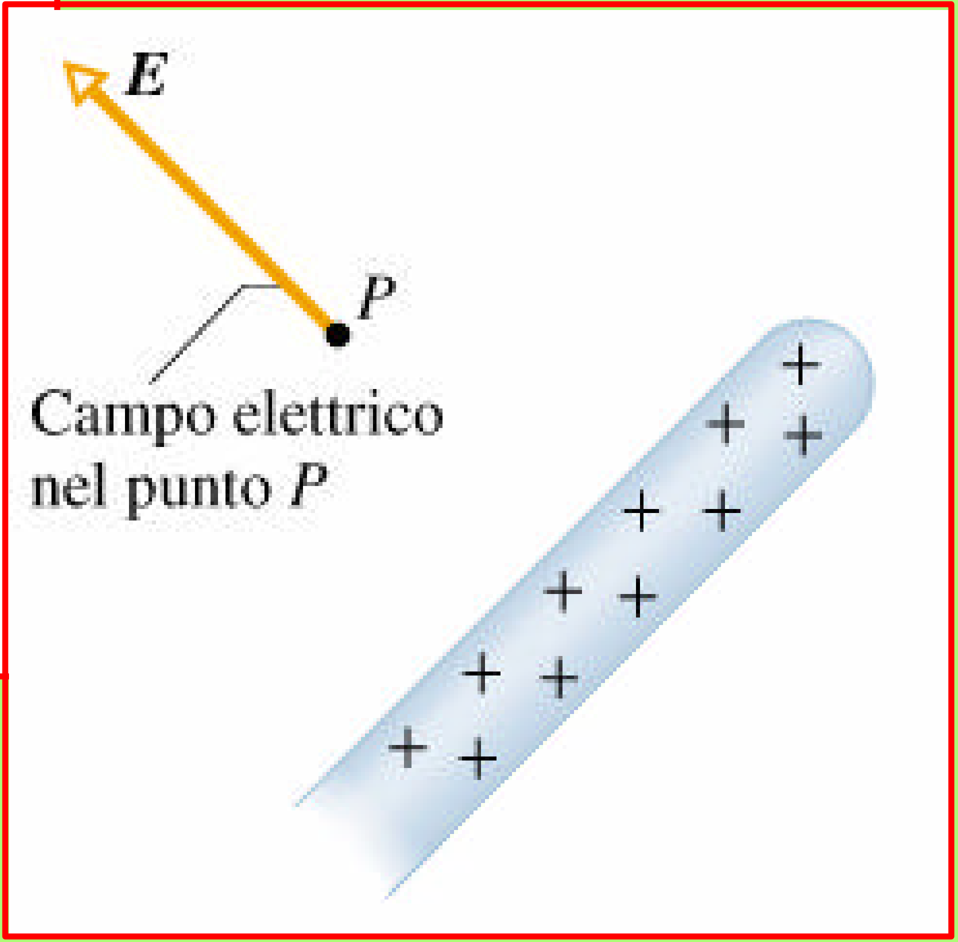
simile alla legge di Newton, ma con una differenza importante: le masse sono solo positive, mentre le cariche elettriche possono essere positive oppure negative.

La grandezza ε e` detta **costante dielettrica** $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$, dove $\varepsilon_0 = 8.86 \cdot 10^{-12}\ C^2N^{-1}m^{-2}$ e` la costante dielettrica del vuoto e $\varepsilon_r \geq 1$ e` la costante dielettrica relativa al mezzo. Nel caso dell'acqua si ha $\varepsilon_r \sim 80$ (molto grande), e quindi la forza di Coulomb e` molto piccola; questo e` il motivo per cui l'acqua si dissocia molto facilmente (**elettrolisi**).

Nel S.I. la grandezza elettrica fondamentale e` l`unita` di corrente elettrica (***ampere***) e l'unita` di carica elettrica, il ***Coulomb*** [C] e` una grandezza derivata da $dq = i \cdot dt$.

Carica esploratrice

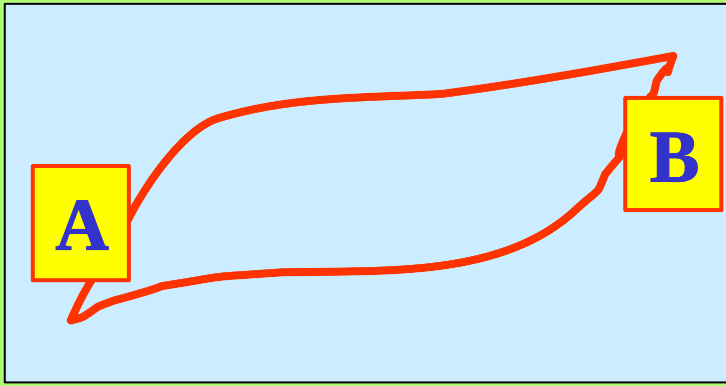




Campo elettrico

La carica esploratrice, che per definizione e` positiva (q > 0), permette di introdurre la nozione di **campo elettrico** **E = F/q** e quindi, essendo il campo conservativo, di **potenziale elettrico** **V = W/q** dove W e` l'energia potenziale elettrostatica. Il **Volt** [1V = 1J / 1C] e` l'unita` di misura del potenziale elettrico.

Il lavoro fatto per spostare la carica q > 0 dal punto A al punto B non dipende dal percorso e vale



$$\boxed{L = W_A - W_B = q\left(V_A - V_B\right) = q \cdot \Delta V}$$

Le cariche elettriche negative si muovono spontaneamente dal potenziale inferiore al potenziale maggiore; il contrario avviene per le cariche positive.

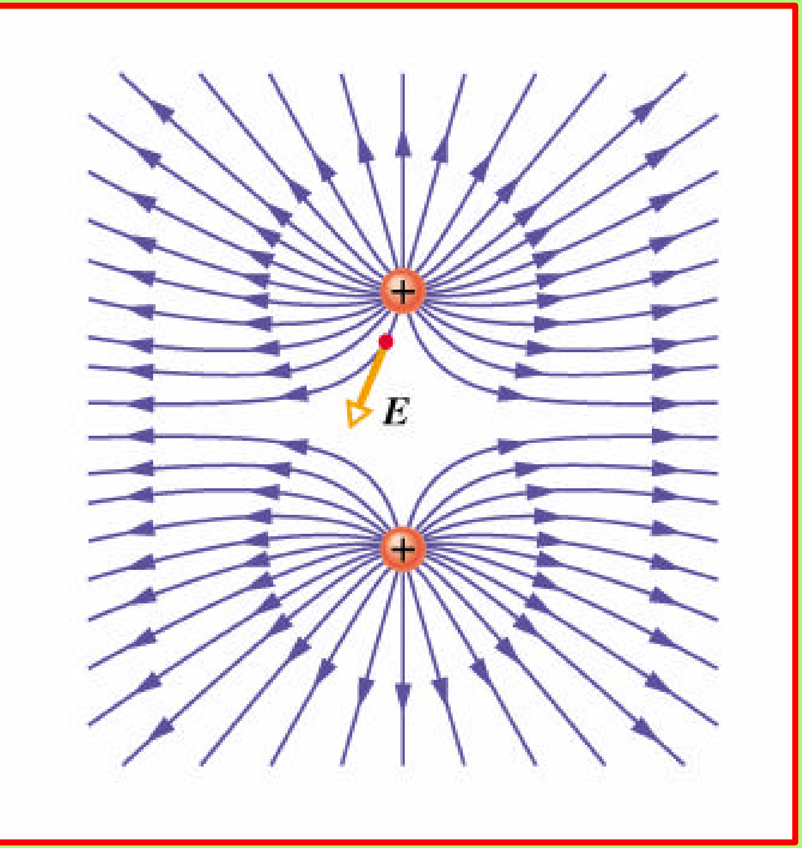
Poiche`il lavoro fatto dal campo elettrico per spostare la carica q di $\Delta x$ e` dato da

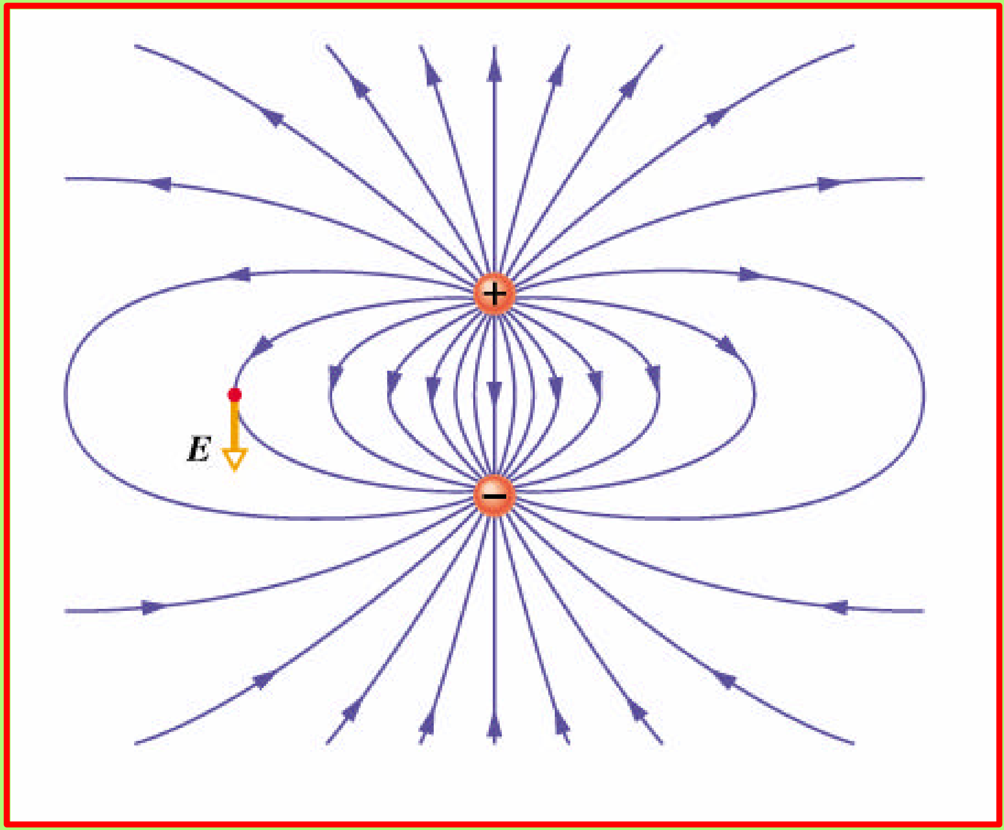
$$L = F\Delta x = qE\Delta x = -q(V_B - V_A),$$

si deduce che il campo elettrico E e` il gradiente del potenziale elettrostatico:

$$\boxed{E = -\frac{dV}{dx}}$$

L'unita` di misura del campo elettrico nel S.I. e` percio` data in [V/m]


+
+
E


+
E
−

Consideriamo due esempi di forze elettrostatiche:

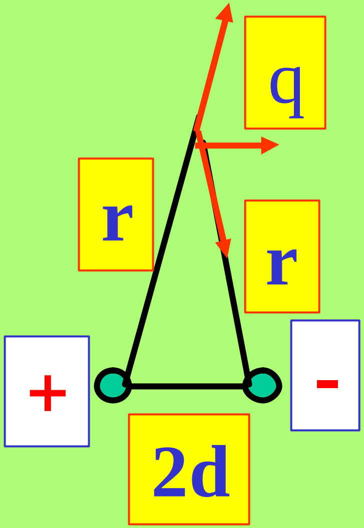
1 - La forza Coulombiana e la forza Newtoniana (entrambe attrattive) tra il protone e l'elettrone di un **atomo di idrogeno** hanno i valori seguenti :

$$F_C = 8.9 \cdot 10^9 \frac{\left(1.6 \cdot 10^{-19}\right)^2}{\left(5.3 \cdot 10^{-11}\right)^2} = 8.2 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{N}$$

$$F_N = 6.7 \cdot 10^{-11} \frac{\left(9.1 \cdot 10^{-31}\right)\left(1.7 \cdot 10^{-27}\right)}{\left(5.3 \cdot 10^{-11}\right)^2} = 3.6 \cdot 10^{-47}\,\mathrm{N}$$

Dato il grande valore del rapporto $\mathbf{F_C/F_N = 3\ 10^{39}}$ tra esse, e` sempre possibile trascurare la forza gravitazionale F_N.

2 - Un **dipolo** e` definito da 2 cariche elettriche q di ugual valore, ma di segno opposto, poste a distanza 2d. In un punto distante r da entrambe le cariche il campo elettrico lungo l'asse verticale y si annulla per simmetria, mentre quello lungo l'asse orizzontale vale:



$$E = E_+ - E_- = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{\vec{r}}{r^3} - \frac{\vec{r}}{r^3}\right) = \frac{2q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r^2}\cos\vartheta =$$

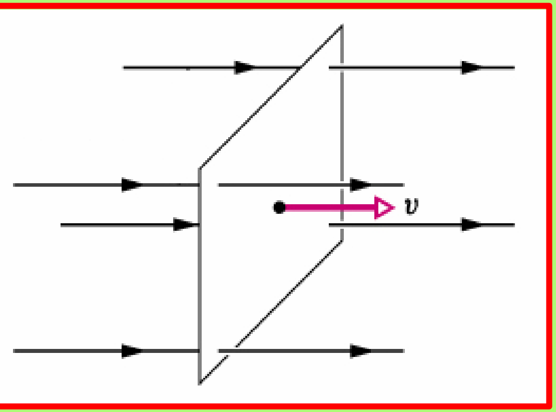
$$= \frac{2q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{\left(y^2+d^2\right)}\frac{d}{\sqrt{\left(y^2+d^2\right)}} \approx \frac{2q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{d}{y^3} \text{ per y >> d}$$

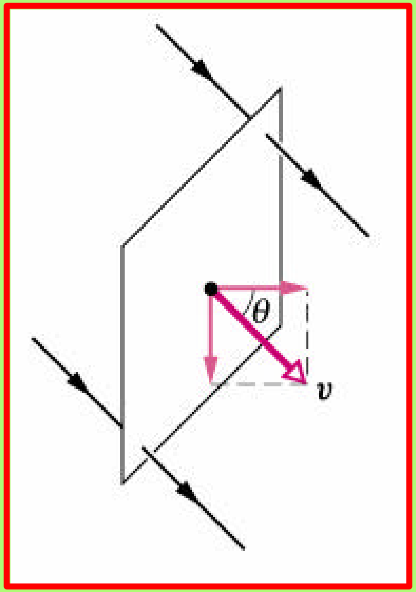
ossia il campo elettrico varia come y^{-3} anziche come y^{-2}.

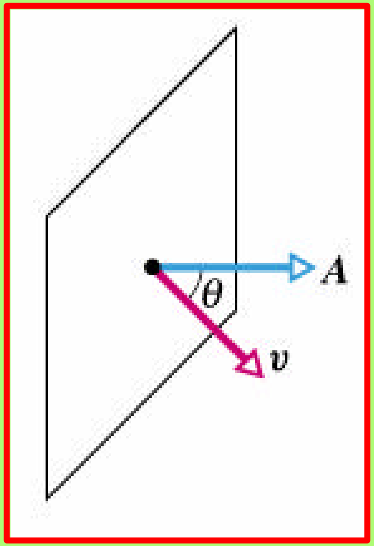
Teorema di Gauss

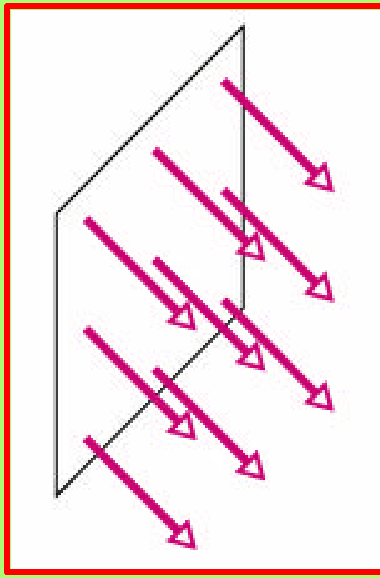
Si definisce **flusso elementare** di un vettore (qui consideriamo il vettore campo elettrico **E**) attraverso una superficie S (di normale **n**) la grandezza:

$$d\Phi(E) = E \cdot n\, dS = E \cos J\, dS$$





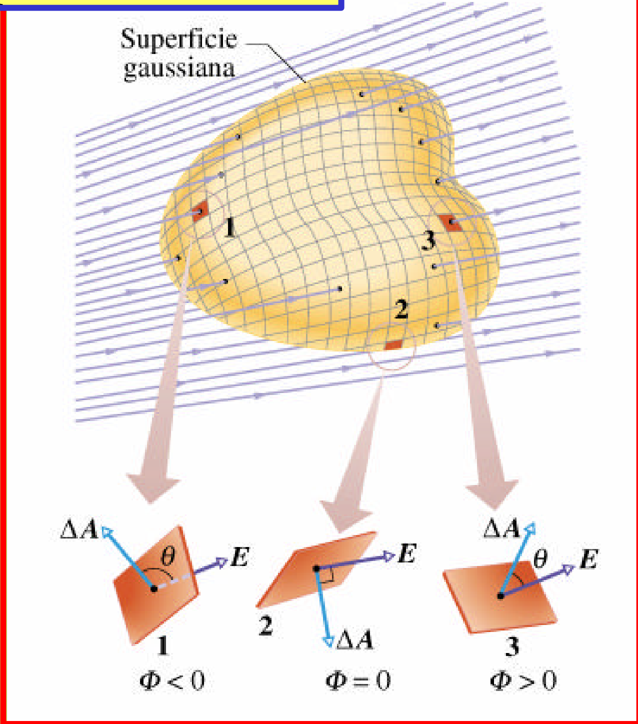




Dalla definizione di campo elettrico e poiche` $dS \cos\theta = r^2 \, d\Omega$ (proiezione di dS normale a n) si ottiene $d\Phi(E) = (1/4\pi\varepsilon)\, q \, d\Omega$. Da cui segue che il flusso totale uscente da una qualsiasi superficie chiusa, contenente la carica totale Q, e` dato da:

$$\Phi(E) = \oint E \cdot n\, dS = \frac{Q}{4pe} \oint d\Omega = \frac{Q}{e}$$

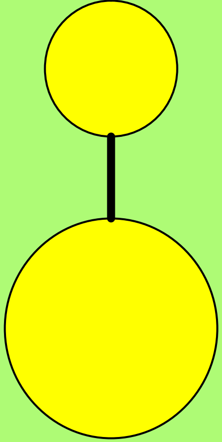
e non dipende dal raggio di curvatura della superficie. Si deve distinguere tra flusso uscente ($Q > 0$) e flusso entrante ($Q < 0$), per cui il flusso generato da un corpo di carica totale $Q = 0$ e` nullo.



Le principali implicazioni del teorema di Gauss sono:

• In equilibrio, ossia in assenza di corrente elettrica, le cariche si distribuiscono sulla superficie dei corpi conduttori.
• L'intensita` del campo elettrico di una sfera carica coincide con quella che si avrebbe se la carica fosse tutta concentrata al centro della sfera.
• Vicino a un conduttore $E = \sigma/\varepsilon_0$, dove σ e` detta densita` di carica superficiale.

• Due sfere di raggio r_1 e r_2 e carica q_1 e q_2 collegate tra loro da un filo conduttore, essendo equipotenziali, comportano:



$$W = \frac{1}{4pe}\frac{q_1}{r_1} = \frac{1}{4pe}\frac{q_2}{r_2}, \text{ ossia } \frac{q_1}{q_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

da cui, posto $Q = q_1 + q_2$, si ha:

$$\boxed{q_1 = \frac{Q}{1+\frac{r_2}{r_1}},\ q_2 = \frac{Q}{1+\frac{r_1}{r_2}}}$$

• Dai valori precedenti di q_1 e q_2 si ottiene che il rapporto tra i campi elettrici vicino a ciascuna sfera vale $E_1/E_2 = r_2/r_1$, ossia **E·r = costante**: il campo e\` piu\` intenso se il raggio della sfera e\` piu\` piccolo. In genere il campo elettrico e\` piu\` grande nelle zone appuntite di un corpo.

Campo magnetico

Esempi di campo magnetico sono quello terrestre, le calamite, i magneti, ecc... Sono sempre definiti da un polo nord e un polo sud, anche se i monopoli magnetici sono particelle previste dalla teoria GUT, ma non scoperti.

Le linee di flusso del campo magnetico indicano la direzione del campo e il valore dell'**induzione magnetica B** (da S a N).

Forze di Lorentz: un campo magnetico non ha effetto sulle particelle neutre ma provoca la deviazione di particelle cariche la cui velocita` cambia di direzione ma non di modulo.

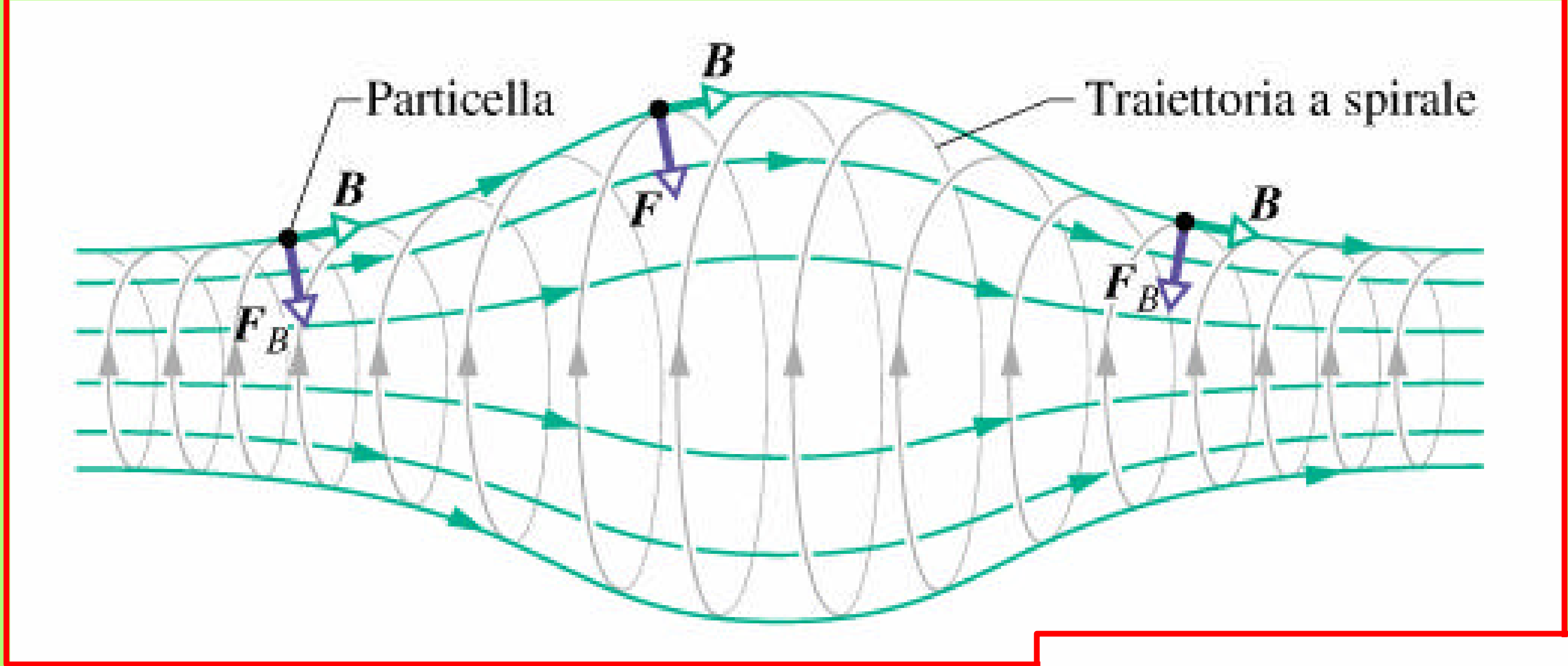
Se la particella ha massa m, carica q e velocita` costante v, la forza di Lorentz e` data da

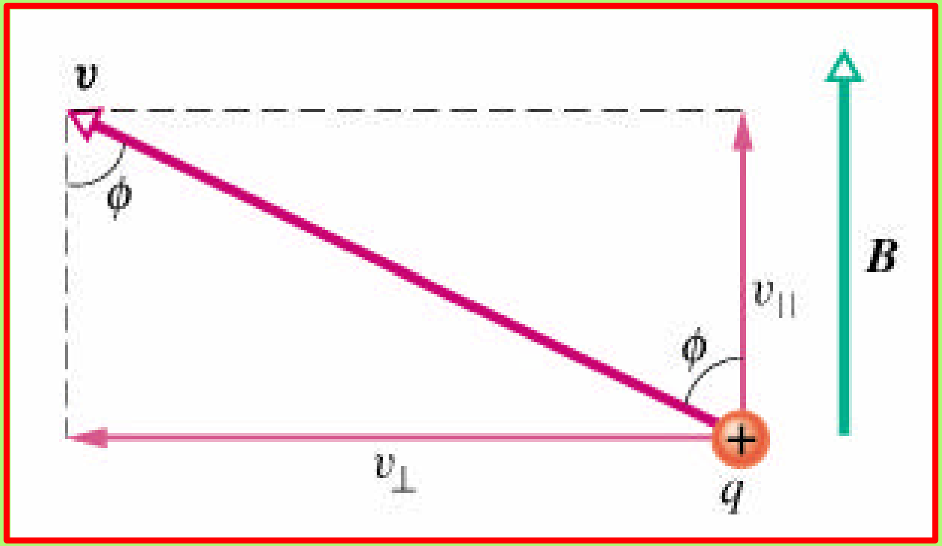
$$F = qv?\ B$$

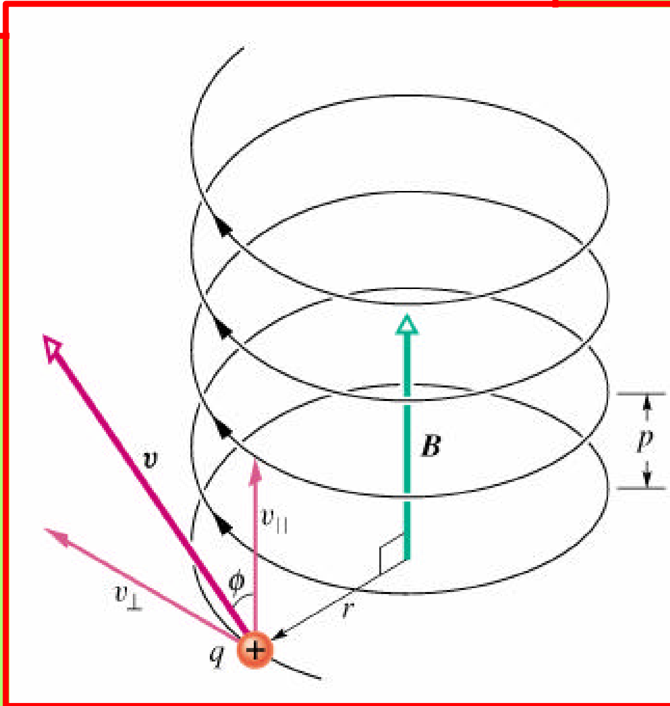
e ***non dipende da m***. Tuttavia, essendo la forza centripeta:

$$F = m\ a_c = m\ v^2/R = m\ \omega^2 R$$

il raggio di curvatura $R = mv/qB$ (costante nel tempo se B e` costante) dipende da m, nel senso che se m e` grande la particella e` poco deviata e viceversa; inoltre la velocita` angolare $\omega = qB/m$ non dipende da v.


