

ELETTROMAGNETISMO

ELETTROSTATICA NEL VUOTO

Come abbiamo visto nella parte di meccanica le forze sono o di contatto (attrito, pressione, forza elastica) o a distanza (gravitazione): osservazioni sperimentali hanno mostrato che esiste un'altra forza a distanza: la **forza elettrica**.

Sperimentalmente si può notare che, ad esempio:

- due oggetti della medesima sostanza dopo essere stati strofinati con un panno di lana se posti l'uno vicino all'altro si respingono
- mentre se i due oggetti sono di sostanze diverse (es. plastica e vetro) si possono sia respingere che attrarre, a seconda delle sostanze (ad es. plastica e vetro si attraggono).

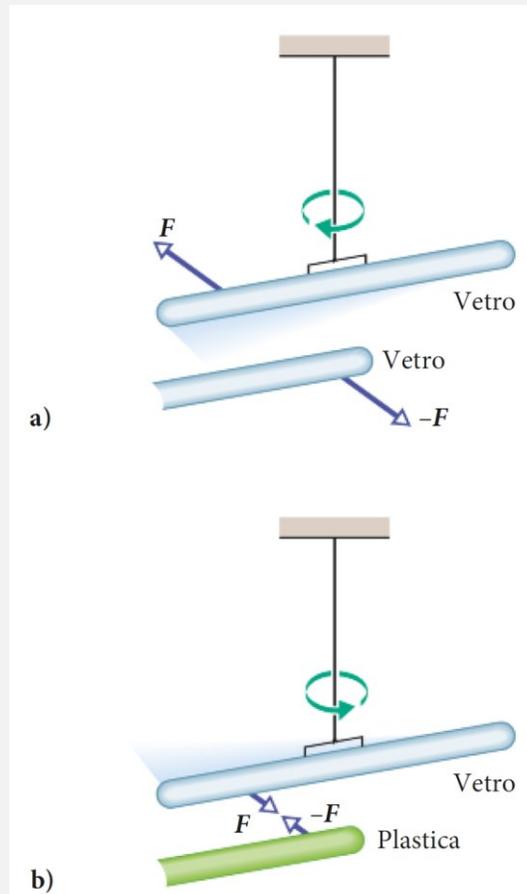


Figura 21.1 a) Le due bacchette di vetro sono state strofinate con un panno di seta e una di esse è stata appesa a un filo. Quando sono vicine l'una all'altra, le due bacchette si respingono. **b)** La bacchetta di plastica è stata strofinata con una pelle di camoscio. Quando viene avvicinata alla bacchetta di vetro, le due bacchette si attraggono.