Particella
B
Traiettoria a spirale
F
B
F_B
B
F_B


v
φ
v_||
φ
B
v_⊥
q


B
p
v
v_||
φ
v_⊥
r
q

Se e` presente anche un campo elettrico E, l'espressione piu` completa delle forze di Lorentz e` allora data da:

$$\boxed{F = q(E + v \wedge B)}$$

Se anziche` una particella consideriamo un conduttore percorso dalla corrente i e posto in un campo magnetico B, la forza di Lorentz che si esercita lungo un tratto dx di conduttore sara`data da:

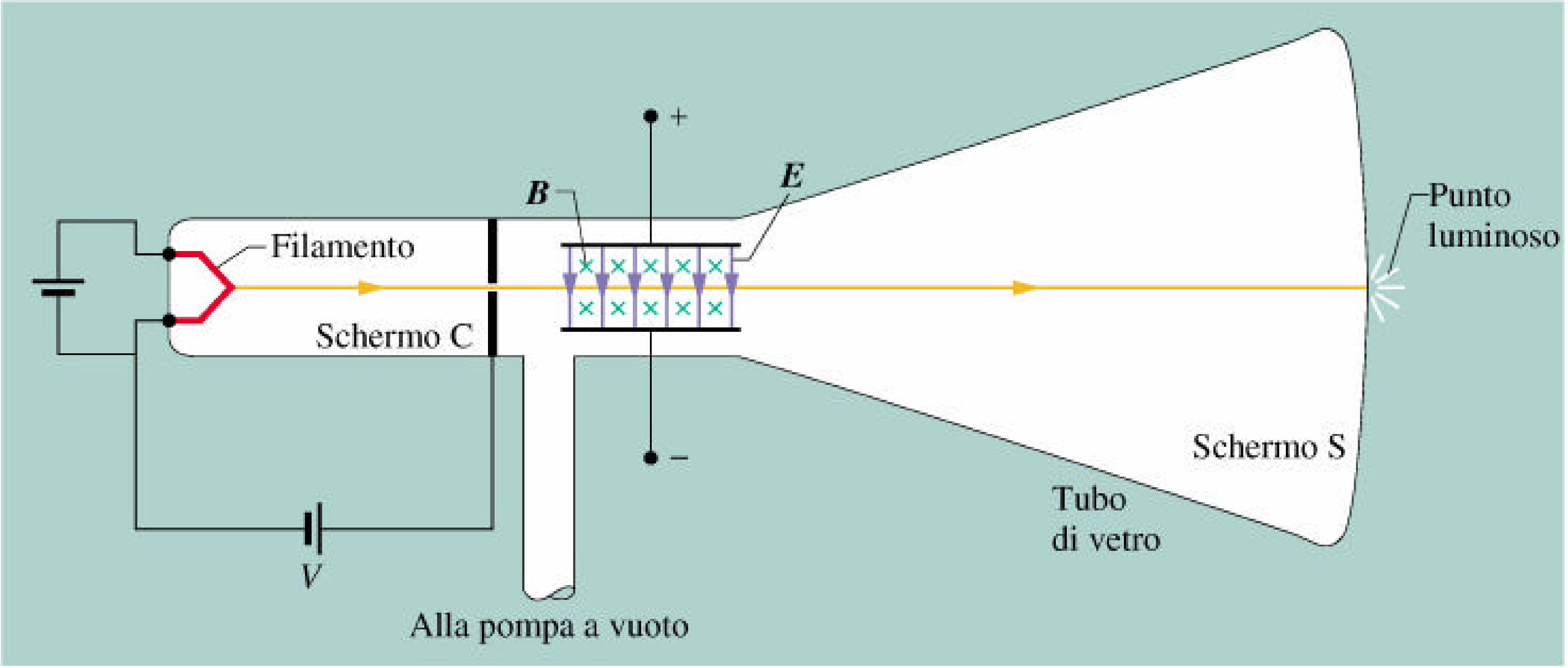
$$dF = i(dx \wedge B)$$

A sua volta, la corrente in un conduttore genera il campo magnetico:

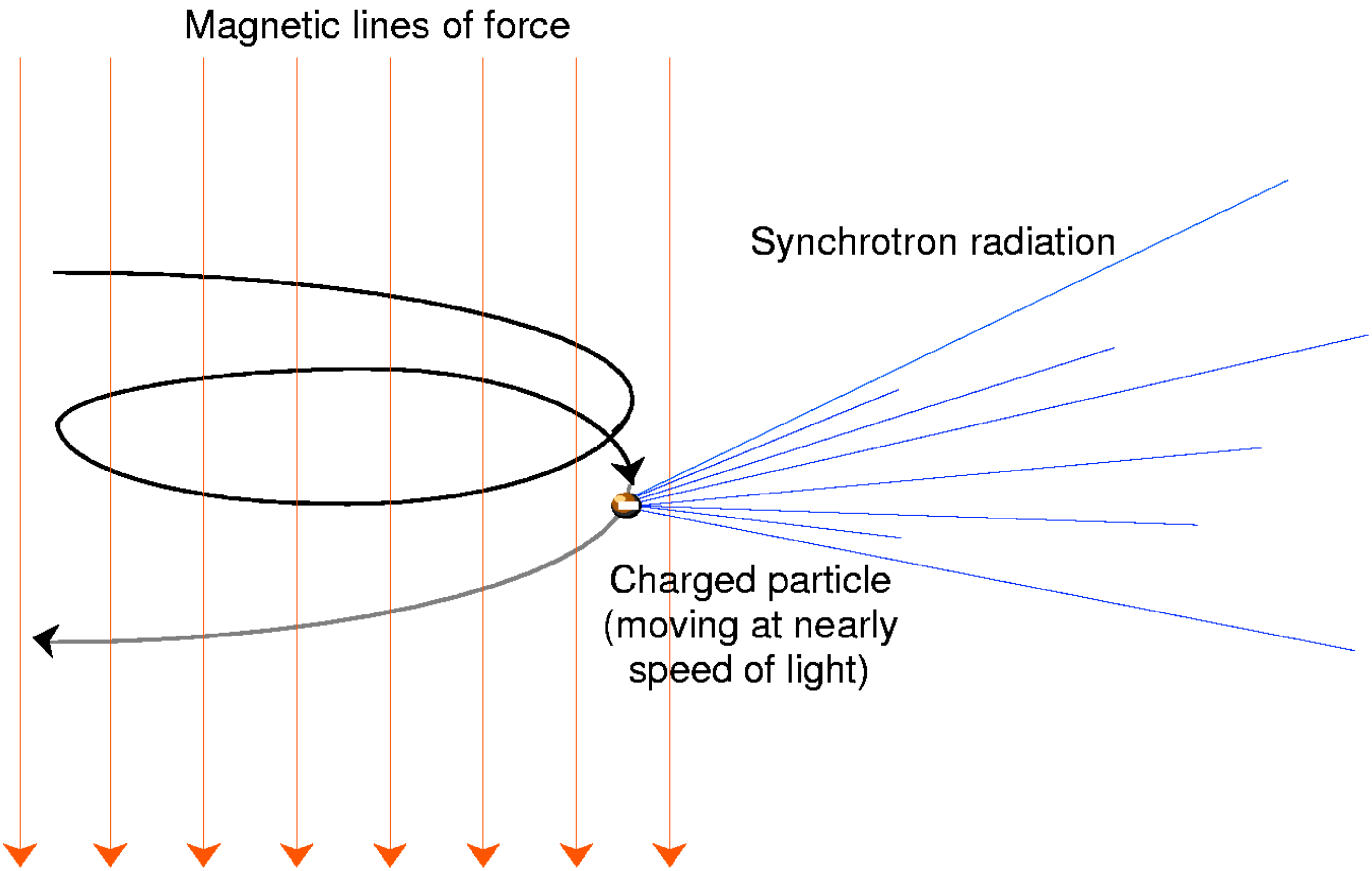
$$dB = \frac{m_r m_0}{4p}\left(idx \wedge \frac{\vec{r}}{r^3}\right)$$

che, per il teorema di Gauss applicato ad una superficie chiusa, comporta **? B·ndS = 0**.
Se si spezza S = S_1 + S_2 lungo una qualsiasi linea chiusa si deduce che l'induzione magnetica e\` la stessa per ogni superficie S_i.
Tra i conduttori percorsi da corrente i solenoidi (induttanze) hanno particolare importanza e tipico esempio sono i circuiti RL. La forza elettromotrice indotta e\` data da ε = - dF_c / dt.

effetto del campo elettrico e di quello magnetico sul moto di una particella carica

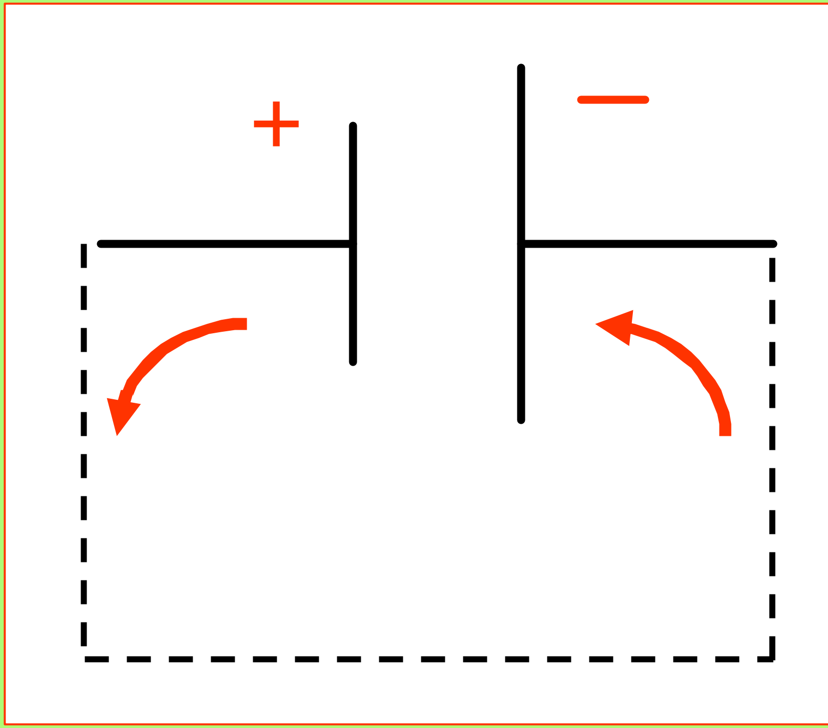


Emission of Synchrotron Radiation



i circuiti elettrici

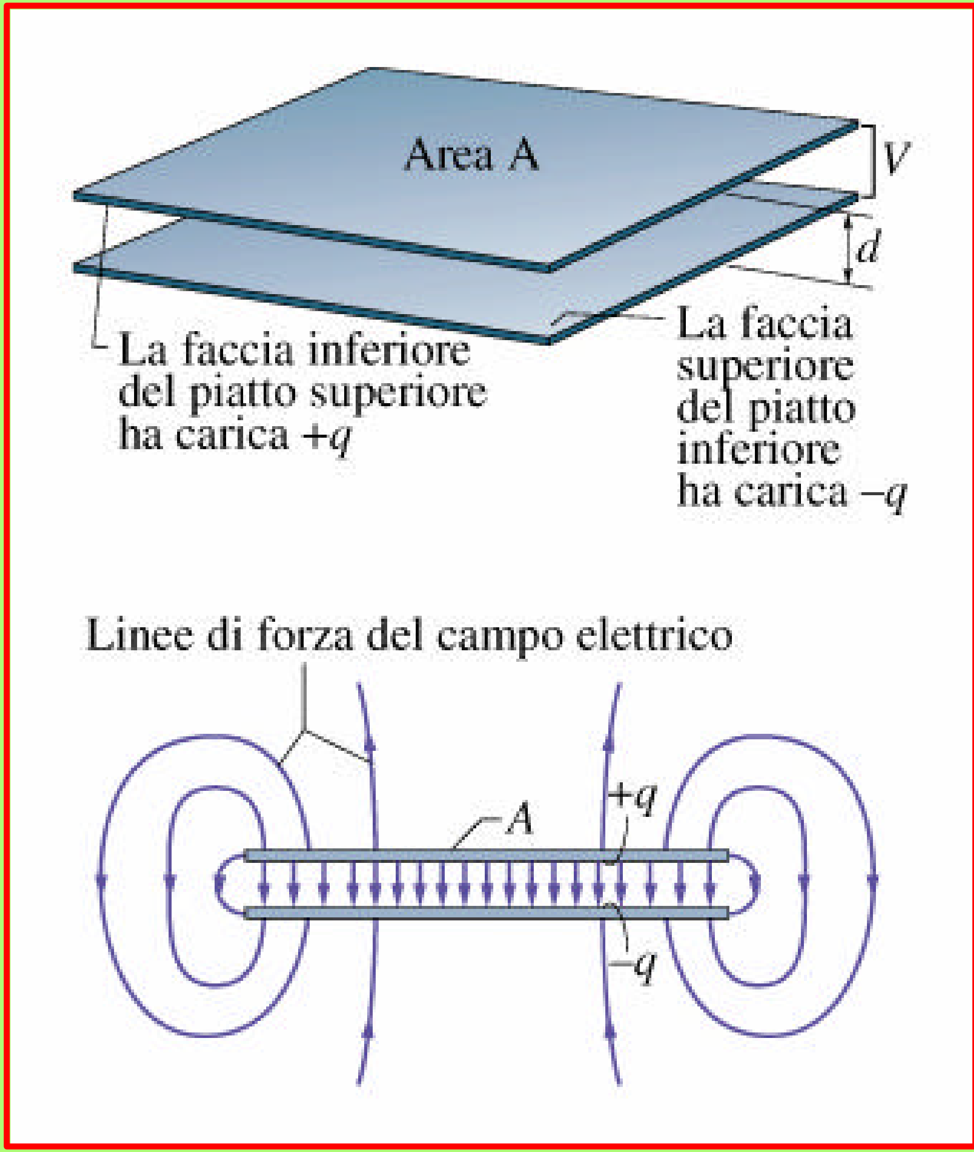
corrente $i = \dfrac{dq}{dt}$



La **corrente elettrica**, misurata in Ampere [1A = 1C / 1s], rappresenta il flusso di cariche ***positive*** attraverso la sezione di un conduttore ai cui capi e` applicata la differenza di potenziale $\mathbf{V = V_A - V_B}$.

un condensatore e` un componente dei circuiti in grado di accumulare su ogni armatura la carica q. Si definisce capacita` del condensatore il rapporto tra carica e tensione tra le armature:

$$\boxed{C = \frac{q}{V}}$$

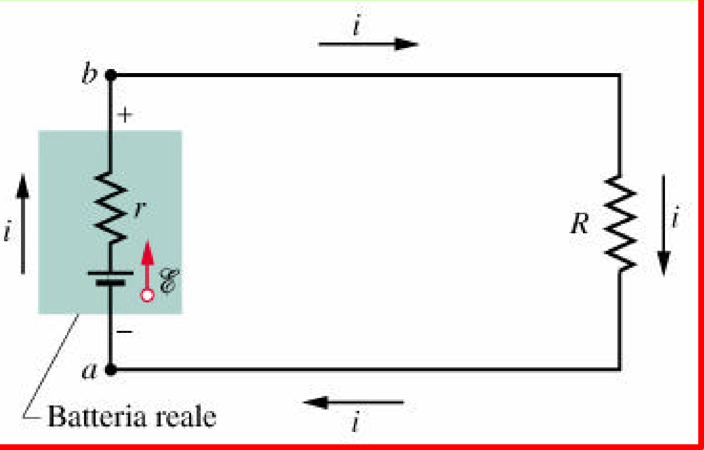


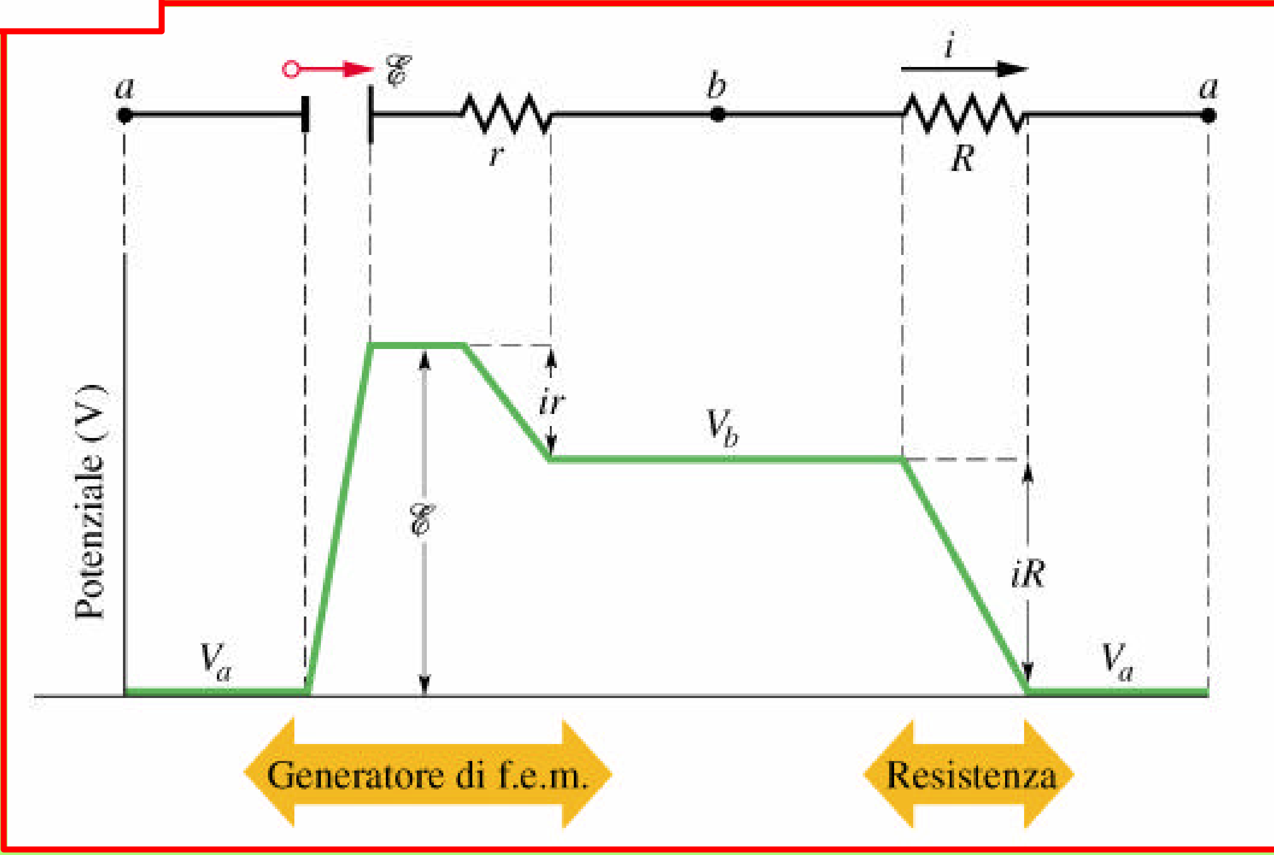
Le leggi di Ohm

$$V = Ri \qquad R = r\,\frac{l}{S}$$

forniscono la relazione tra il passaggio della corrente in un conduttore e la tensione applicata ai suoi capi. La grandezza R, misurata in [Ω], e` detta **resistenza** elettrica e la grandezza ρ, misurata in [Ω m], e` detta resistivita`. Il suo inverso, $\sigma = 1/\rho$, misurata in Siemens [$\Omega^{-1} m^{-1}$] e` detto conducibilita`

In un circuito le resistenze possono essere in serie o in parallelo. La resistenza interna r di un generatore di tensione (generatore ideale) si puo` spesso trascurare nel calcolo della **resistenza equivalente R_{eq}** di un circuito.


i
b
+
r
R
i
ℰ
−
a
Batteria reale
i


i
a
ℰ
b
a
r
R
ir
V_b
ℰ
iR
Potenziale (V)
V_a
V_a
Generatore di f.e.m.
Resistenza

Poiche` la corrente che attraversa resistenze in serie e` la stessa, la resistenza equivalente e` data da:

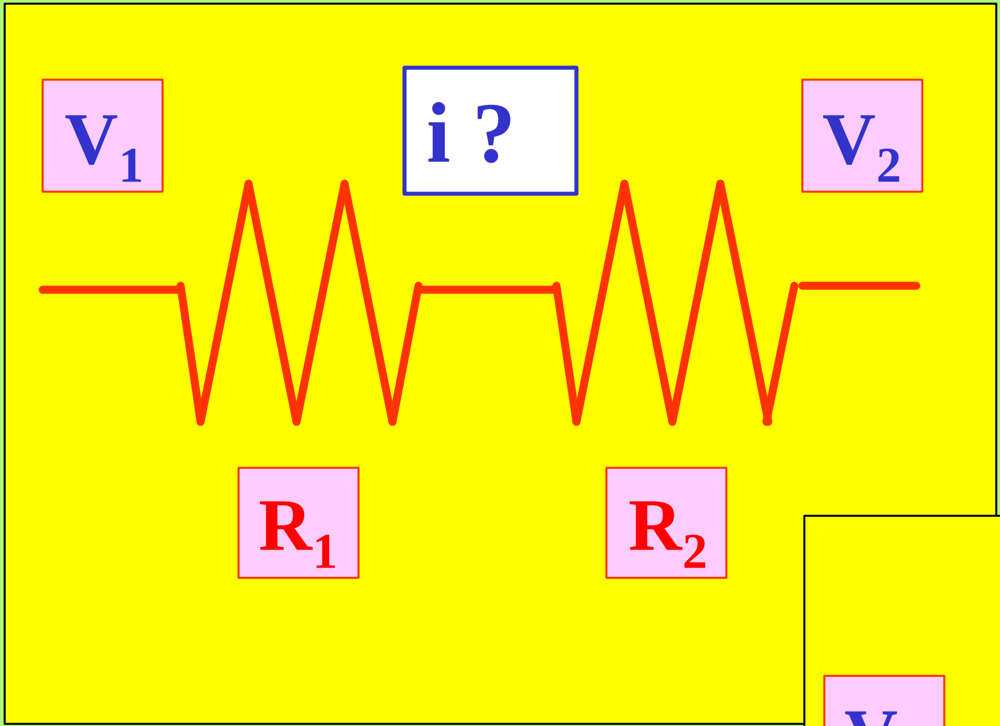
$$R_{eq} = \sum_i R_i$$

Resistenze in parallelo hanno invece la stessa differenza di potenziale ai loro capi e la corrente si suddivide tra i vari rami in modo inversamente proporzionale ai valori delle resistenze. In questo caso la resistenza equivalente e` data da:

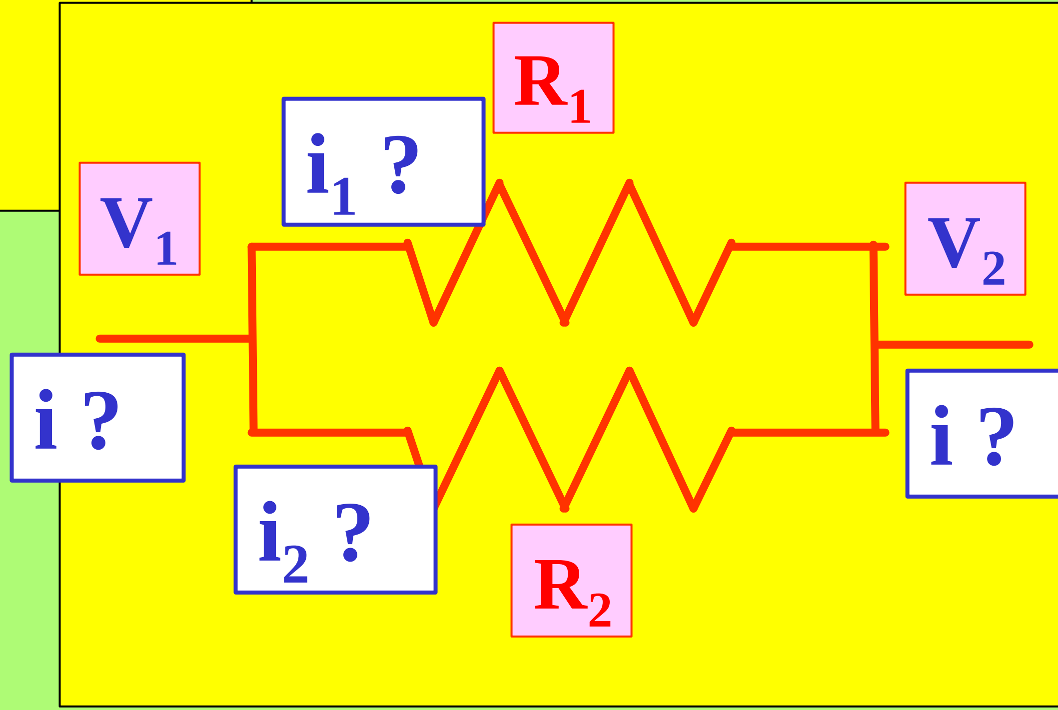
$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_i \frac{1}{R_i}$$

Per esempio, nel caso di 2 resistenze in parallelo la resistenza equivalente e`:

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



$$V = (R_1 + R_2)i$$



$$i = i_1 + i_2$$

$$R_1 i_1 = R_2 i_2$$

Per i condensatori vale le regola opposta: se in parallelo la capacita` totale e`:

$$C_{eq} = \sum_i C_i$$

se in serie la capacita` totale e`:

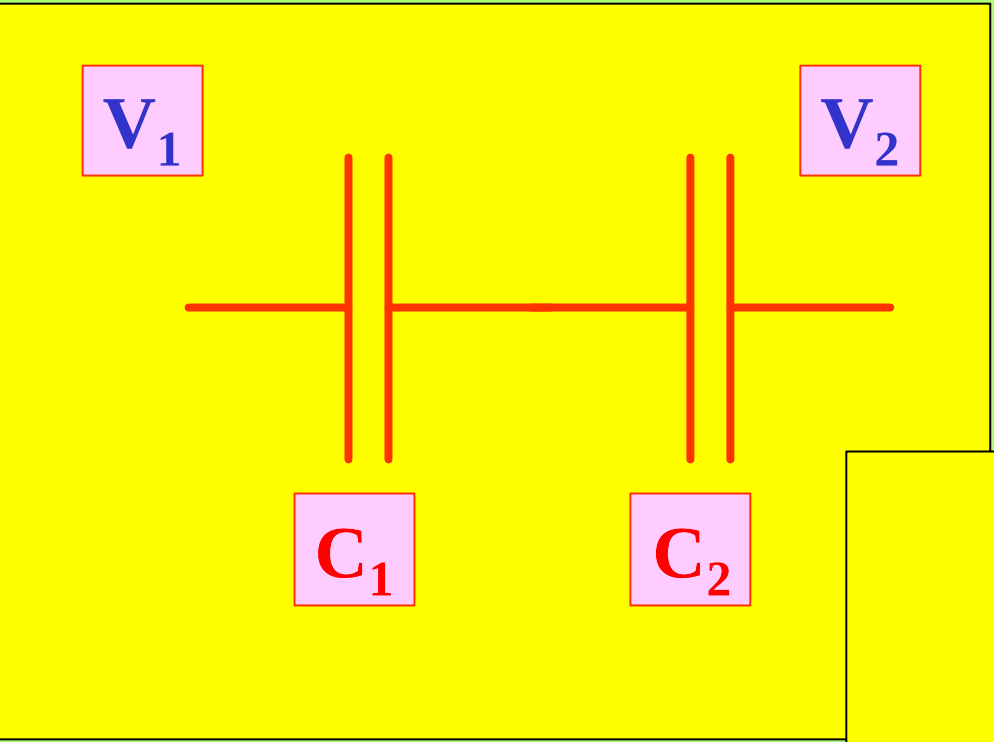
$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_i \frac{1}{C_i}$$

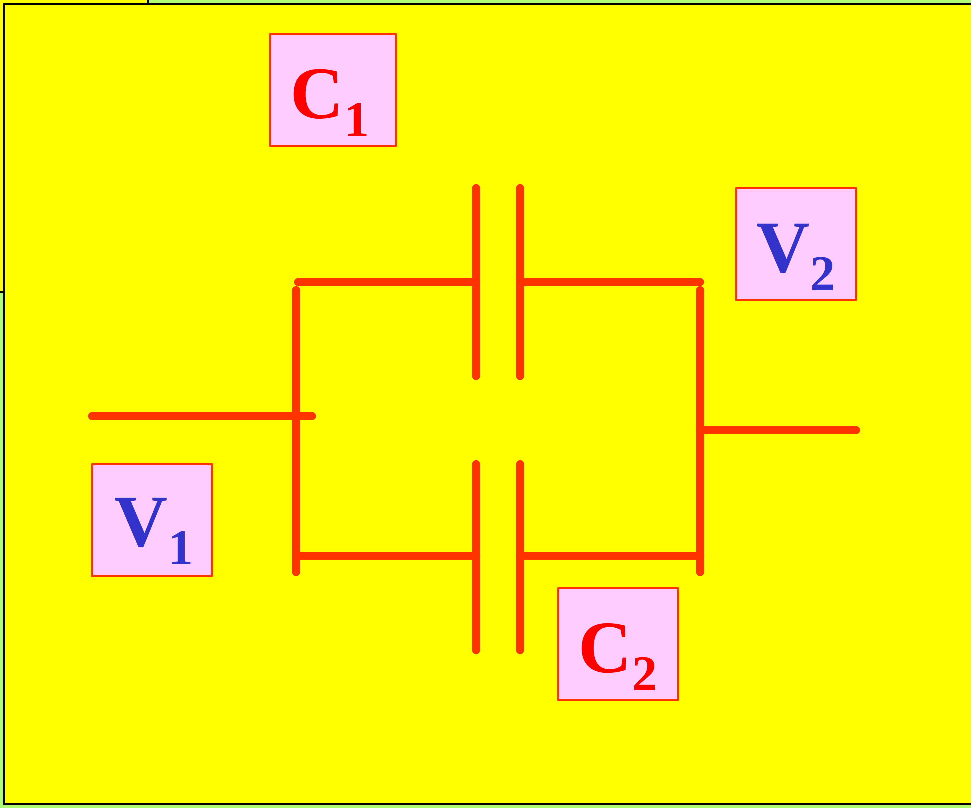
La capacita` di un condensatore dipende dalla costante dielettrica del mezzo interposto tra le armature e dalle sue caratteristiche geometriche.

$$C = \frac{|q|}{V_2 - V_1}$$

La capacita`, minima nel vuoto, si misura in farad [1F =1C / 1V] o nei suoi sottomultipli.

$$C = e_0 e_r \frac{S}{d}$$


V_1
V_2
C_1
C_2


C_1
V_2
V_1
C_2

Serie	Parallelo
Resistenze	
$R_{eq} = \sum_{j=1}^{n} R_j$	$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{R_j}$
Stessa corrente attraverso tutte le resistenze	Stessa differenza di potenziale ai capi di tutte le resistenze

Serie	Parallelo
Condensatori	
$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{C_j}$	$C_{eq} = \sum_{j=1}^{n} C_j$
Stessa carica in tutti i condensatori	Stessa differenza di potenziale ai capi di tutti i condensatori

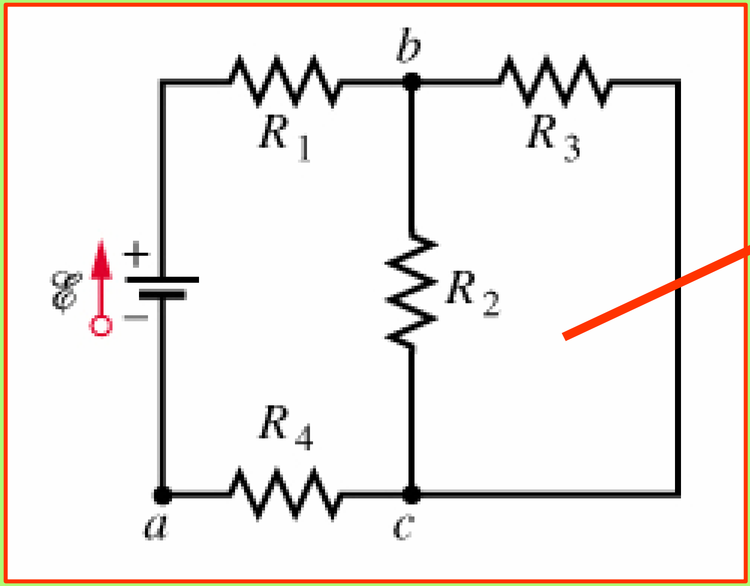
La semplificazione e risoluzione di un circuito elettrico si ottiene applicando alcuni teoremi (per esempio quelli di Thevenin e di Norton). Un circuito si puo` semplificare in un circuito equivalente applicando le **leggi di Kirchoff**:

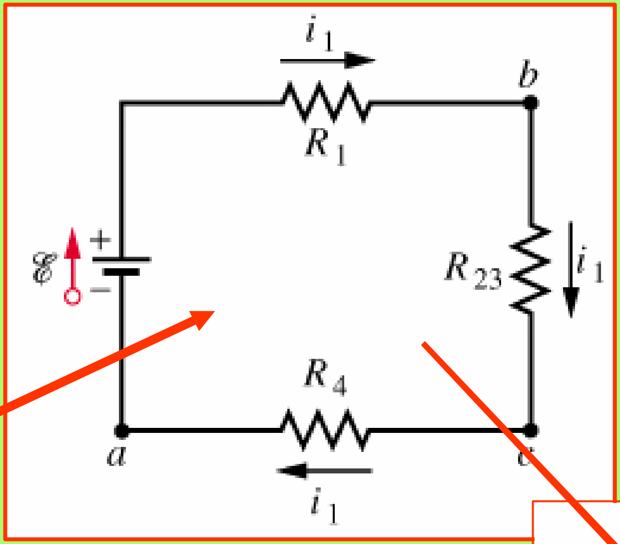
• ***prima legge*** (**dei nodi**): in un nodo la somma algebrica delle correnti e` nulla,

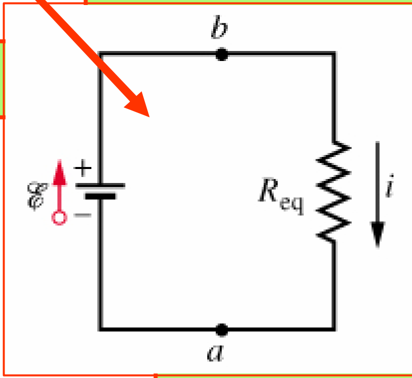
• ***seconda legge*** (**delle maglie**): in una maglia la somma algebrica delle tensioni e` nulla.

Deve valere il ***Principio di sovrapposizione***: se in una rete sono presenti piu generatori di tensione, la corrente in un ramo e` la somma delle correnti prodotte dai singoli generatori.

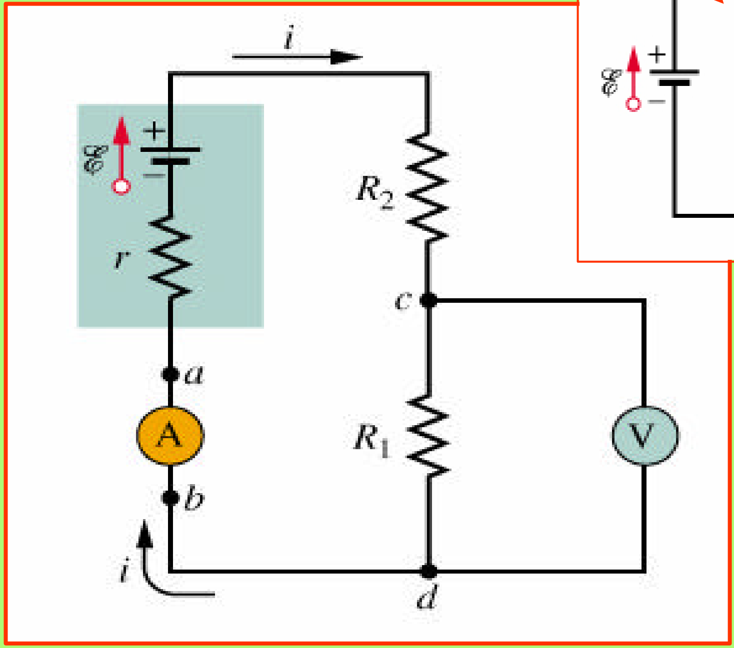
semplificazione di un circuito







circuito a maglia singola che mostra come collegare un amperometro e un voltmetro



Applicazione del principio di sovrapposizione

Per esempio, si abbia il circuito a 2 maglie, con:

$E_1 = 3$ V, $E_2 = 6$ V

$R_1 = 2$ W, $R_2 = 4$ W

Per le leggi di Kirchoff:

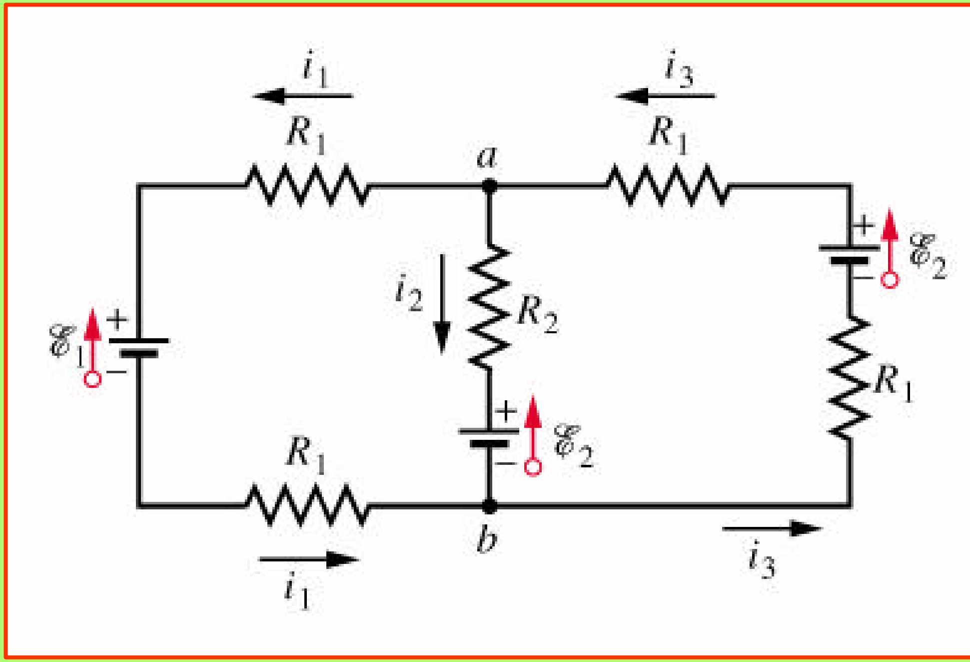
nel nodo a: $i_3 = i_1 + i_2$,

nella maglia di sinistra

$-i_1R_1-E_1-i_1R_1+E_2+i_2R_2=0$

nella maglia di destra:

$-i_3R_1-E_2-i_3R_1+E_2+i_2R_2=0$



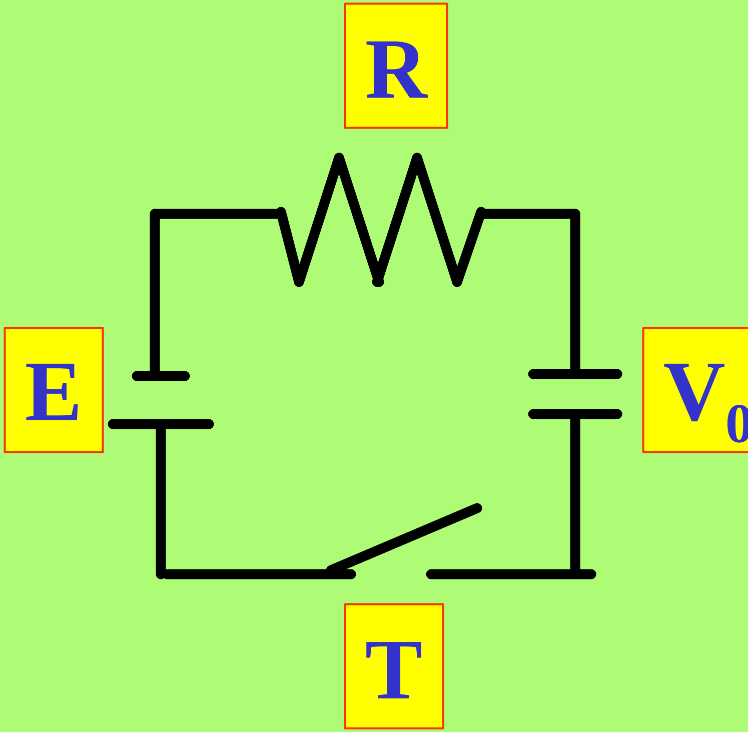
I segni delle correnti e il verso di percorrenza delle maglie sono stati scelti in modo arbitrario. Risolvendo il sistema di equazioni si ricavano le correnti e il loro verso in ogni ramo del circuito.

Effetto Joule: il lavoro $L = q(V_A-V_B) = q\Delta V$ prodotto dallo spostamento di una carica elettrica tra due punti del campo elettrostatico puo` essere espresso in termini di passaggio della corrente elettrica $i = q/t$ in un conduttore di resistenza $R=\Delta V/i$.

Si ottiene cosi` $L = Ri^2t$ e l'energia termica associata a questo lavoro $Q = Ri^2t/J$ (J equivalente meccanico del calore: 1 cal = 4,186 J) viene dispersa nell'ambiente sotto forma di calore.

Potenza: per definizione la potenza associata al lavoro e` $P = L/t = Ri^2 = V^2/R = Vi$. Si noti che la potenza si misura in watt (o kW) mentre il kWh e` un lavoro, o l'energia elettrica utilizzata per compiere il lavoro.

Circuito RC
(continuita` in tensione)



Supponiamo che, a tasto aperto, sia $V_C = V_0$.
Poiche`:

$$\boxed{i = C\frac{dV_C}{dt}}$$

alla chiusura del tasto, per la legge di Kirchoff sulle maglie, si deve avere: $E = V_R + V_C = RCdV_C/dt + V_C$, da cui, posto **RC = t** (***costante di tempo***), si ottiene:

$$(E - V_C)dt = RCdV_C \text{ ossia } \frac{dV_C}{(E - V_C)} = \frac{1}{t}dt$$

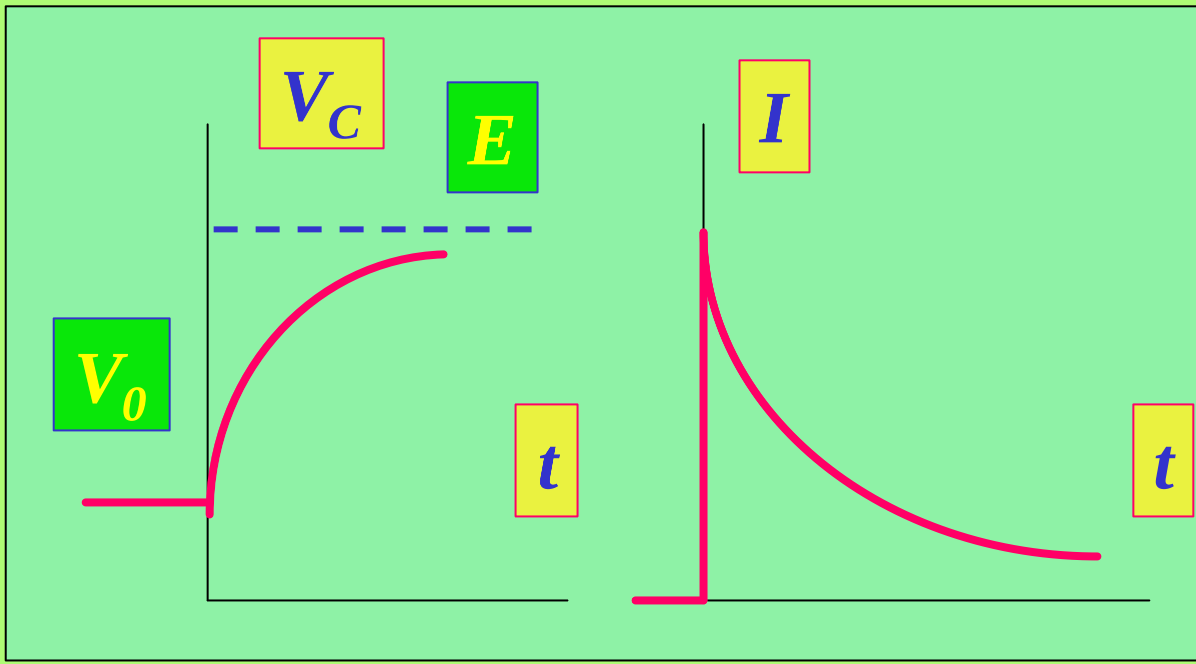
da cui, integrando, si ha:

$$\log(V_C - E) = -\frac{t}{t} + A \text{ con } t = \mathrm{RC}, \mathrm{e}\ \mathrm{A} = \log(V_0 - E)$$

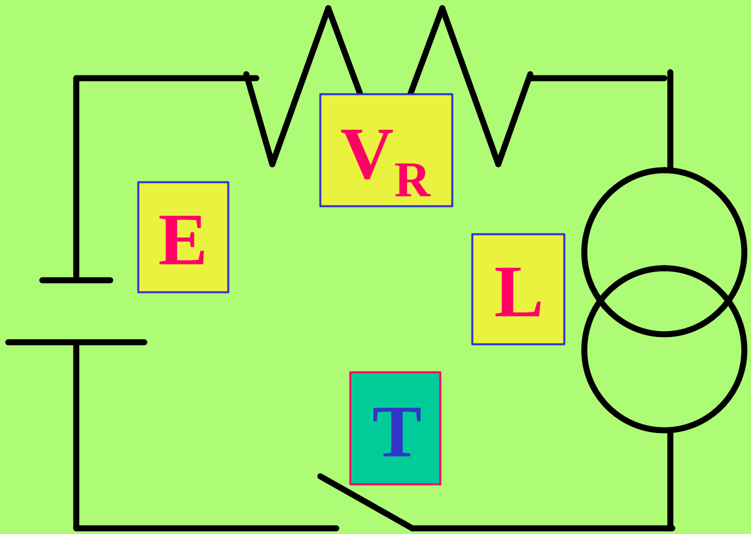
$$V_C = E - (E - V_0)e^{-t/t}, \qquad \mathrm{se}\, V_0 = 0,\ V_C = E(1 - e^{-t/t}),$$

$$i = C\frac{dV_C}{dt} = \frac{E}{R}e^{-t/t}$$

Quindi si ha continuita` in tensione:



Circuito RL
(continuita` in corrente)



si ha: $$V_L = L\frac{di}{dt}$$

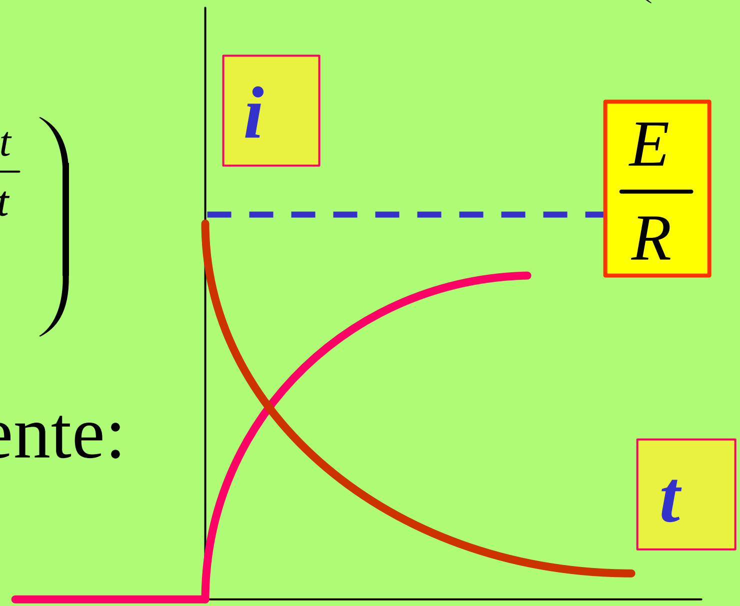
Per la legge di Kirchoff sulle maglie alla chiusura del tasto si deve avere E – Ri - Ldi/dt = 0. Da questa, dividendo per R e posto **L/R = t** (***costante di tempo***), si ottiene:

$$\left(i - \frac{E}{R}\right)dt = -\frac{L}{R}di, \text{ ossia } \frac{di}{\left(i - \frac{E}{R}\right)} = -\frac{1}{t}dt$$

da cui, integrando e ricordando che i = 0 per t = 0, si ottiene:

$$\ln\left(i-\frac{E}{R}\right)=-\frac{t}{t}+A, \text{ con } t=\frac{R}{L} \text{ e } A=\ln\left(-\frac{E}{R}\right)$$

$$\frac{i-E/R}{-E/R}=e^{-\frac{t}{t}}, \text{ ossia } i(t)=\frac{E}{R}\left(1-e^{-\frac{t}{t}}\right)$$

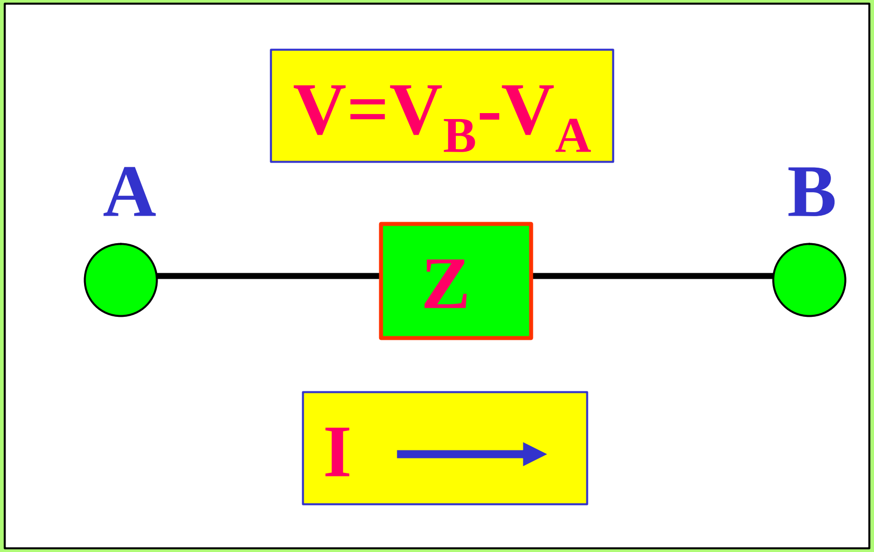


Quindi si ha continuita` in corrente:

$$V_R = Ri = E(1-e^{\frac{t}{t}}), \quad V_L = E - V_R = Ee^{\frac{t}{t}}$$

Anche V_R e` continua, mentre $V_L$ e`discontinua. In condizioni stazionarie (di/dt = 0) e` come se l'induttanza non esistesse; all'inizio, invece, L si oppone alle variazioni di corrente.

circuiti alimentati a corrente alternata



In questo caso si deve considerare anche la fase tra corrente e tensione.

In ogni circuito valgono le leggi di Ohm (V = ZI) e di Kirchoff (per maglie e nodi). L'**impedenza** Z e` data da resistenze **Z = R**, induttanze **Z = j$\omega$L** o capacita` **Z = -j/ωC**. In circuiti puramente resistivi, la corrente e la tensione sono in fase, nelle induttanze la tensione anticipa la corrente, nei condensatori la corrente anticipa la tensione.

1) R, puramente dissipativo,
non introduce spostamenti di fase

$$V = Ri$$

2)
$$V = L\frac{di}{dt} = L\frac{d}{dt}\left(i_0 e^{jwt}\right) = Li_0\, jwe^{jwt} = jwLi$$

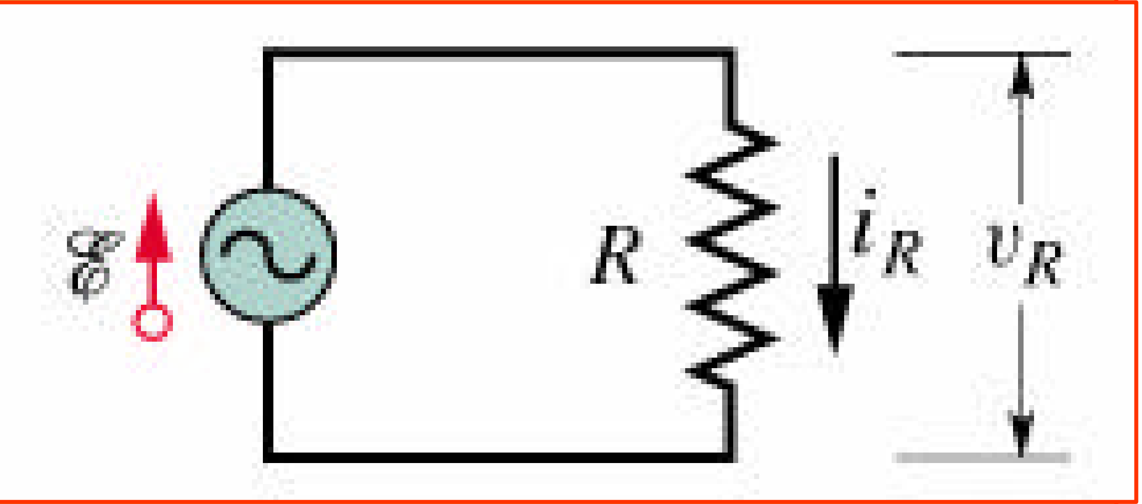
(anticipo di fase)

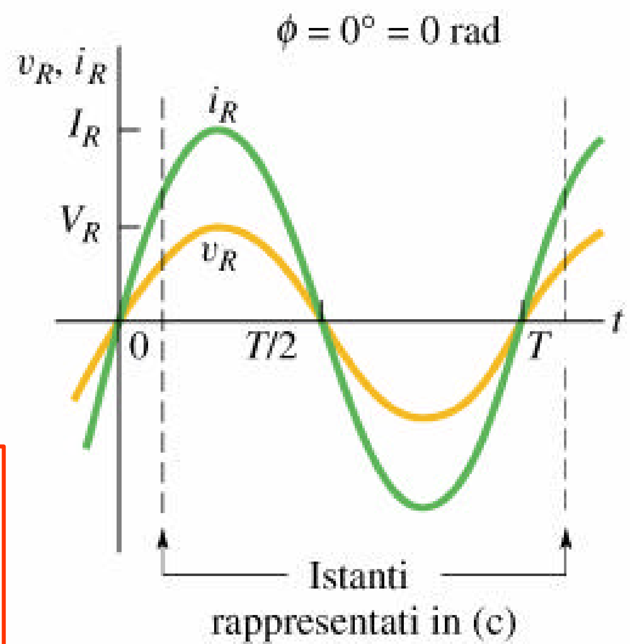
3)
$$V = \frac{Q}{C};$$

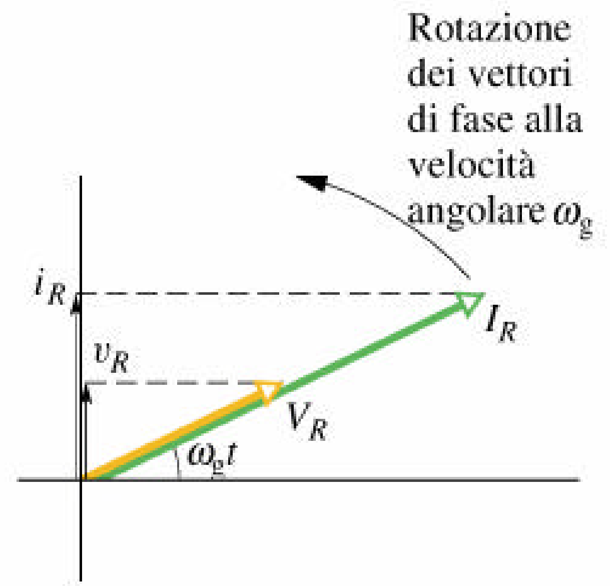
$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C}\frac{dQ}{dt} = \frac{i}{C};$$

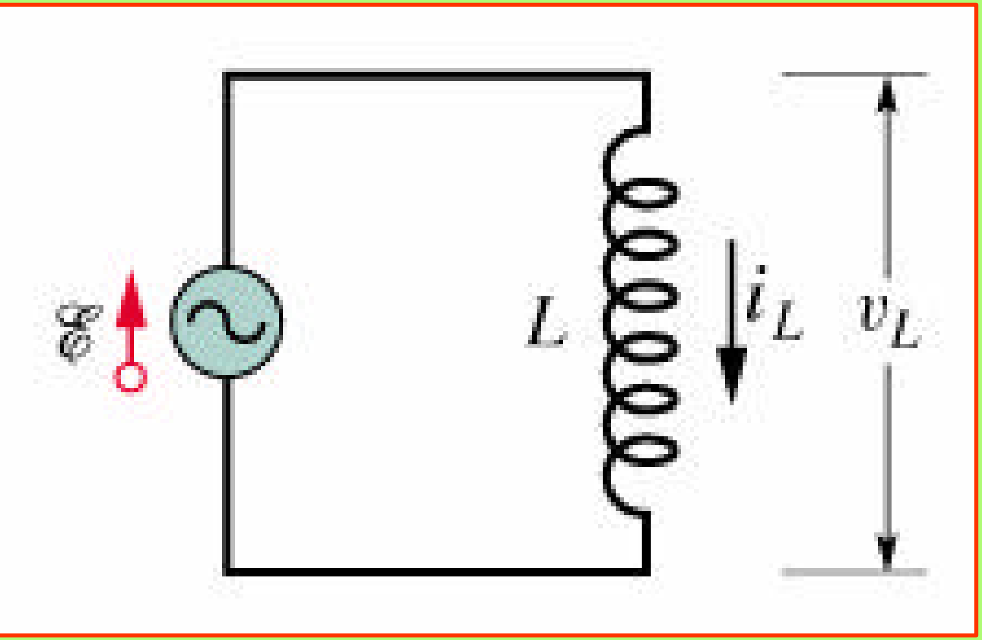
$$i = C\frac{dV}{dt} = C\frac{d}{dt}\left(V_0 e^{jwt}\right) = CV_0\, jwe^{jwt} = jwCV$$

quindi
$$V = \frac{1}{jwC}i = -\frac{j}{wC}i$$
(ritardo di fase)

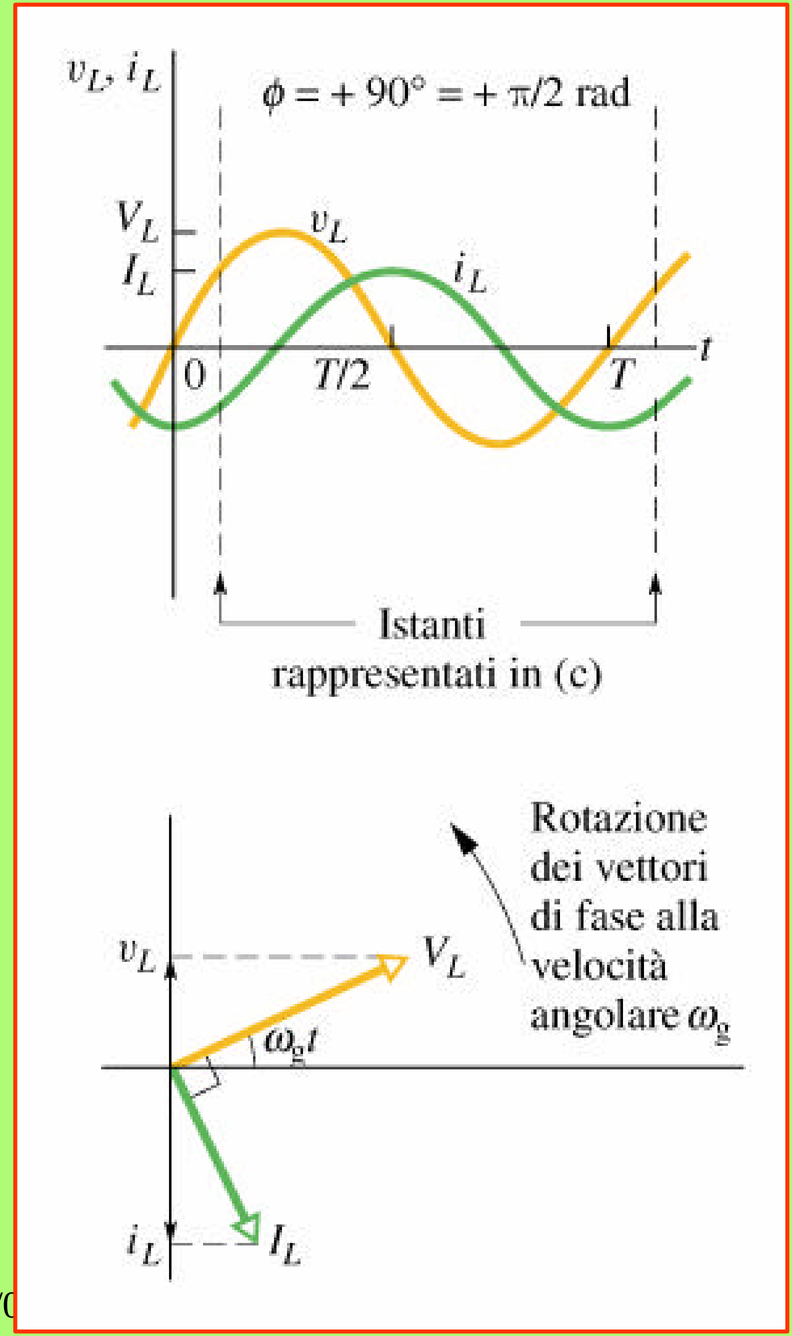

R
i_R
v_R


$\phi = 0° = 0$ rad
v_R, i_R
i_R
I_R
V_R
v_R
0
T/2
T
t
Istanti rappresentati in (c)

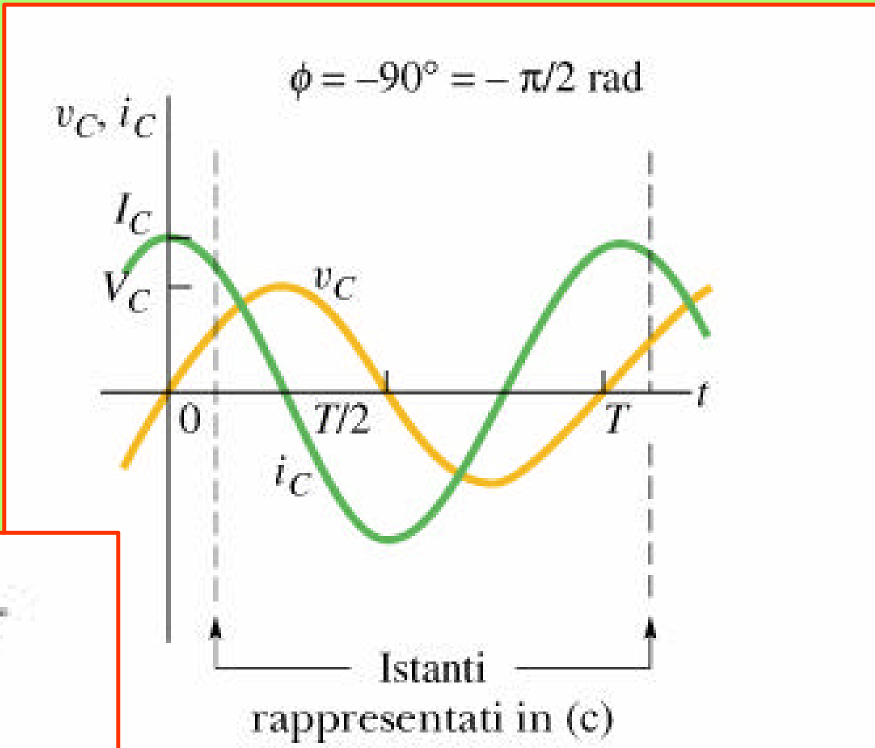

Rotazione dei vettori di fase alla velocità angolare ω_g
i_R
I_R
v_R
V_R
$\omega_g t$



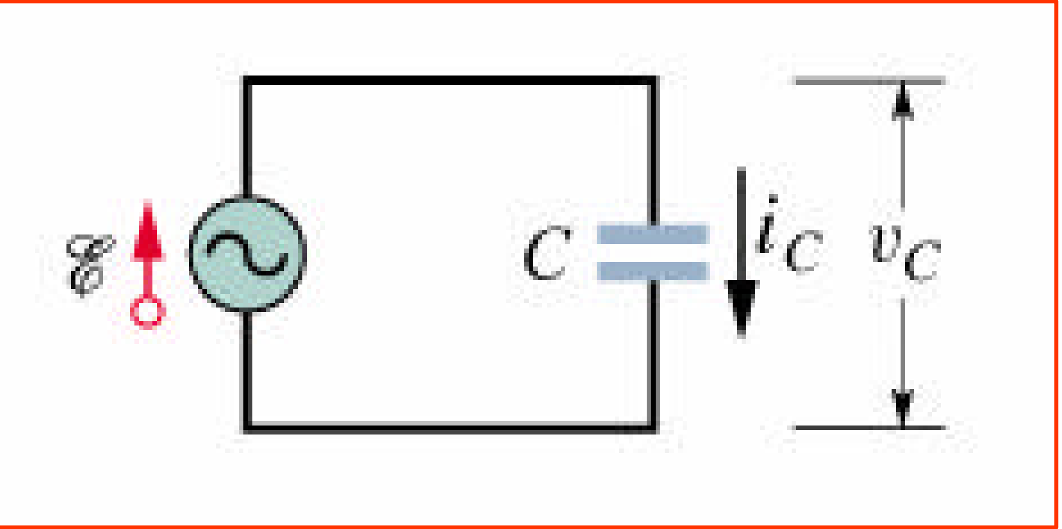
ℰ
L
i_L
v_L



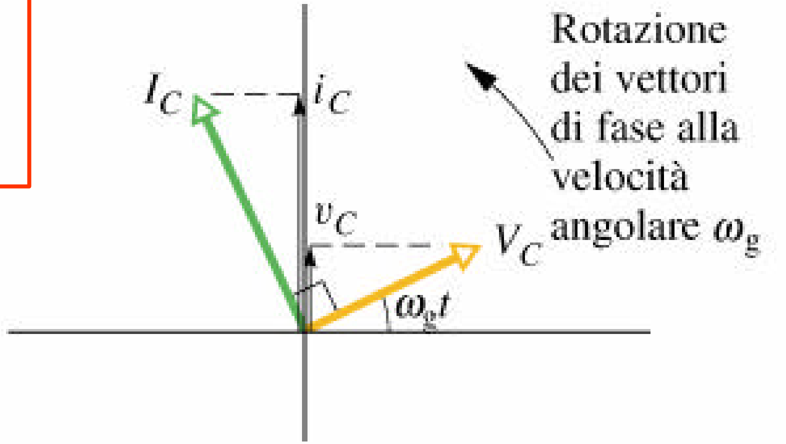
v_L, i_L
$\phi = +90° = +\pi/2$ rad
V_L
I_L
v_L
i_L
0
T/2
T
t
Istanti rappresentati in (c)
Rotazione dei vettori di fase alla velocità angolare ω_g
v_L
V_L
$\omega_g t$
i_L
I_L



$\phi = -90° = -\pi/2$ rad
v_C, i_C
I_C
V_C
v_C
0
$T/2$
T
t
i_C
Istanti
rappresentati in (c)



$\mathscr{E}$
C
i_C
v_C



I_C
i_C
v_C
V_C
$\omega_g t$
Rotazione
dei vettori
di fase alla
velocità
angolare ω_g

FILTRI

Circuiti RC o RL alimentati a corrente alternata funzionano come filtri in frequenza:

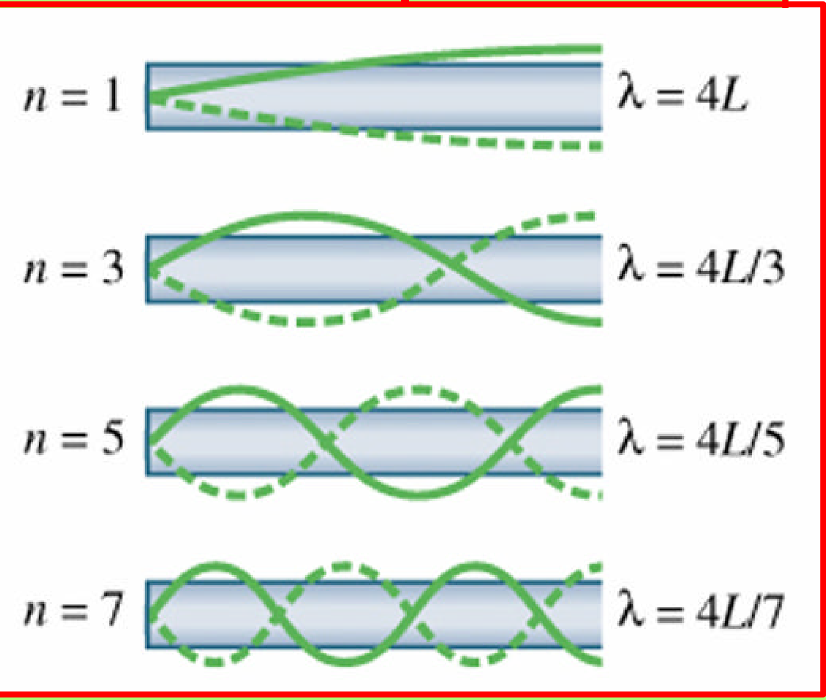
- Il **filtro passa basso** si ha prendendo l'uscita ai capi del condensatore nel circuito RC, o ai capi della resistenza nel circuito RL.
- Il **filtro passa alto** si ha prendendo l'uscita ai capi della resistenza nel circuito RC, o ai capi dell'induttanza nel circuito RL.
- I **filtri passa banda** e **sopprimi banda** sono una combinazione dei due filtri precedenti.

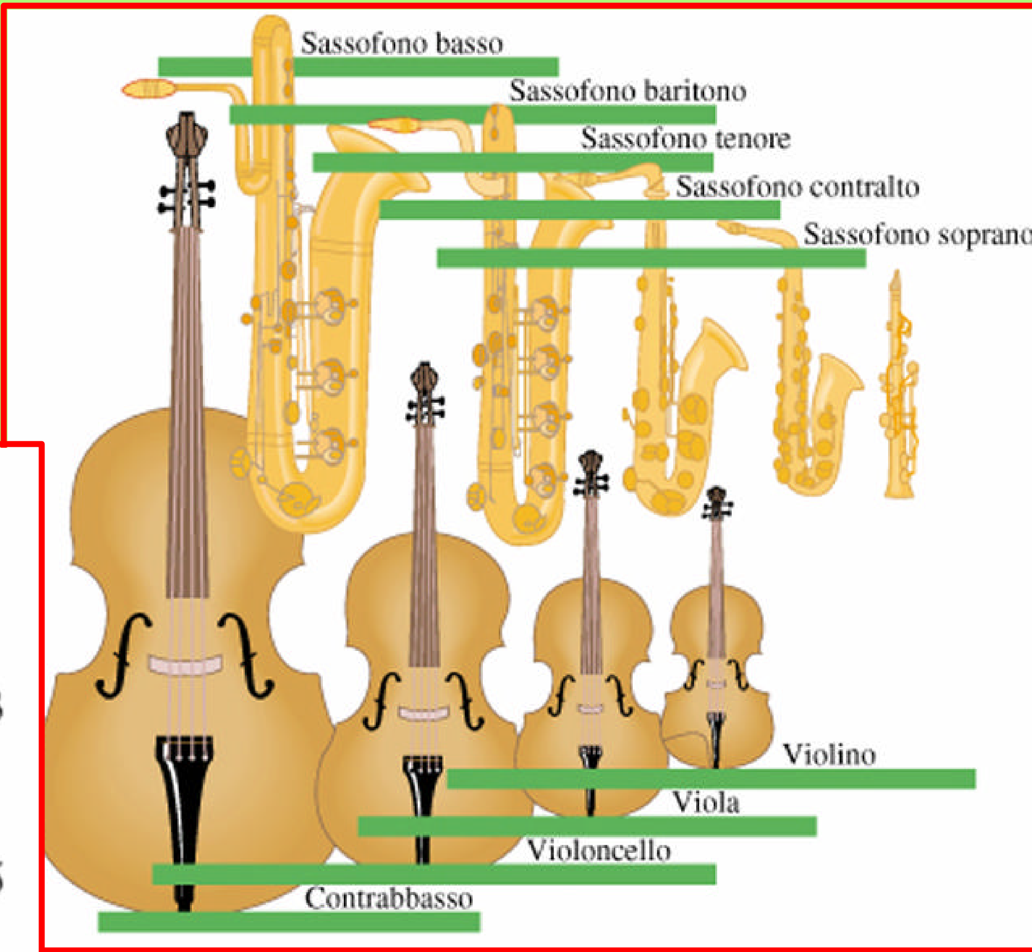
FENOMENI ONDULATORI

Le onde sono **vibrazioni** (possono essere di tipo elastico, meccanico o acustico) che si propagano in un mezzo, oppure sono onde elettromagnetiche che si propagano anche nel vuoto (oltre che in un mezzo).
Le onde possono essere ***longitudinali*** se oscillano lungo la direzione di propagazione, oppure ***trasversali*** se oscillano in direzione perpendicolare alla loro propagazione.

Onde sonore

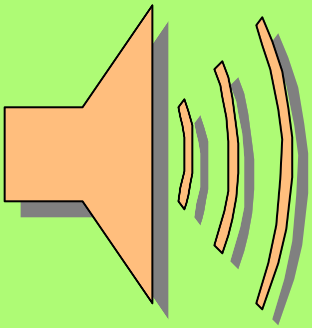
$$L = n\frac{l}{4}$$





FENOMENI SONORI

I suoni sono onde longitudinali, **di pressione**, che si propagano in un mezzo ma non nel vuoto.



Nel S.I. l'intensita` di un suono (che si misura in W/m$^2$), di ampiezza A e frequenza $\nu$, che si propaga alla velocita` V in un mezzo di densita` $\rho$, e` definita da: $\mathbf{I = 2\pi^2 V \rho A^2 \nu^2}$

Tuttavia, poiche` i sensi dell'uomo (udito e vista) hanno risposta logaritmica allo stimolo a cui sono sottoposti, vengono anche usate altre unita` di misura: le magnitudini in astronomia e i decibel in acustica.

L'intensita` del suono si misura in decibel [dB] dalla **soglia di udibilita`** $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2. La relazione tra l'intensita` di un suono I e il suo livello β in decibel e`:

$$b = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

(per es. se I = 10^{-4} W/m^2, β = 80 dB).
La **soglia del dolore** e` data da ~ 1 W/m^2.

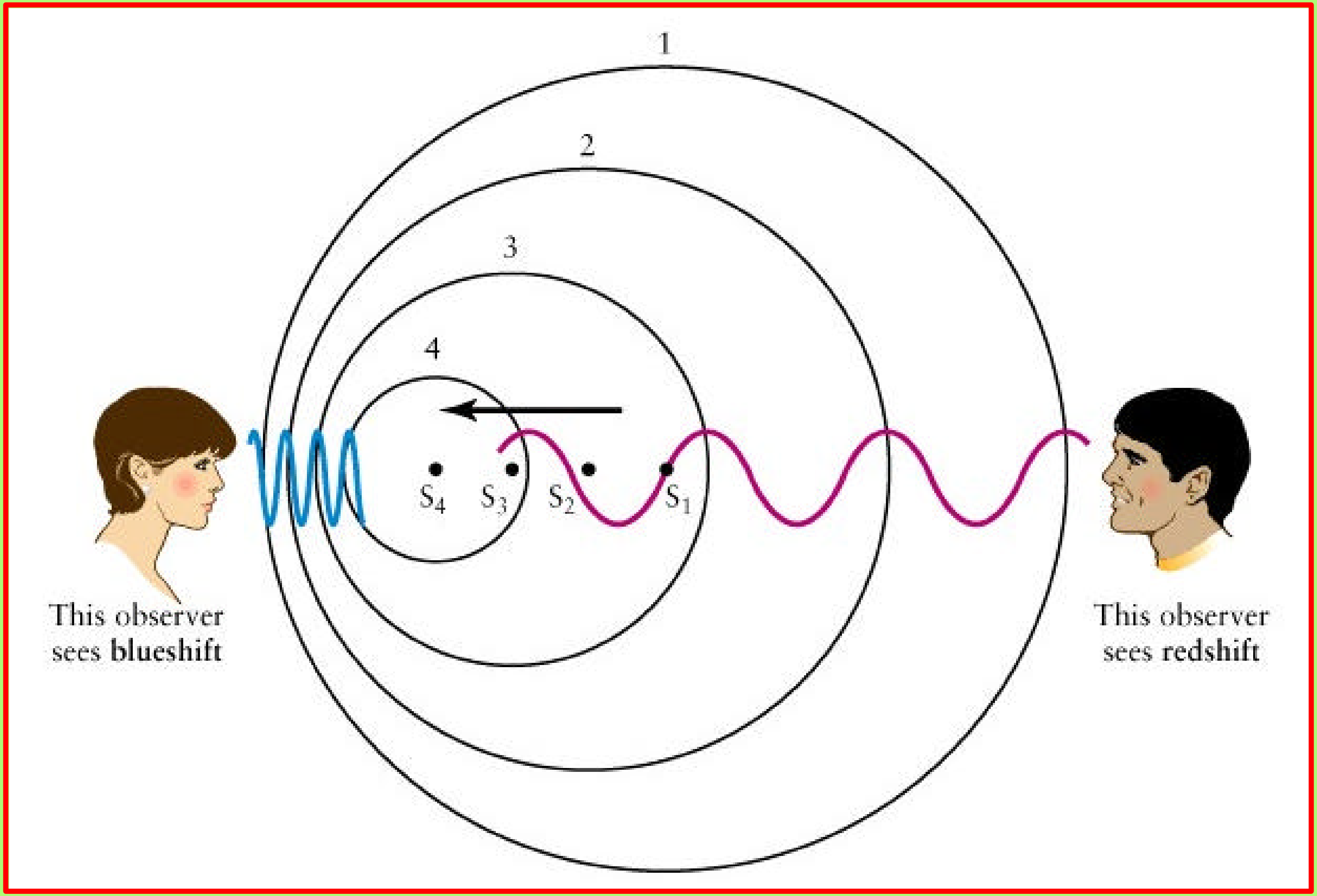
I suoni sono classificati come acuti (ν alta) o gravi (ν bassa). L'orecchio umano ha sensibilita` in frequenza tra ν ~ 40 Hz e ν ~ 20 kHz.

Nelle onde (elettromagnetiche o sonore) si ha l'**effetto Doppler** che, nei due casi vale:

$$\frac{\Delta l}{l} = \pm \frac{v}{c}$$

$$n = n_0 \frac{V}{V \pm v}$$

La frequenza della luce cambia per il moto relativo tra sorgente e osservatore



SULLA NATURA DELLA LUCE

Ippocrate e **Aristotele** pensavano che l'occhio emettesse raggi per mezzo dei quali potesse “sentire” gli oggetti

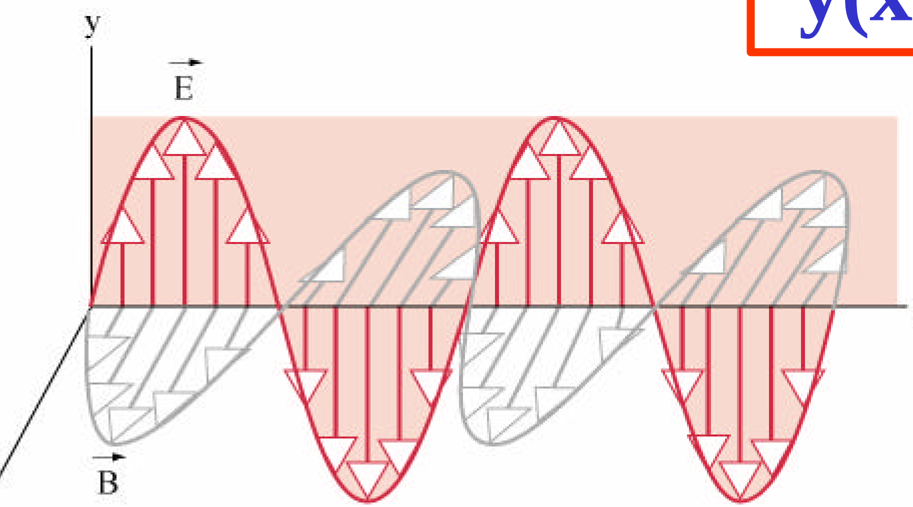
Secondo **Galeno** (II secolo d.c.), l'occhio proietta uno “spirito visuale” per mezzo del quale il mondo esterno viene percepito

Keplero e **Cartesio** agli inizi del ‘600 svilupparono la conoscenza della rifrazione della luce

Newton sviluppò una teoria corpuscolare della radiazione, considerando cioè la luce come formata di particelle

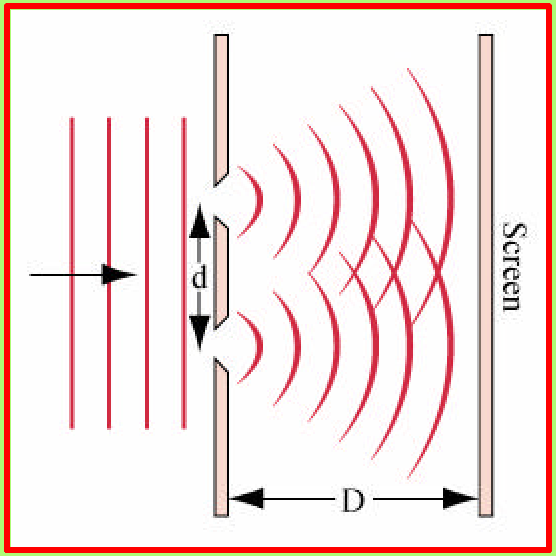
Nello stesso periodo **Huygens** compì una serie di esperimenti che dimostrarono che la luce ha caratteristiche di onda (diffrazione e interferenza)

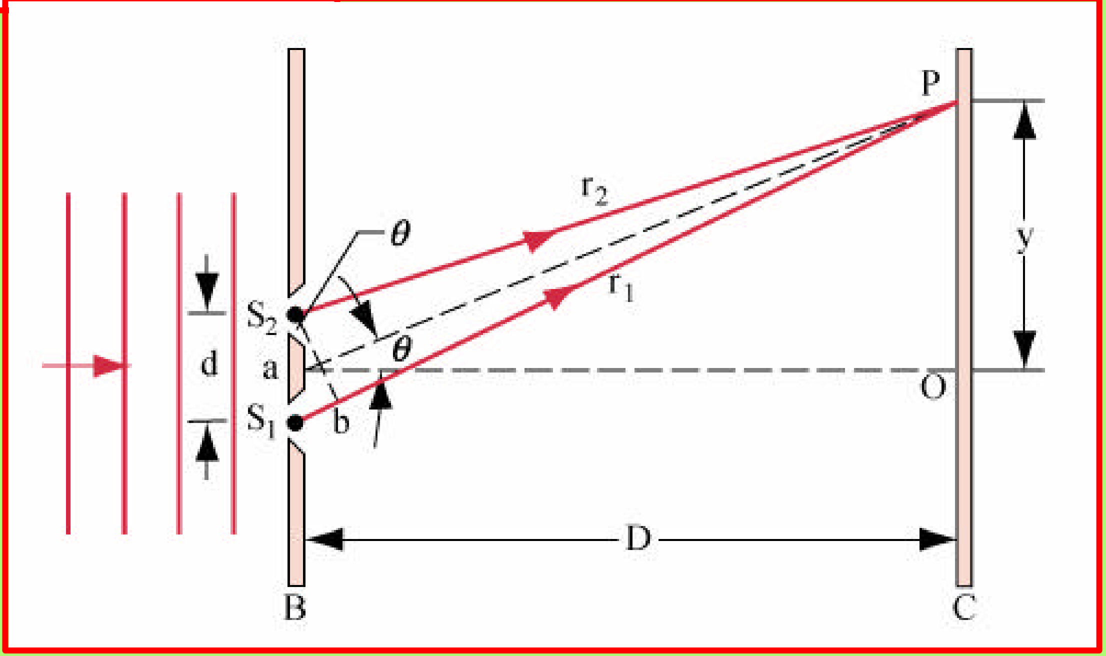
$$y(x,t) = A \sin[2\pi(x/\lambda - t/T)]$$



$$y(x,t) = y_m \sin(kx-\omega t),$$

La luce deve avere natura ondulatoria



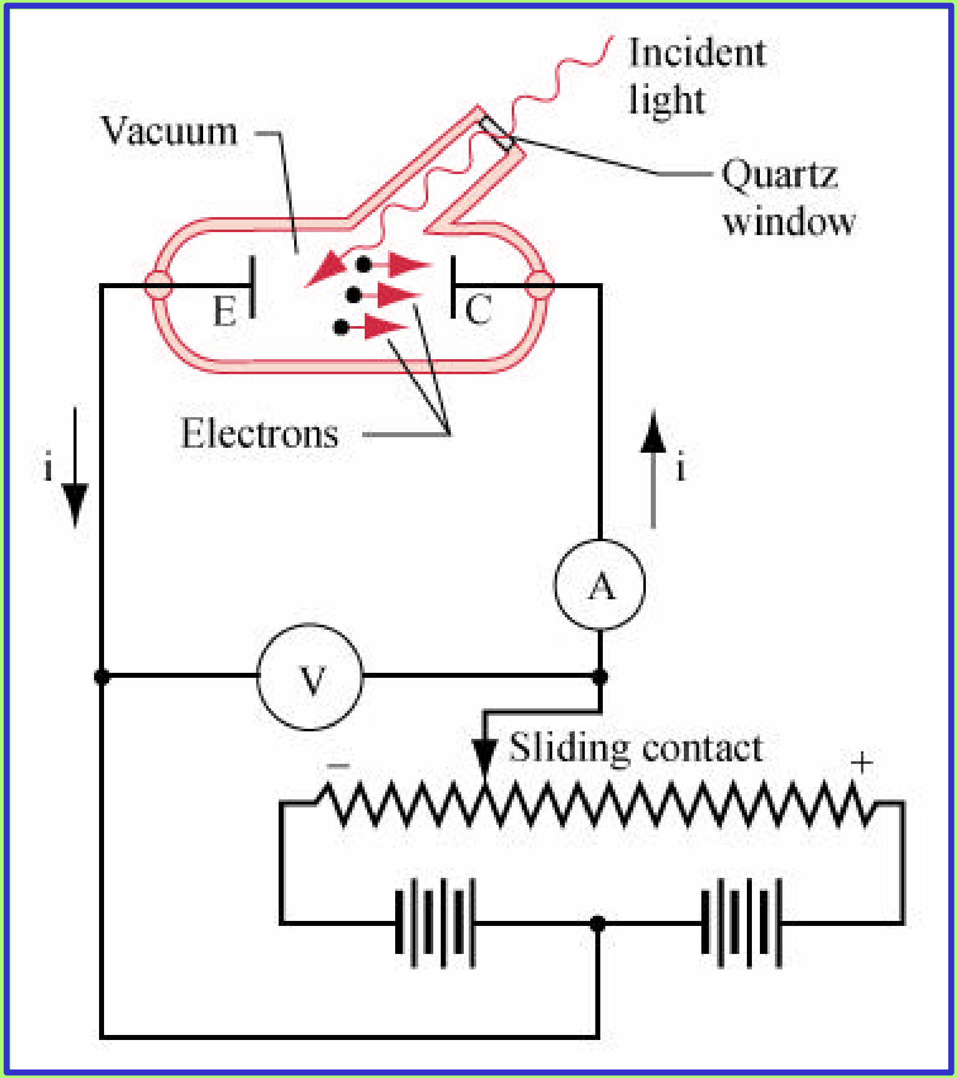


Nel 1900 Planck propose che **la radiazione fosse quantizzata**, ossia composta di **quanti di energia multipli di un valore minimo** e_0 (ossia $n\varepsilon_0$, con $n \geq 1$). La teoria di Plank sulla radiazione permise di spiegare **l'effetto fotoelettrico** e **l'effetto Compton**.

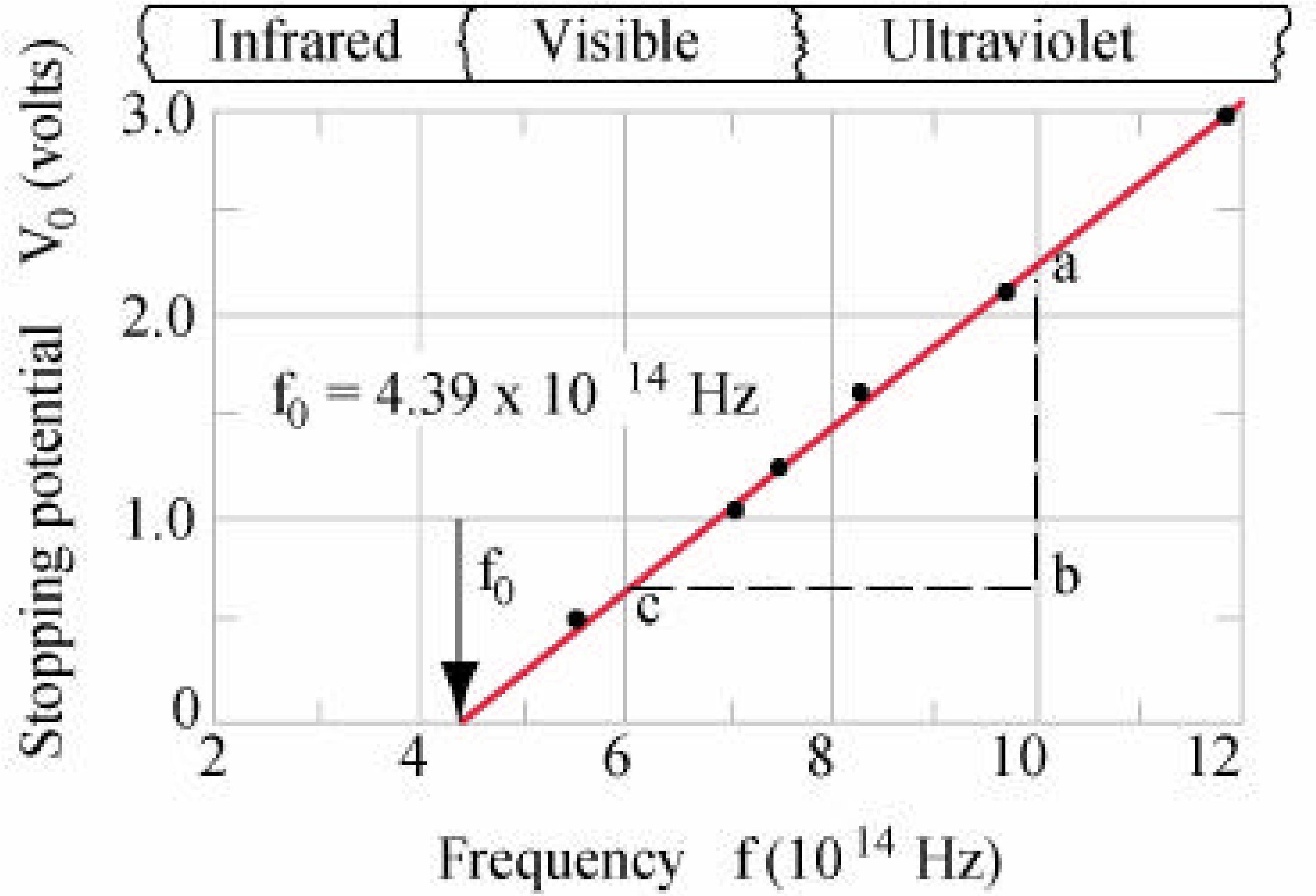
Dunque la luce (o generalmente la radiazione) deve avere **anche natura corpuscolare**, come proposto da Einstein nel 1905, che introdusse il quanto elementare di luce, il **fotone**. Al fotone di frequenza ν viene associata l'energia **E = h**n, dove la ***costante di Plank h*** vale:

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s} = 4{,}14 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{eV \cdot s}.$$

Effetto fotoelettrico



Il potenziale d'arresto e la frequenza di taglio non dipendono dall'intensita` della luce.



$$K_{max} = \tfrac{1}{2} m v^2 = e V_{stop}$$

Dunque **la luce non ha solo natura ondulatoria**, perche` sotto la frequenza di taglio non vengono emessi elettroni anche se si tratta di luce di grande intensita`.

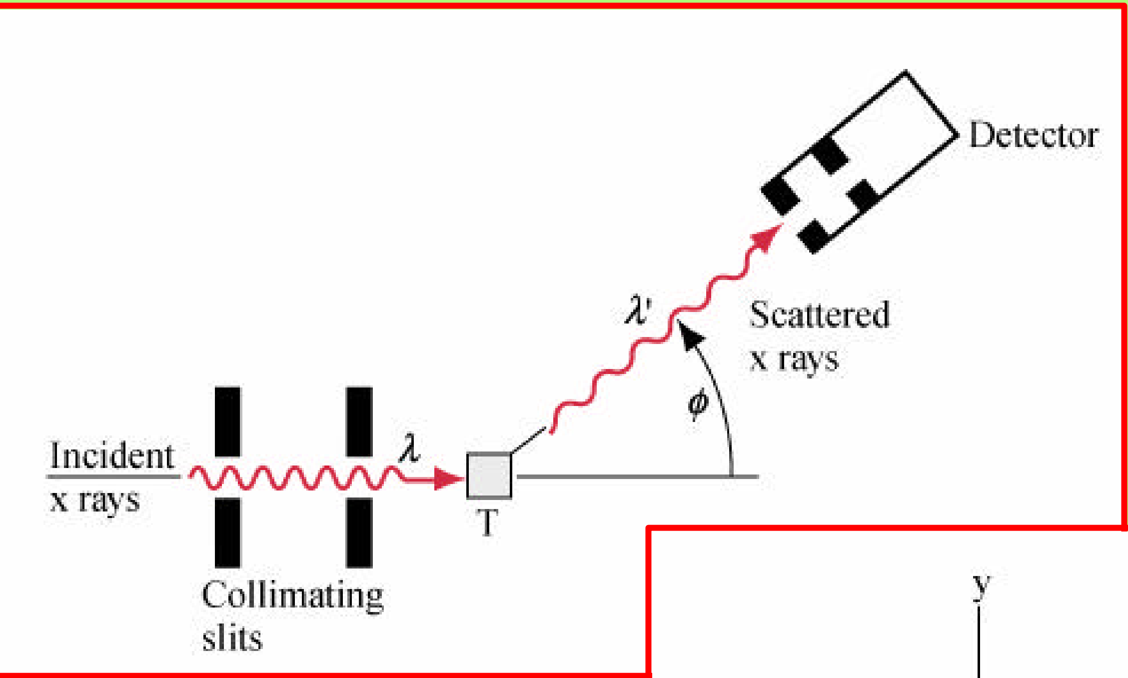
Dato il potenziale di ionizzazione Φ, l'effetto fotoelettrico si spiega con la legge di conservazione dell'energia.

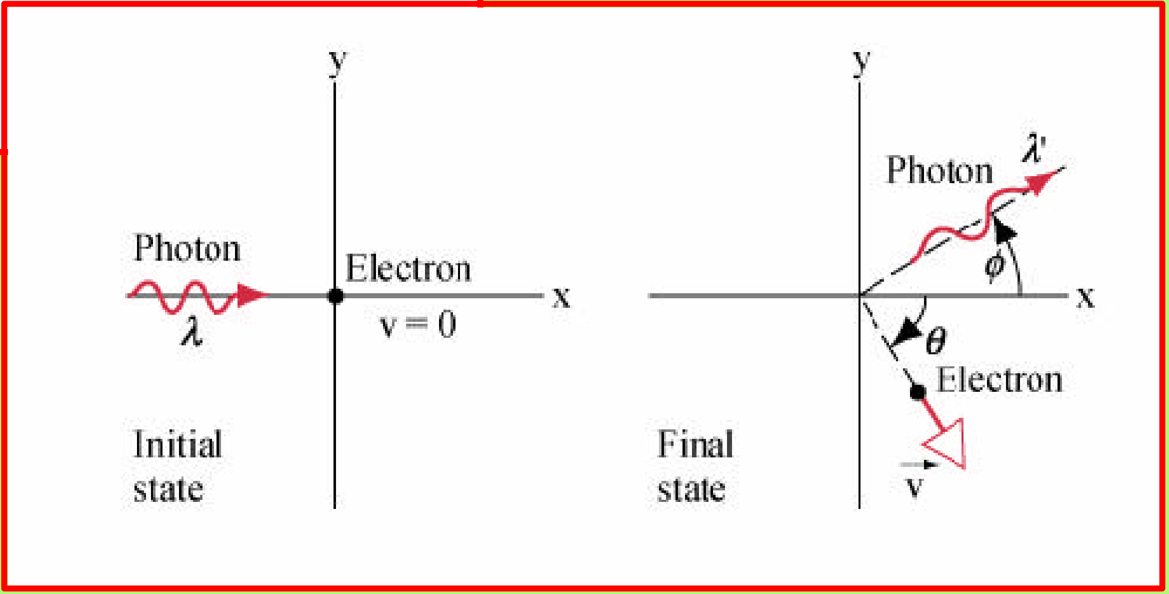
$$h\nu = \Phi + K_{\max} = \Phi + \tfrac{1}{2}mv^2$$

$$V_{stop} = \frac{K_{\max}}{e} = \frac{h}{e}\nu - \frac{\Phi}{e}$$

Inoltre, dalla seconda relazione si vede che V_{stop} cresce linearmente con la frequenza e, da essa, si puo` misurare il valore di h.

Effetto Compton





Per spiegare l'effetto Compton, nel 1916 Einstein propose di associare al fotone non solo un'energia ma anche l'impulso:

$$\boxed{p = \frac{hn}{c} = \frac{h}{l}}$$

$$hn = hn' + K = hn' + mc^2(g - 1)$$

$$\frac{h}{l} = \frac{h}{l'} + mc(g - 1)$$

essendo $l n = c$

L'effetto si spiega con la conservazione dell'energia e della quantita` di moto

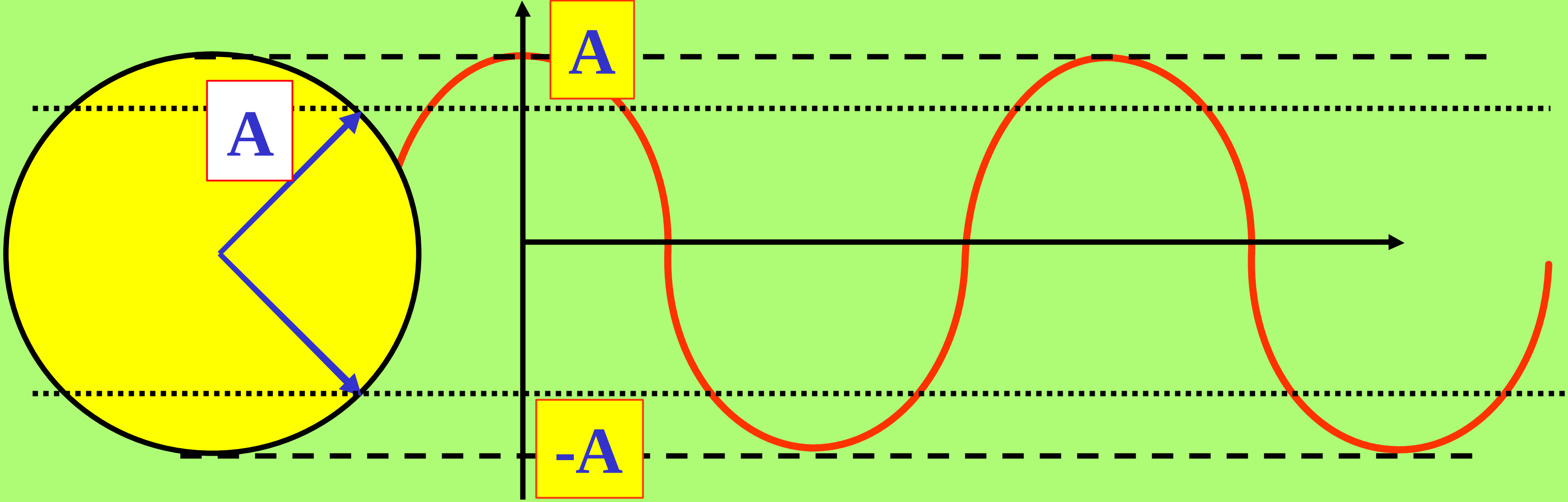
$$\Delta l = \frac{h}{mc}(1 - \cos f)$$

dove $\dfrac{h}{mc}$ e` una costante detta lunghezza d'onda Compton

Se ***monocromatiche*** (ossia descritte da una sola frequenza di oscillazione) le onde si possono rappresentare mediante un'equazione del tipo $y(x,t) = y_m \sin(kx-\omega t)$, dove y_m e $(kx-\omega t)$ sono dette ampiezza e fase dell'onda. Inoltre si possono definire il numero d'onda $k = 2\pi/\lambda$ e e la pulsazione $\omega = 2\pi/T$.

Il fenomeno ondoso dipende quindi dalla direzione di propagazione x e dal tempo t, e di solito si scrive nella forma:

$$\boxed{y(x,t) = A \sin\left[2p\left(\frac{x}{l} - \frac{t}{T}\right)\right]}$$

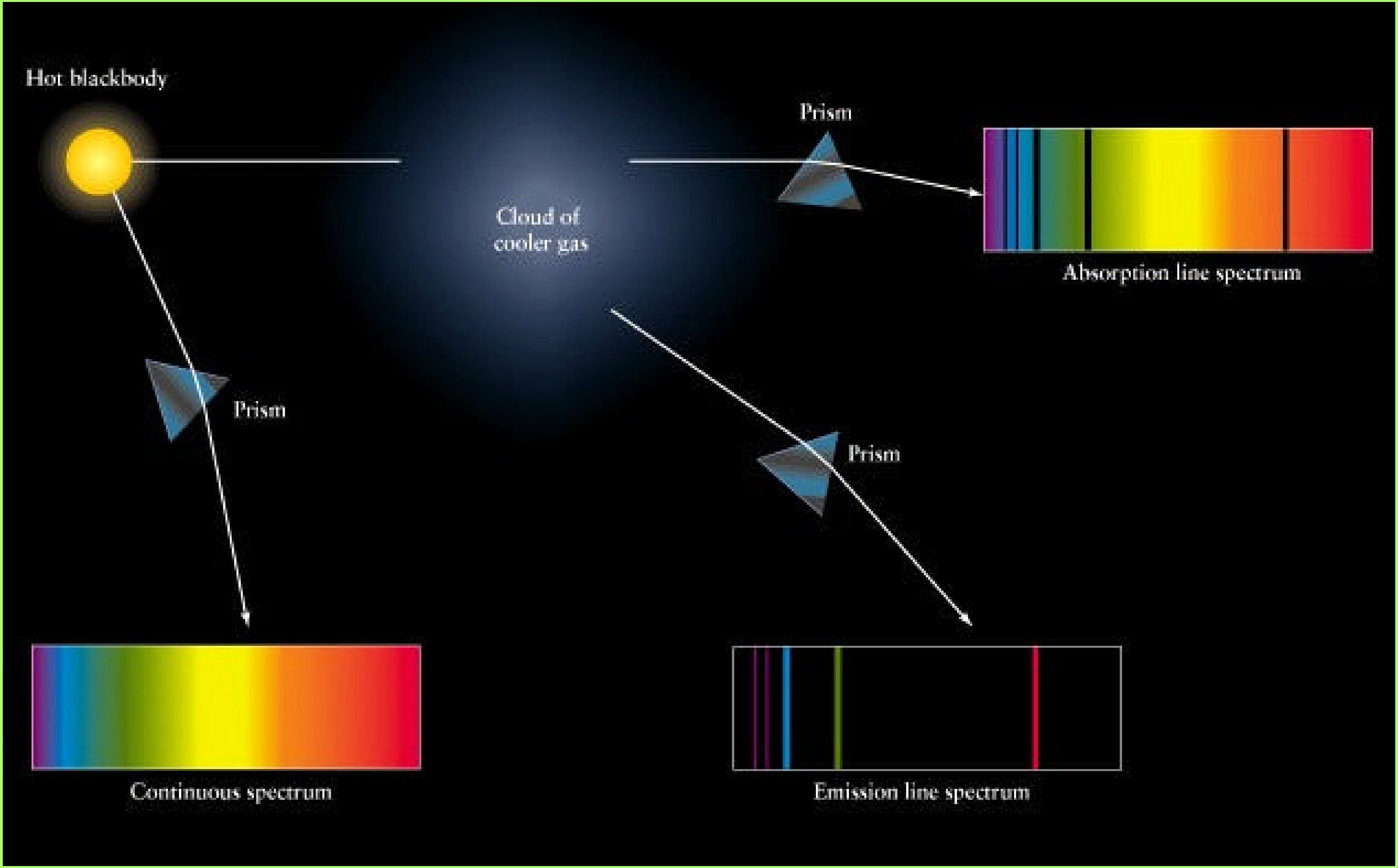


Anziche la lunghezza d'onda, molto spesso si usa la frequenza **n = w/2p = 1 / T**, che e\` caratteristica della sorgente, mentre la lunghezza d'onda dipende dall'***indice di rifrazione n*** del mezzo attraversato: $l = l_0$ **/ n**. Nel vuoto si ha n = 1, e quindi $\lambda = \lambda_0$; in ogni altro mezzo si ha n > 1 (per esempio in acqua n = 1,33) per cui $\lambda < \lambda_0$.

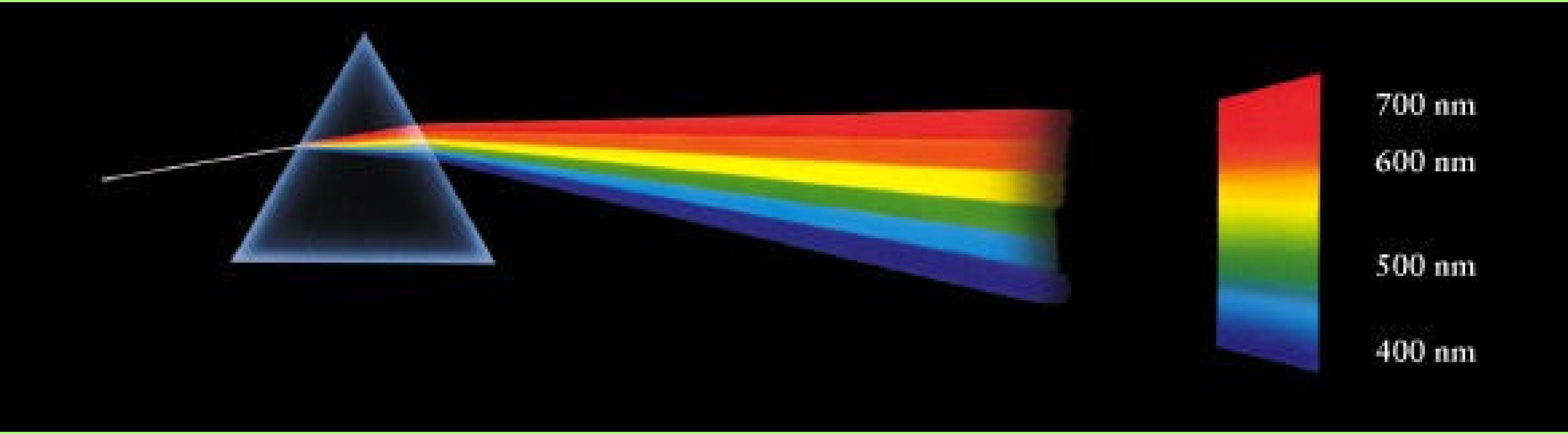
Anche la velocita` di propagazione di un'onda dipende dal mezzo attraversato. Le onde elettromagnetiche si propagano nel vuoto alla velocita` costante $c = 3 \cdot 10^8$ m/s mentre, in un mezzo con indice di rifrazione n, la velocita` di propagazione e` $\mathbf{v = c/n =} \; l_{\mathbf{0}} n \mathbf{/n =} \; l n$ (per es. in acqua $v \sim 2 \cdot 10^8$ m/s)

La relazione $v = \lambda\nu$ vale per tutti i fenomeni ondosi, anche per il suono. Per esempio, il la_3 (di frequenza $\nu = 435$ Hz) in aria (dove $n \sim 1$ e $v = 340$ m/s) ha $\lambda = v/\nu = 340/435 = 0,78$ m, in acqua (dove $n = 1.33$ e quind $v = 1450$ m/s) si ha $\lambda = v/\nu = 1450/435 = 3,33$ m.

Leggi di Kirchoff



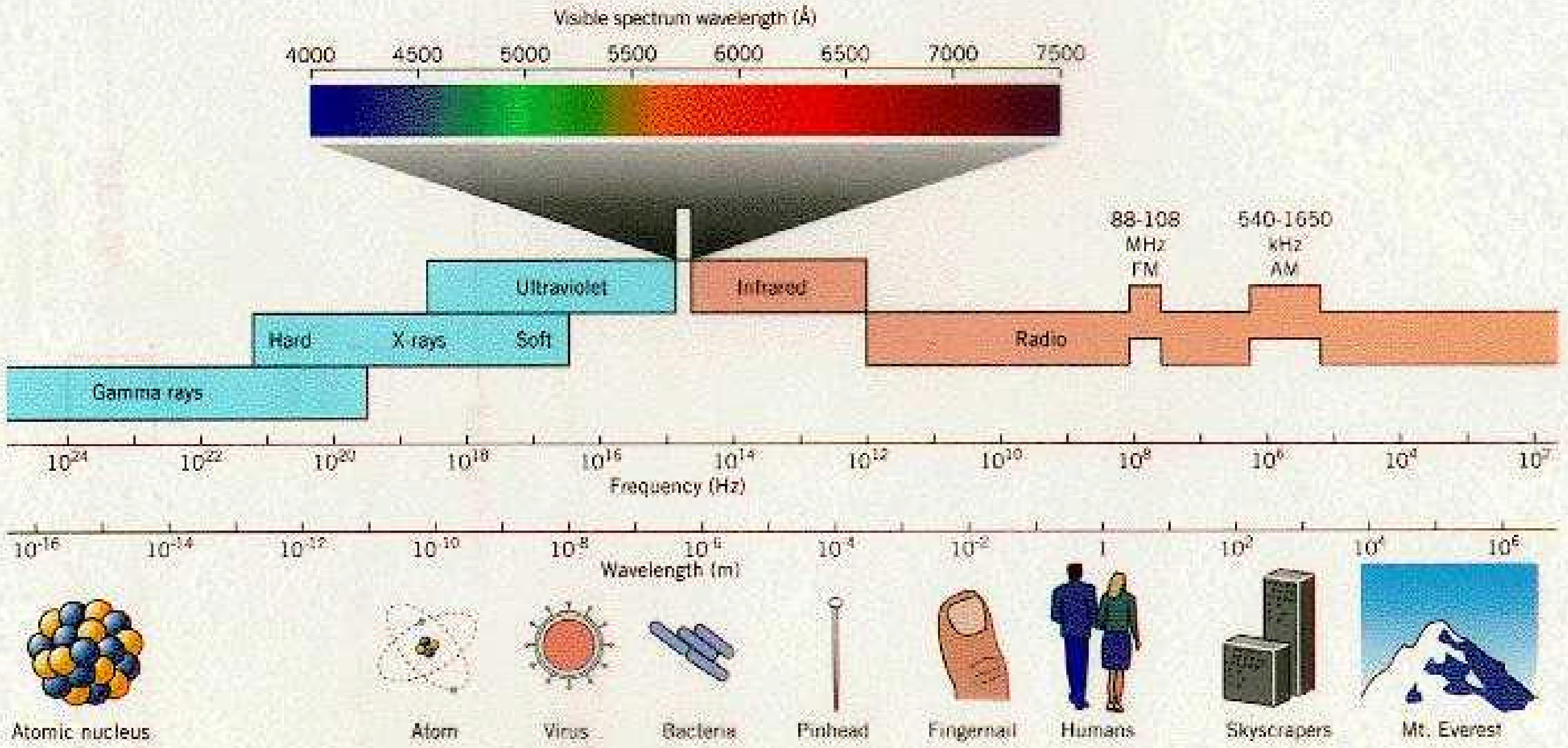
La luce bianca che attraversa un prisma viene scomposta nei colori che la compongono



r.a.g.v.b.i.v.

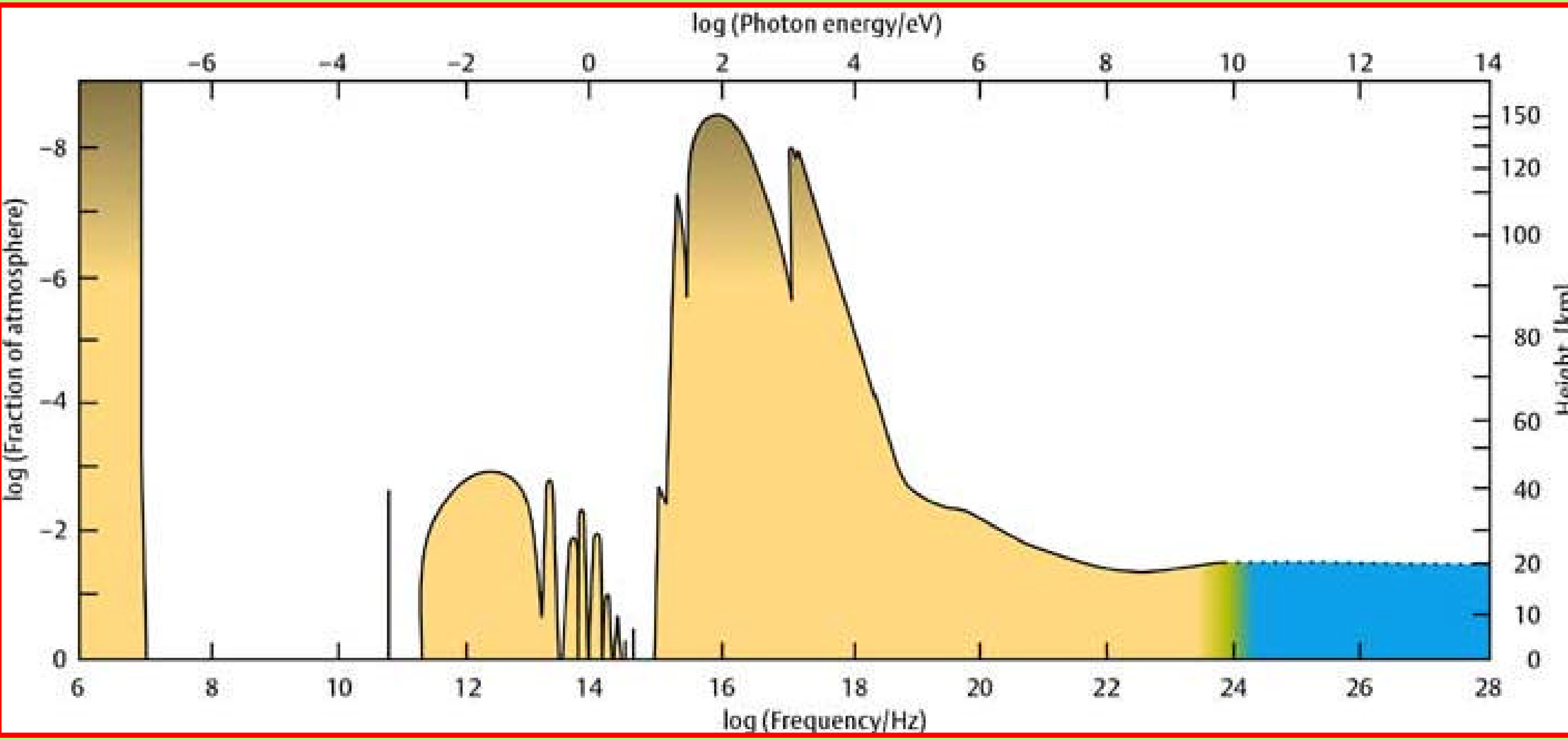
Onde lunghe ⟷ **Onde corte**

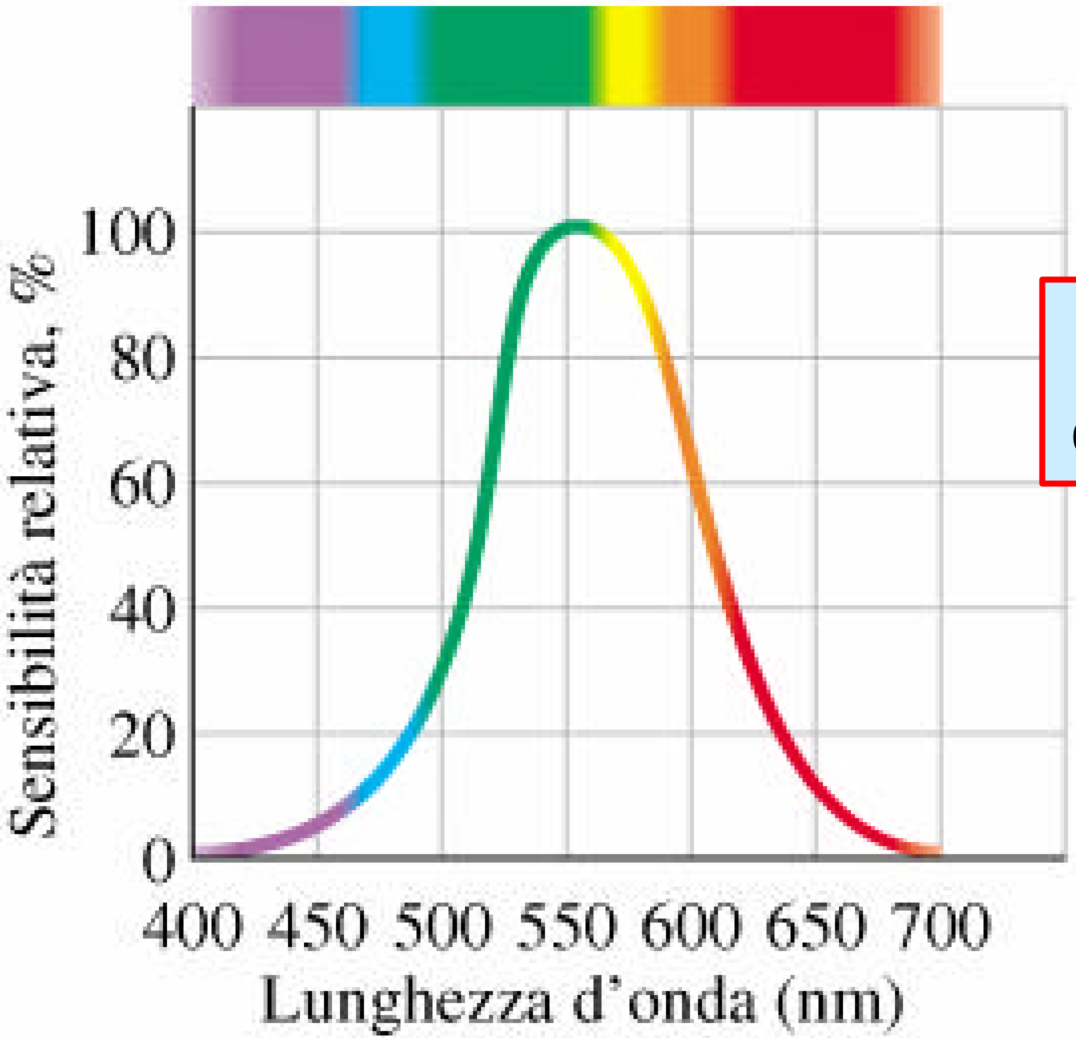
LO SPETTRO ELETTROMAGNETICO



Lo spettro visibile varia da circa 400 a circa 700 nm, ossia di un fattore 2. L'intero spettro elettromagnetico varia invece di 20 ordini di grandezza, dalle dimensioni di un nucleo a ~10 km

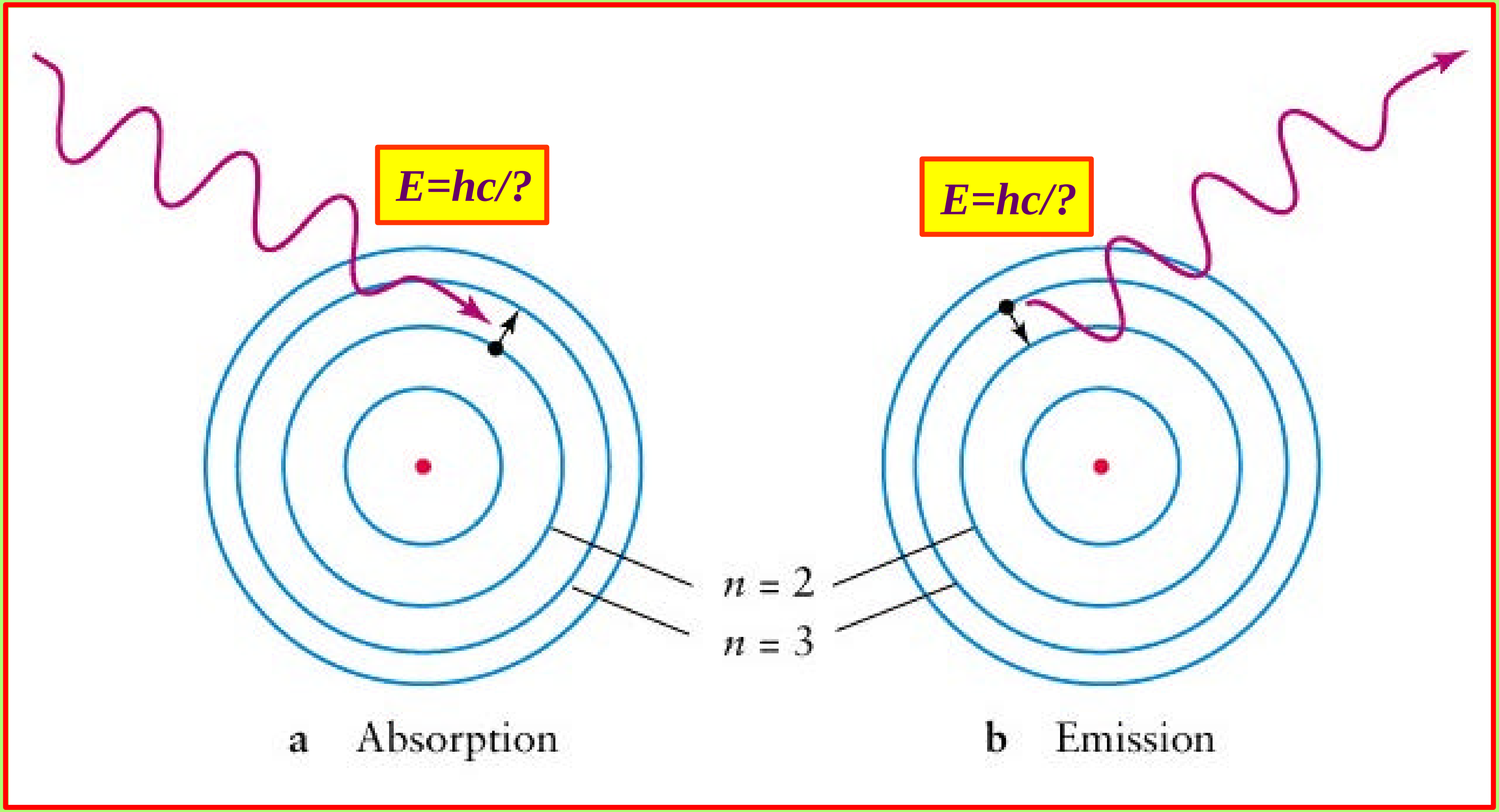
Trasparenza dell’atmosfera alla radiazione elettromagnetica

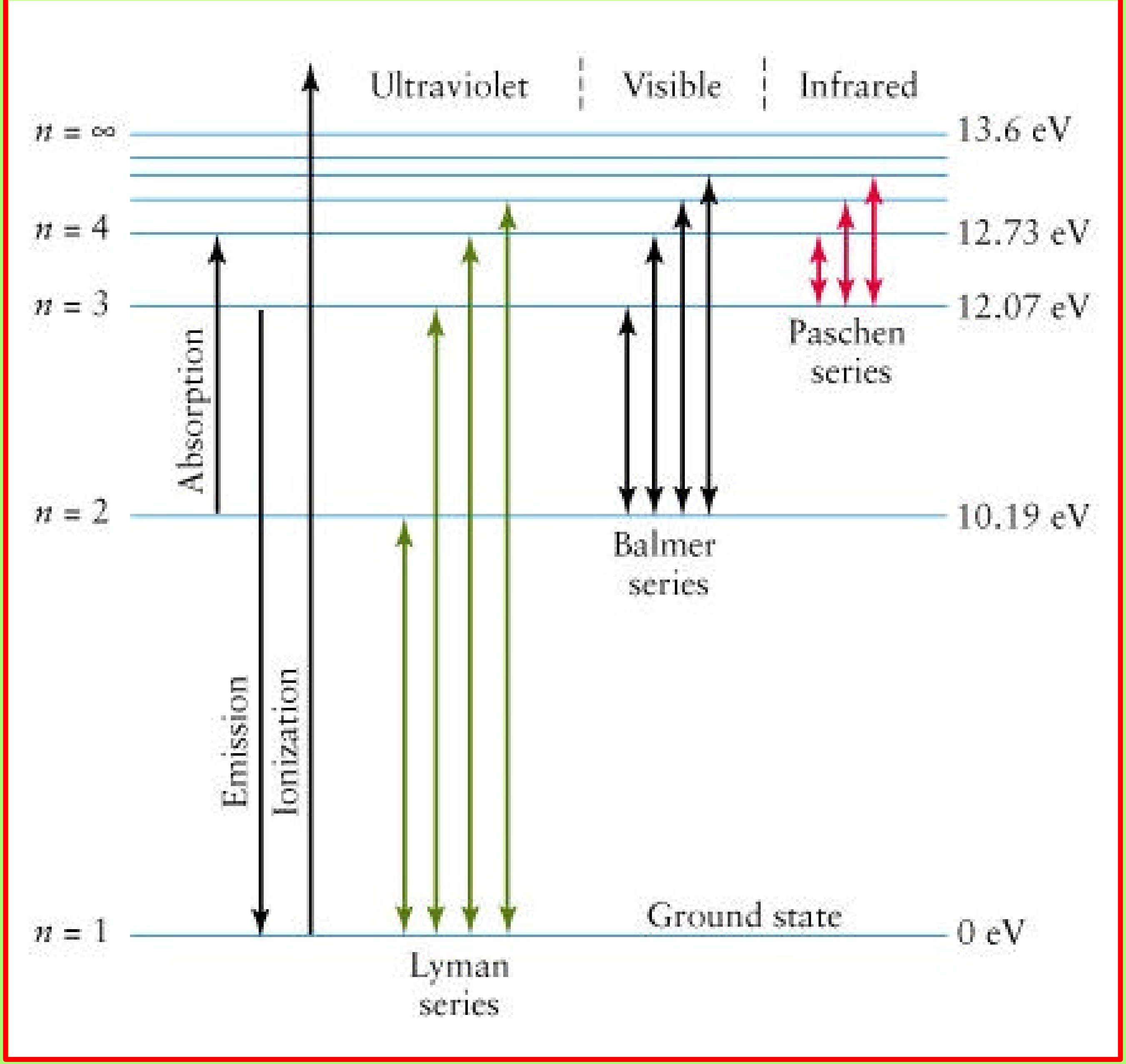


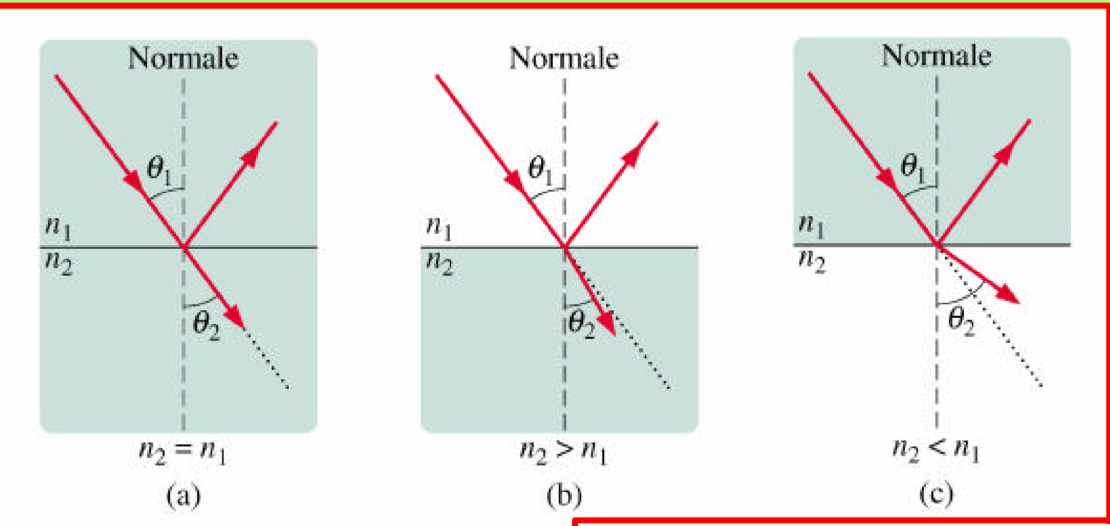


Sensibilita`
dell'occhio umano

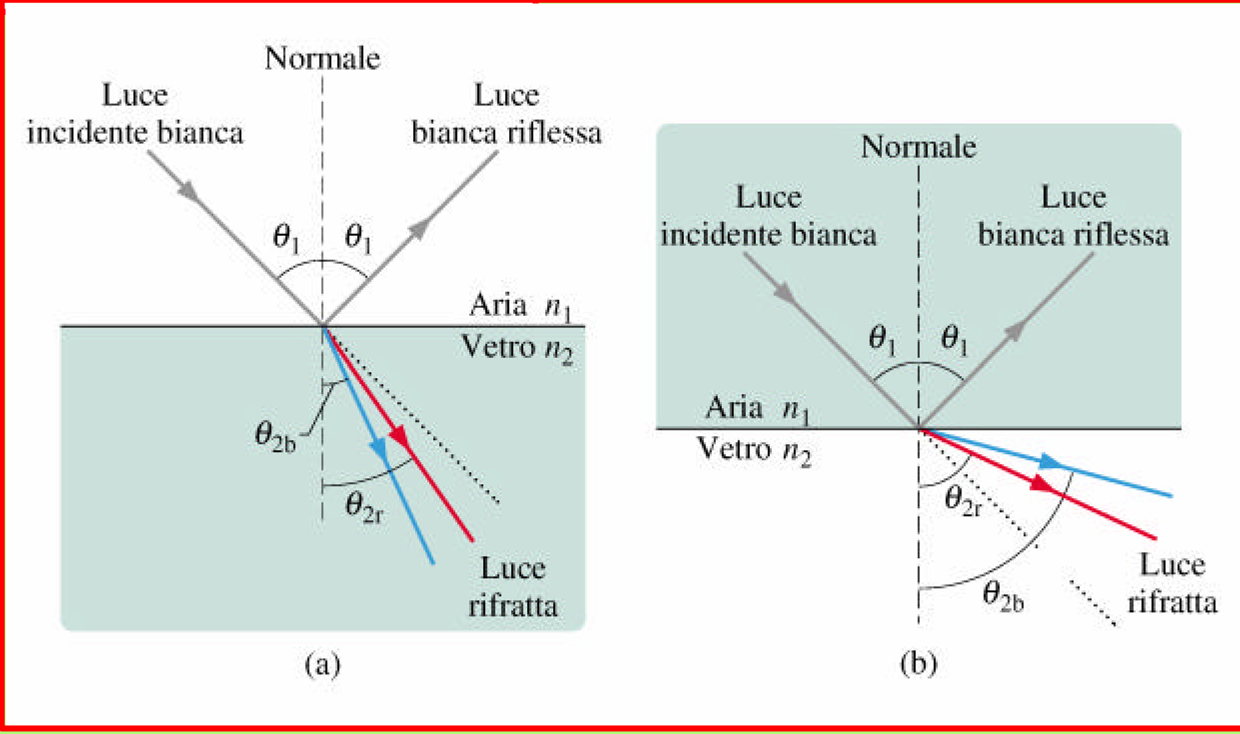
I fotoni sono emessi da salti di elettroni tra livelli energetici




Ultraviolet
Visible
Infrared
n = ∞
n = 4
n = 3
n = 2
n = 1
13.6 eV
12.73 eV
12.07 eV
10.19 eV
0 eV
Absorption
Emission
Ionization
Paschen series
Balmer series
Lyman series
Ground state



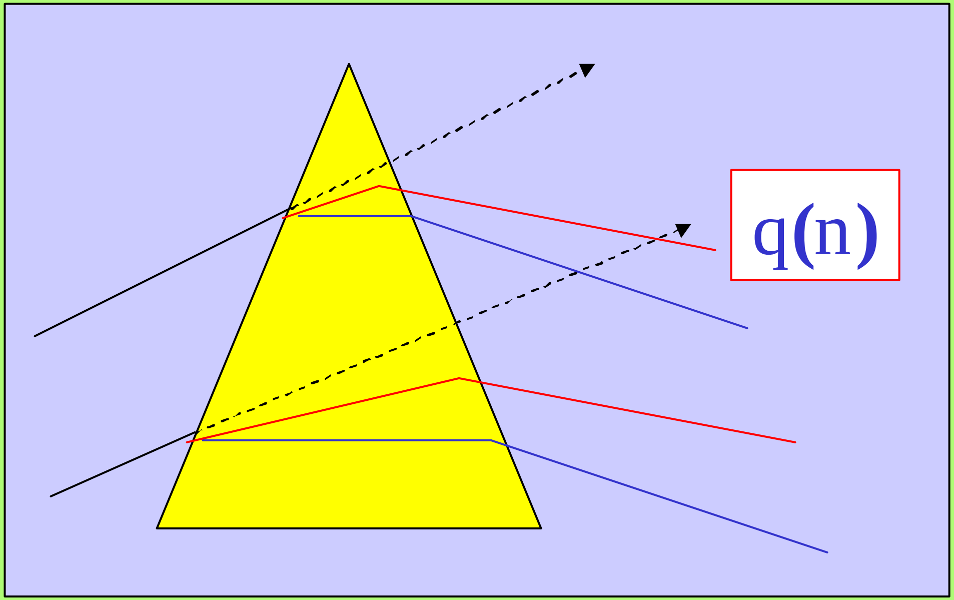
OTTICA GEOMETRICA



da aria a vetro o da vetro a aria il blu e` sempre piu` rifratto del rosso.

Dispersione della luce

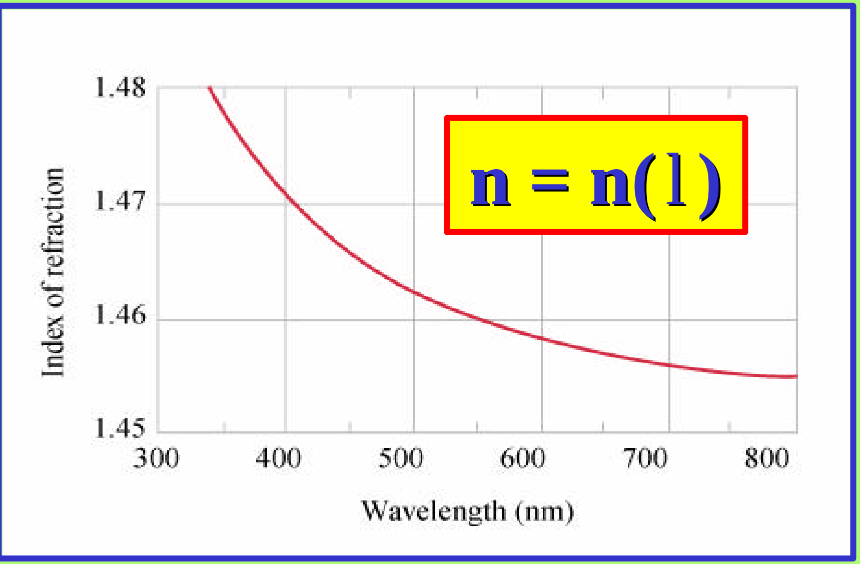
La luce bianca e` composta di radiazioni di diversa lunghezza d'onda le quali, attraversando un mezzo disperdente (prisma, goccia d'acqua, ecc...) sono rifratte ad angoli diversi. Il fenomeno e` noto come dispersione della luce, ed e` caratterizzato da angoli di deviazione piccoli per radiazioni di frequenza piccola (grande lunghezza d'onda) e grande deviazione per radiazione di frequenza grande.



Le leggi sulla riflessione e rifrazione sono riassunte dall'equazione:

$$\mathbf{n_1 \sin i = n_2 \sin r}$$

Vale il principio che il cammino ottico si puo` invertire. Ne seguono i concetti di riflessione totale e di angolo limite. Le fibre ottiche ne sono un esempio.

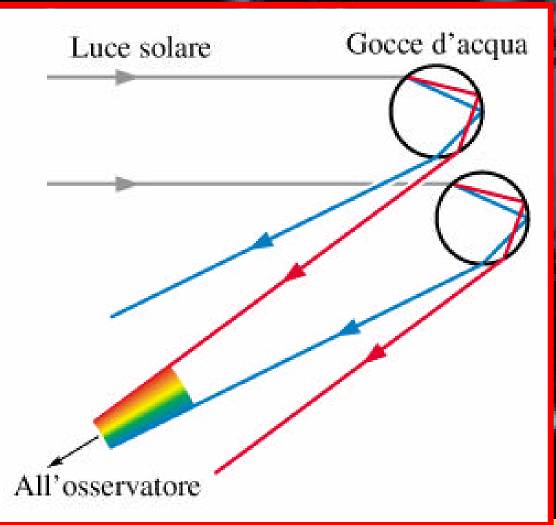


L'indice di rifrazione diminuisce al crescere della lunghezza d'onda:

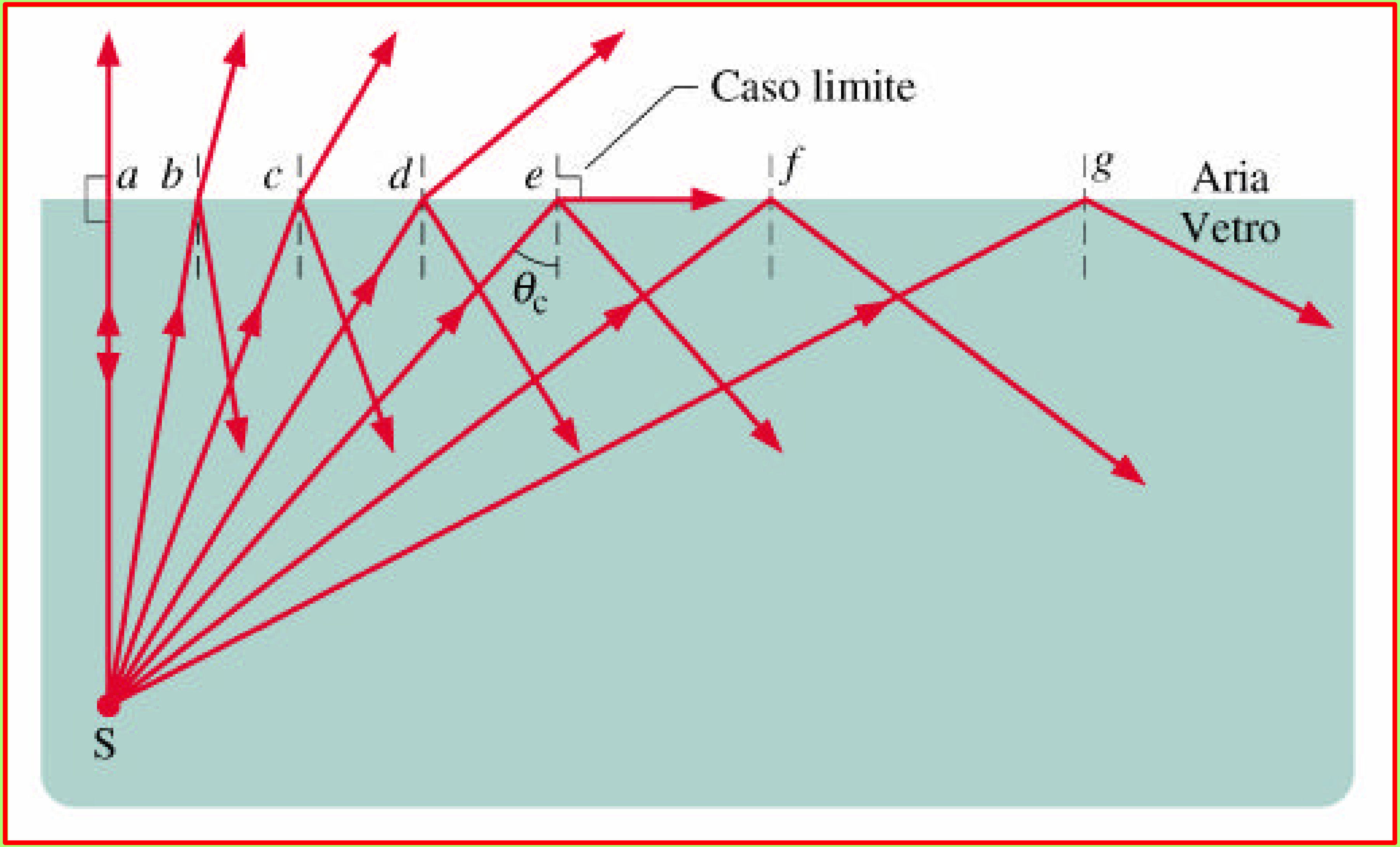
n = n(l) ≥ 1

e vale 1 nel vuoto; la velocita` della luce in un mezzo e` **v = c/n**

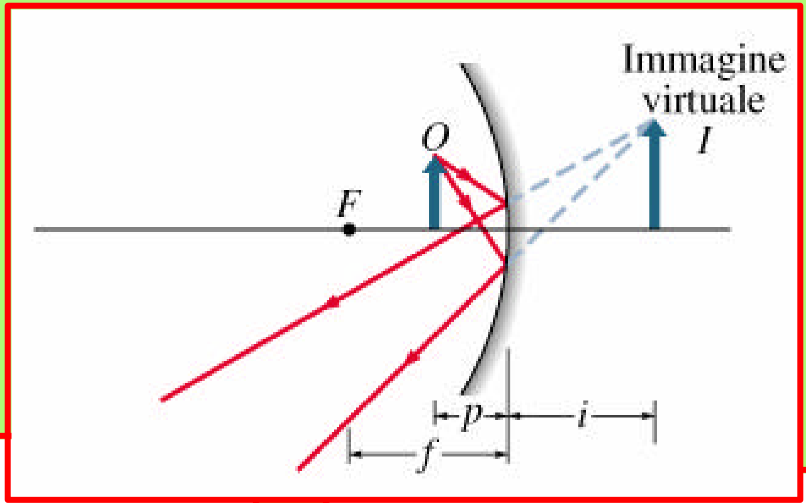
arcobaleno tipico esempio naturale di dispersione della luce.

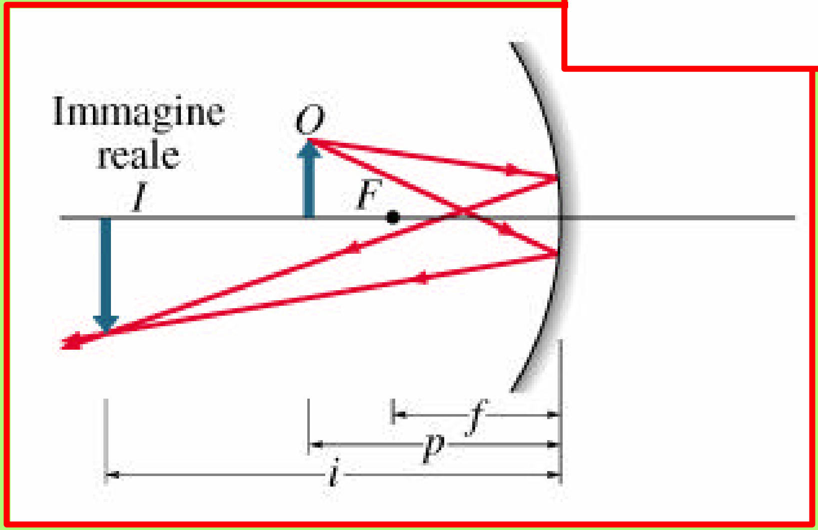


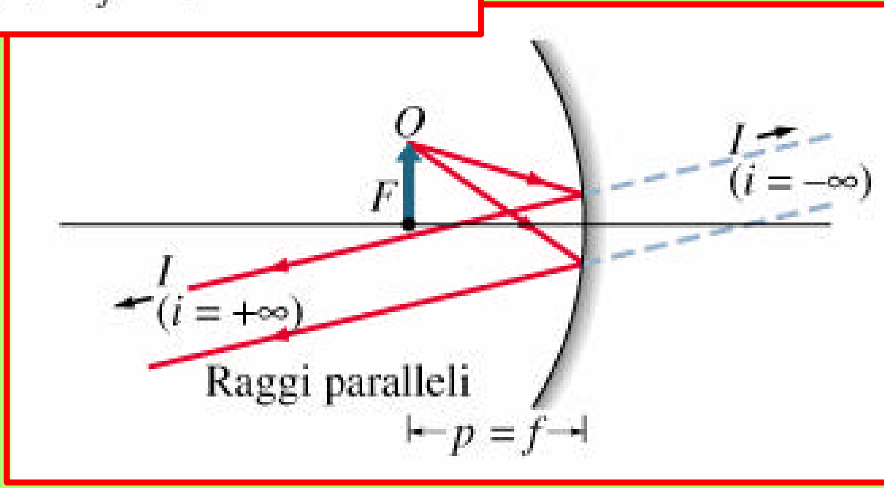
riflessione totale e angolo limite



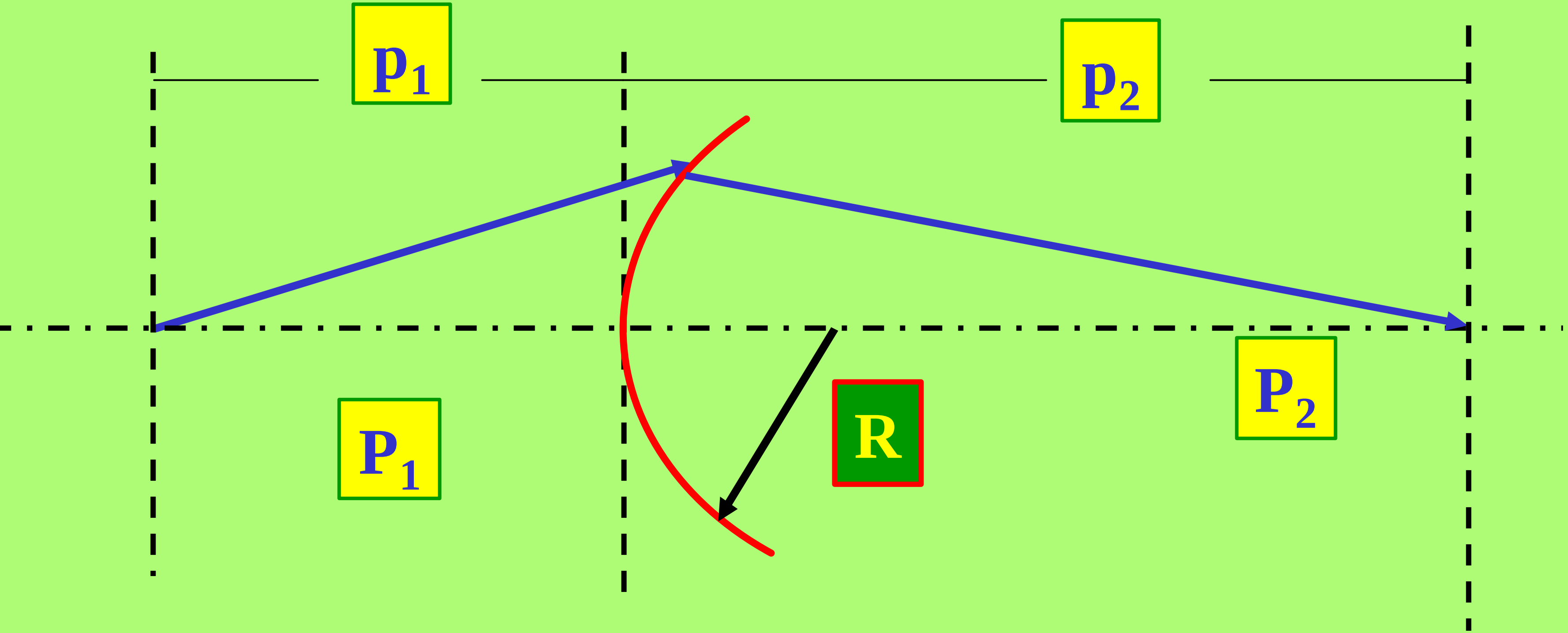
Leggi della riflessione: esempi di costruzione dell'immagine in uno specchio concavo







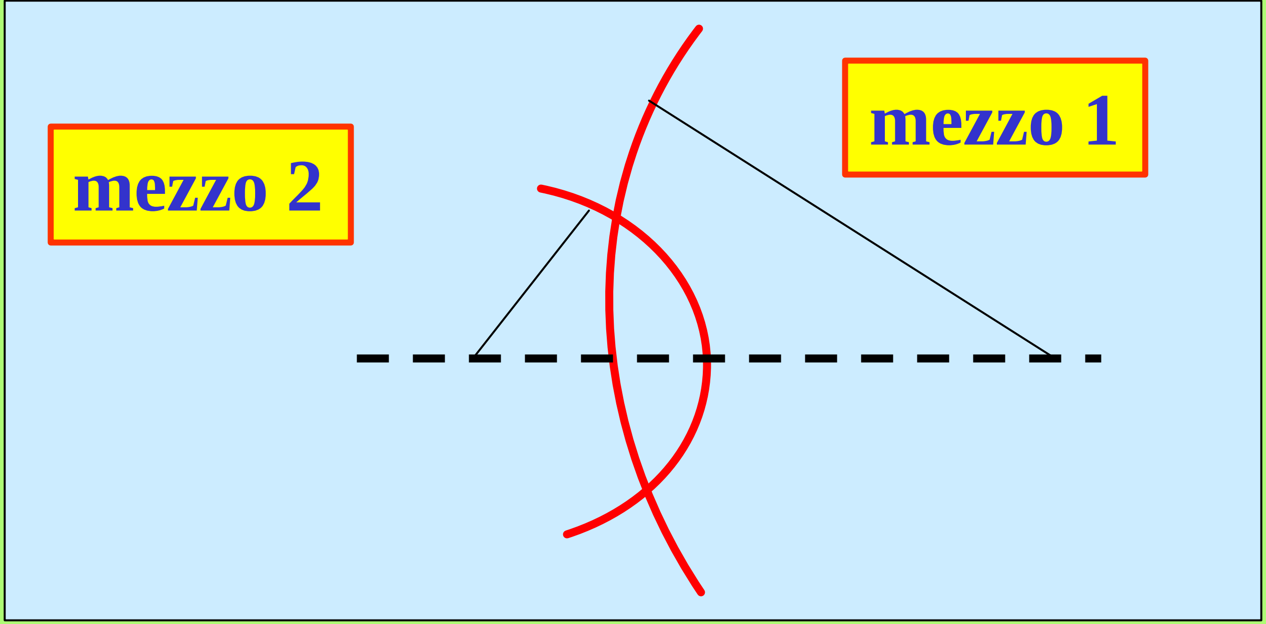
Si definisce **diottro sferico** l'insieme di due mezzi separati da una calotta sferica; l'asse ottico principale e` la retta congiungente il centro della sfera con il suo vertice.



Per radiazione monocromatica gli indici di rifrazione n_1 e n_2 di entrambi i mezzi sono costanti. Considerando piccoli angoli di incidenza le leggi della rifrazione consentono di ottenere una relazione tra la sorgente luminosa (posta nel punto P_1) e la sua immagine che si forma nel punto P_2:

$$\boxed{\frac{n_1}{p_1}+\frac{n_2}{p_2}=\frac{(n_2-n_1)}{R}}$$

dove p_1 e p_2 sono le distanze dei punti sorgente e immagine dal vertice del diottro, e R e` il suo raggio di curvatura.



La **lente sottile** puo essere considerata come una combinazione di 2 diottri sferici. La relazione che lega i diversi parametri della lente e` data da:

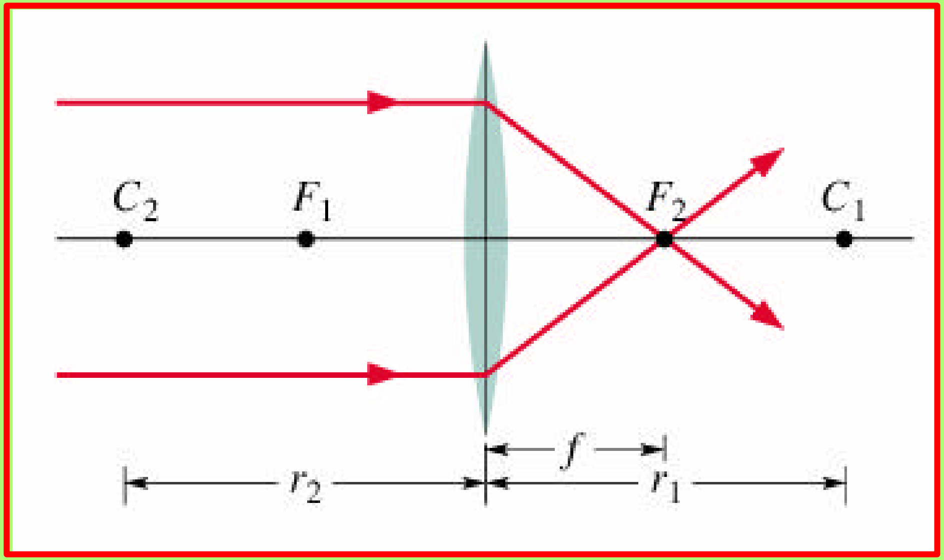
$$\boxed{\frac{1}{p_1}+\frac{1}{p_2}=\left(\frac{n_2}{n_1}-1\right)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)=\frac{1}{f}}$$

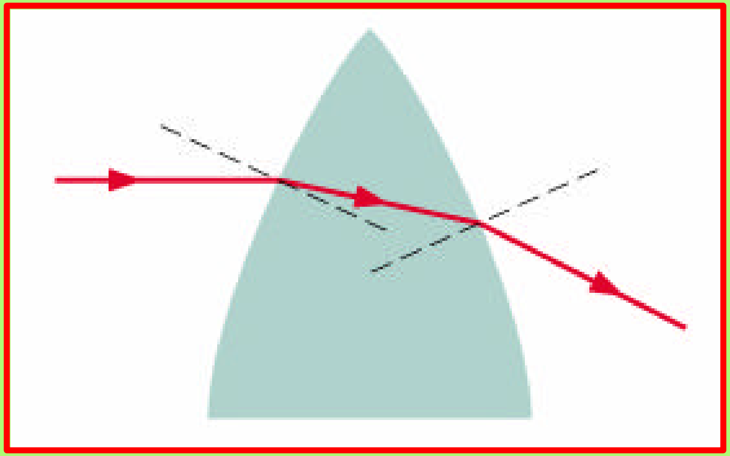
Se $n_2 > n_1$ la lente e` convergente, altrimenti divergente.

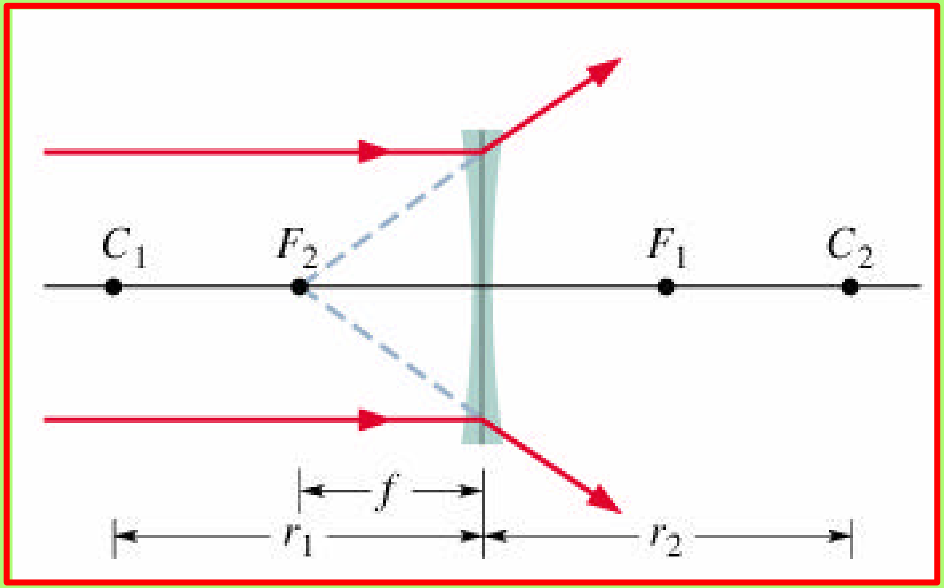
Per una data lente la quantita`

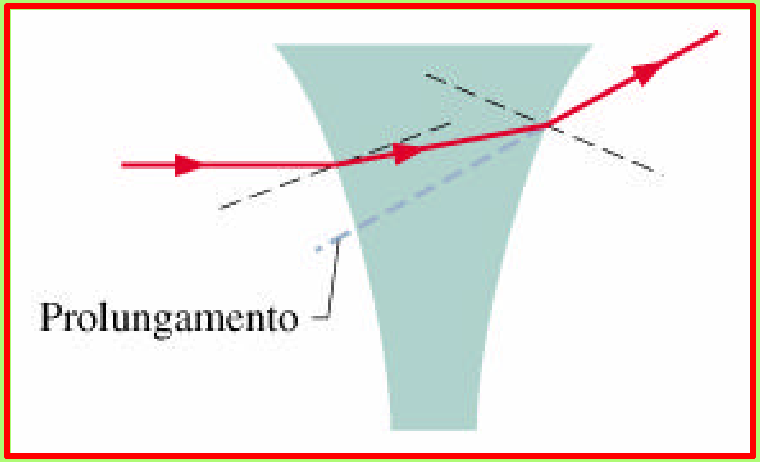
$$\boxed{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = K}$$

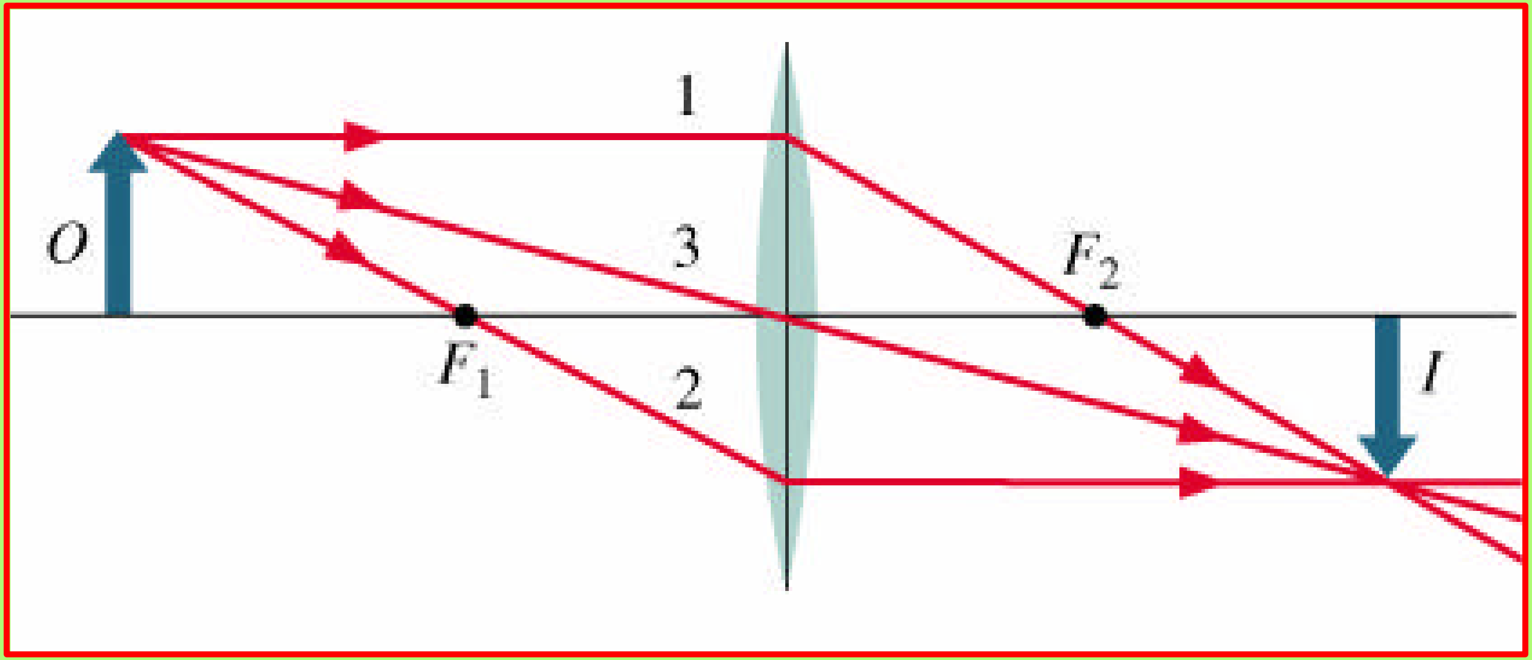
e` costante, ma il **potere diottrico** 1/f (misurato in diottrie se f e` misurato in metri) dipende dal mezzo in cui la lente e` immersa. Per una sorgente all'infinito (p_1 = 8) il potere diottrico **p_2 = f** coincide con la distanza focale della lente.
Caratteristica di una lente e` l'ingrandimento, che puo` essere lineare (rapporto tra lunghezza dell'immagine e dell'oggetto) o visuale (analogo rapporto tra gli angoli).

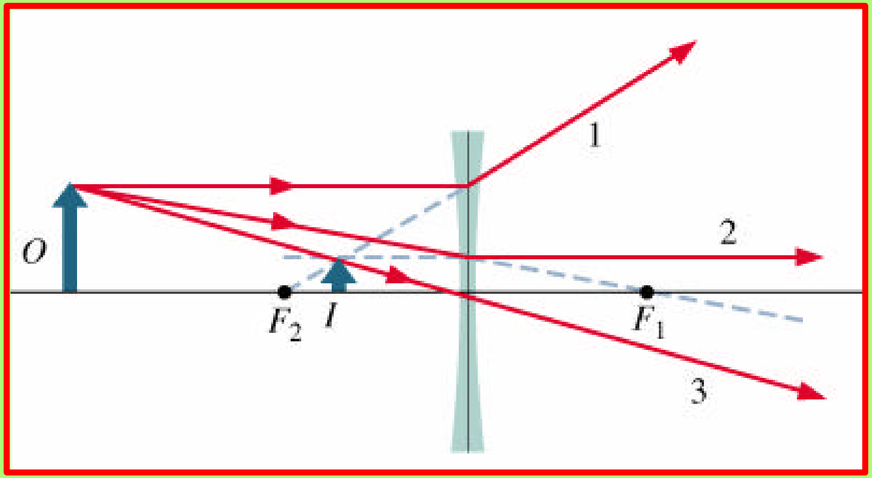

C_2
F_1
F_2
C_1
f
r_2
r_1

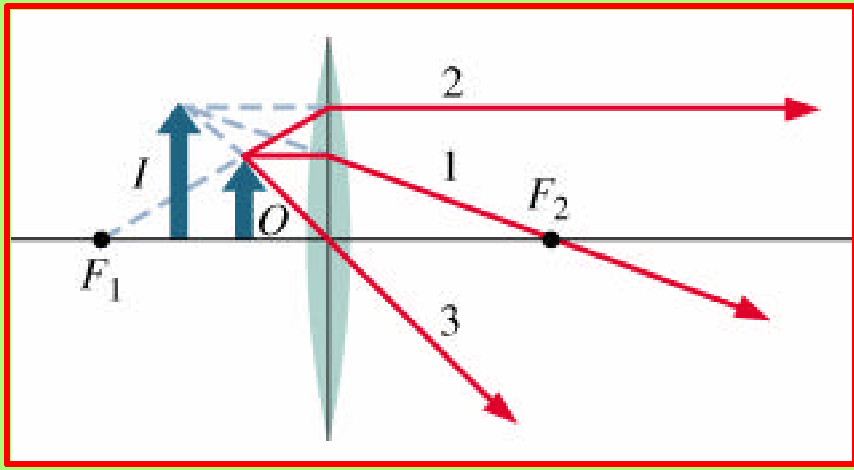



C_1
F_2
F_1
C_2
f
r_1
r_2


Prolungamento


1
O
3
F_2
F_1
2
I


1
O
2
F_2
I
F_1
3


2
I
1
F_2
O
F_1
3

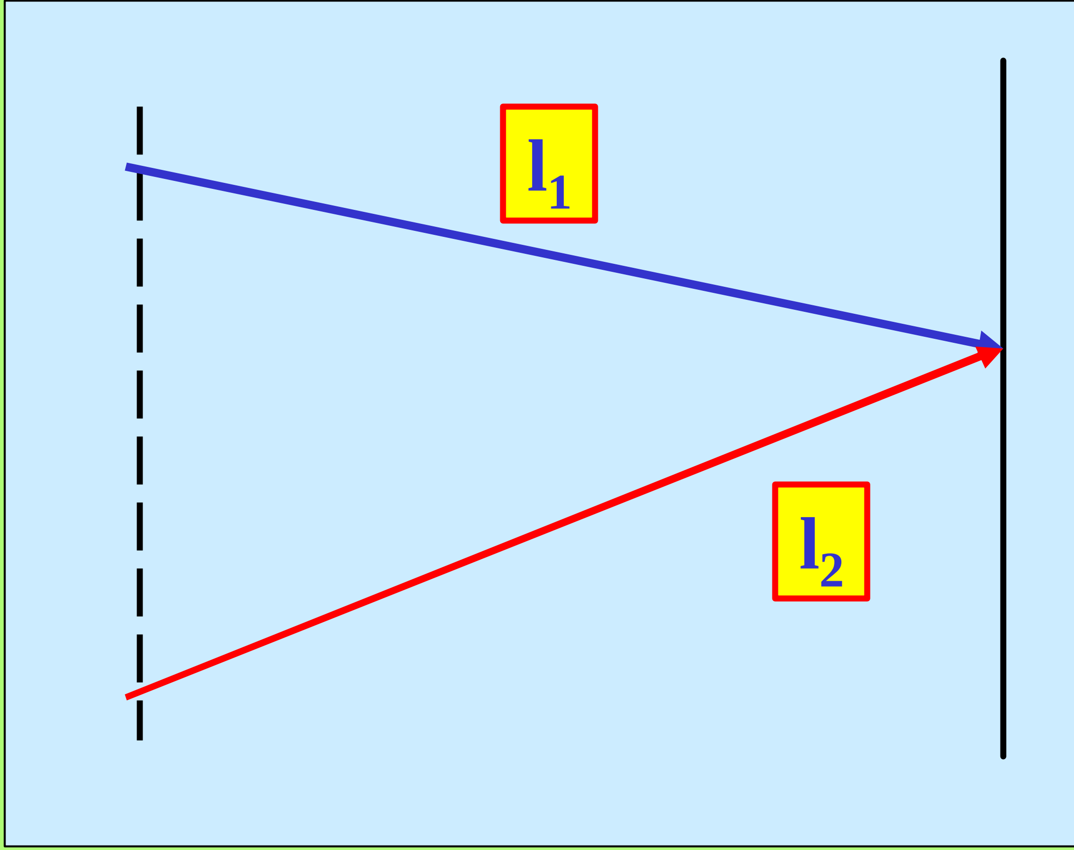
OTTICA FISICA

La natura della radiazione elettromagnetica, in particolare della luce, e` sia ***ondulatoria*** che ***corpuscolare***.

In certi casi la luce si comporta come un'onda (per es. nei fenomeni di interferenza e di diffrazione) oppure come una particella (per es. nell'effetto fotoelettrico o nell'effetto Compton).

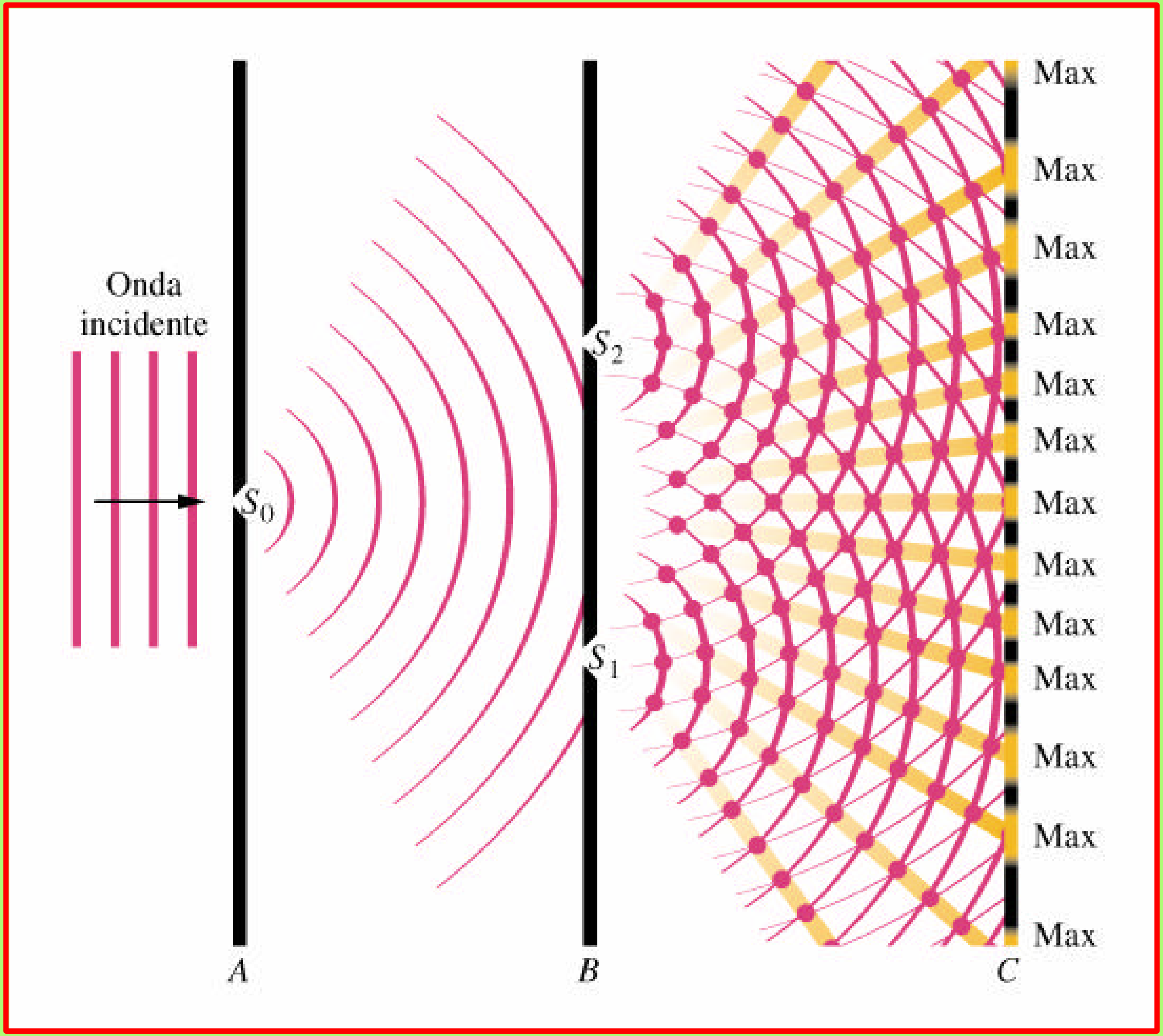
Se il medesimo raggio luminoso percorre due cammini ottici diversi, nel punto di arrivo la differenza di fase stabilisce se l'**interferenza** e` costruttiva o distruttiva

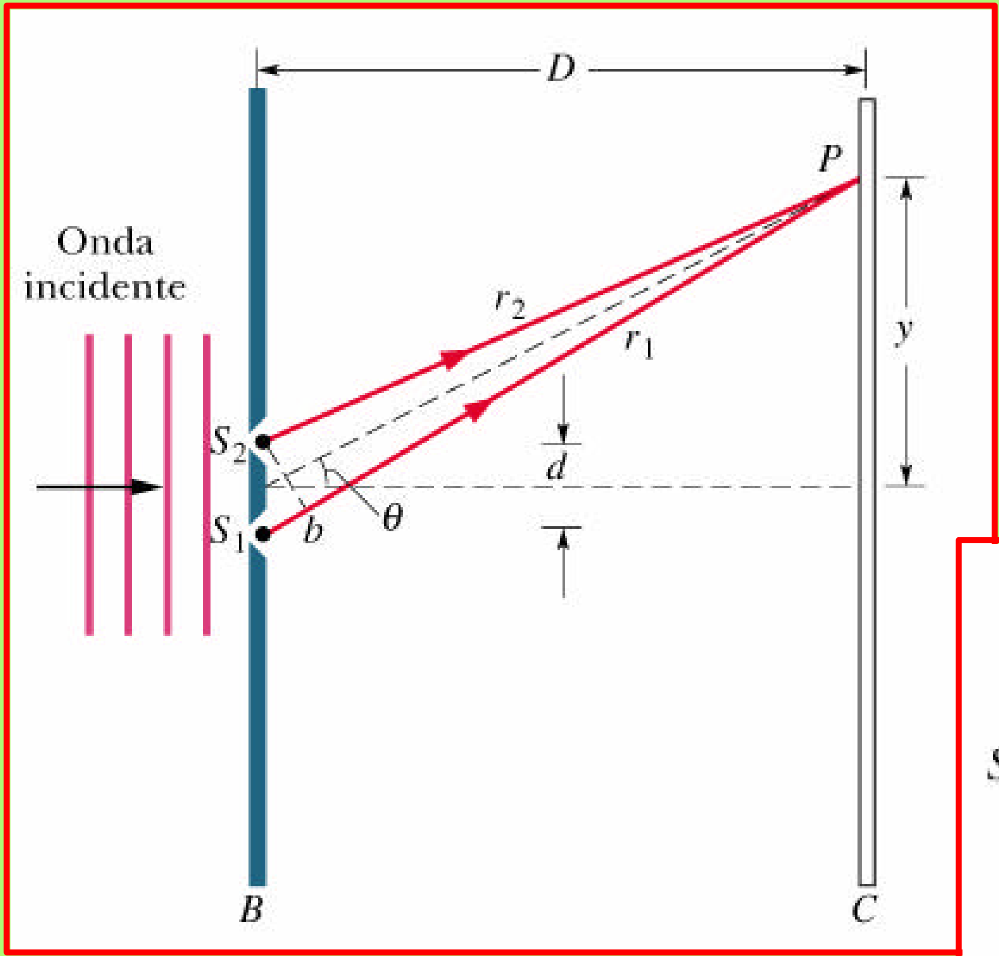
Una differenza di cammino ottico Δl comporta una differenza di fase sullo schermo

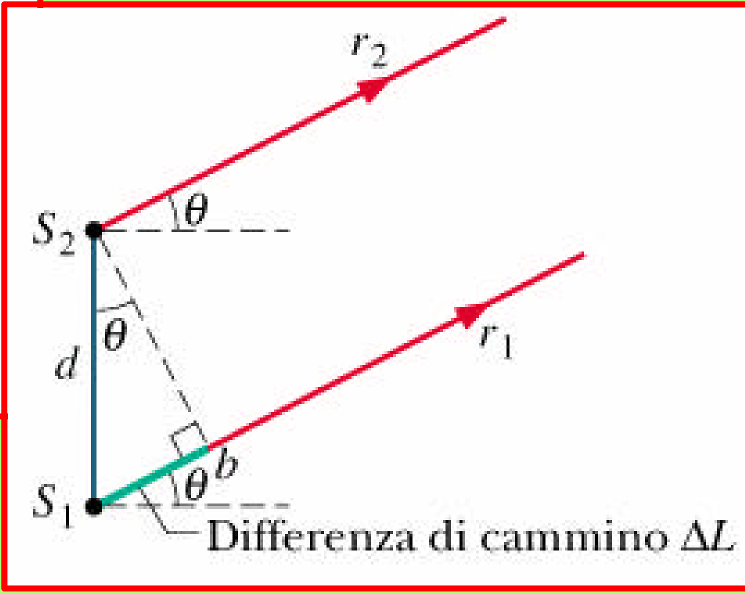


$$\Delta l = l_2 - l_1 = n\,l = 2n\frac{l}{2} \quad \text{in fase}$$

$$\Delta l = (2n+1)\frac{l}{2} \quad \text{in opposizione di fase}$$

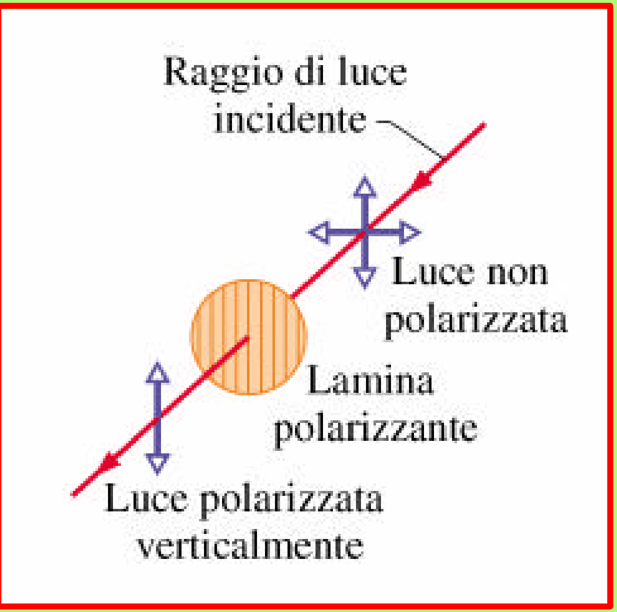

Onda
incidente
S_0
S_2
S_1
A
B
C
Max
Max
Max
Max
Max
Max
Max
Max
Max
Max
Max
Max
Max


D
P
Onda
incidente
r_2
r_1
y
S_2
S_1
d
b
θ
B
C

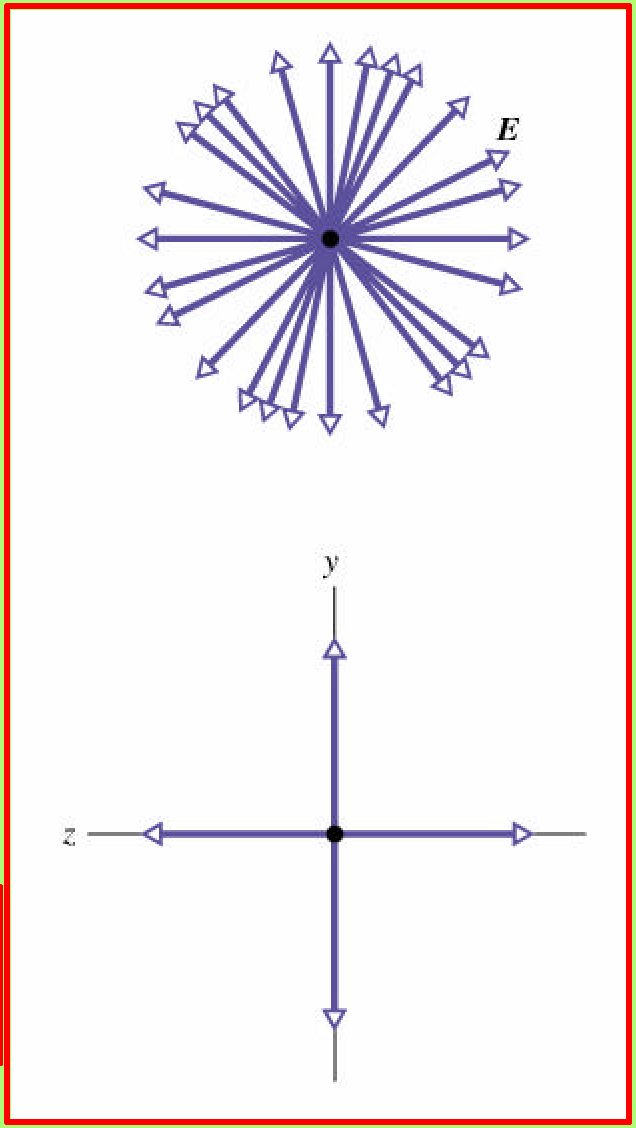

r_2
S_2
θ
θ
d
r_1
b
θ
S_1
Differenza di cammino ΔL

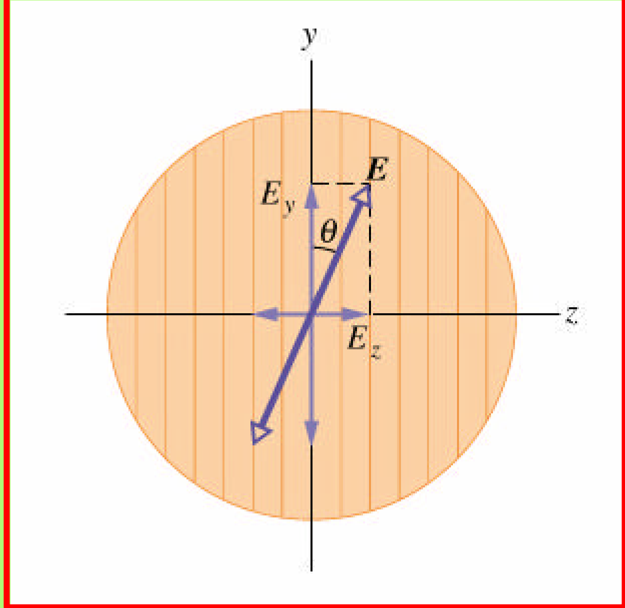
Polarizzazione della luce

La luce naturale non e` polarizzata in quanto ogni sorgente emette fotoni in modo indipendente dagli atomi (o molecole) che la costituiscono, e ciascun fotone ha il piano del campo E orientato a caso.



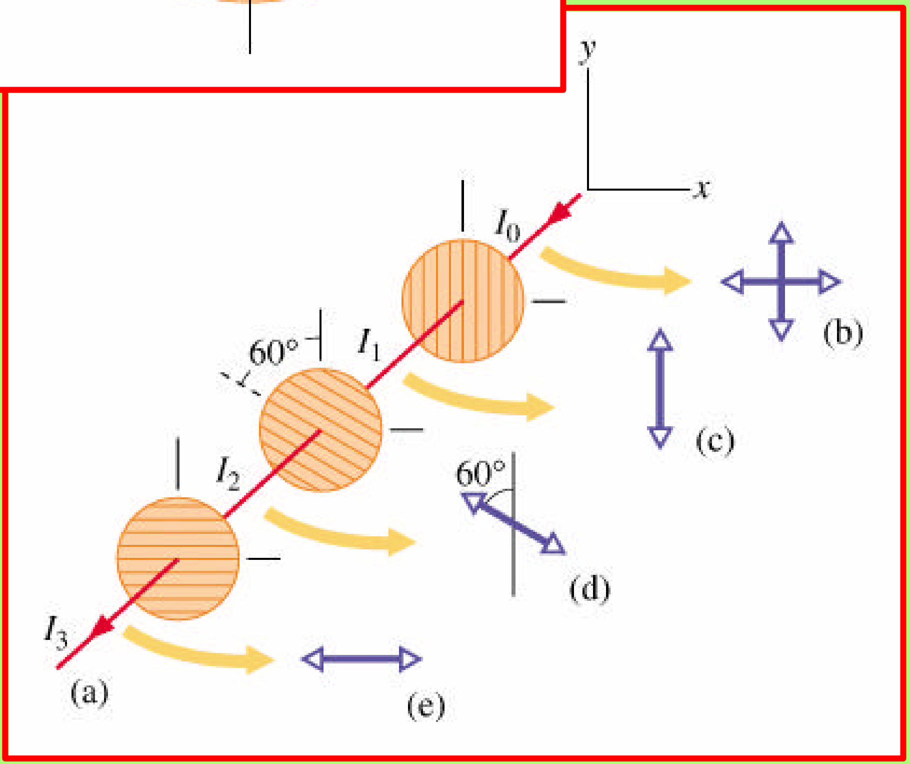
L'intensita` diventa $I = \frac{1}{2} I_0$





Se la luce e` gia` polarizzata esce da una lamina polarizzatrice con intensita`

$$I = I_0 \cos^2 q$$



per esempio:

$I_3 = I_2 \cos^2 30^0 =$

$= (I_1 \cos^2 60^0) \cos^2 30^0 =$

$= \frac{1}{2} I_0 \cos^2 60^0 \cos^2 30^0 =$

$= 0.094\ I_0.$

Solo il 9,4% della luce esce dalle 3 lamine

Fine della terza parte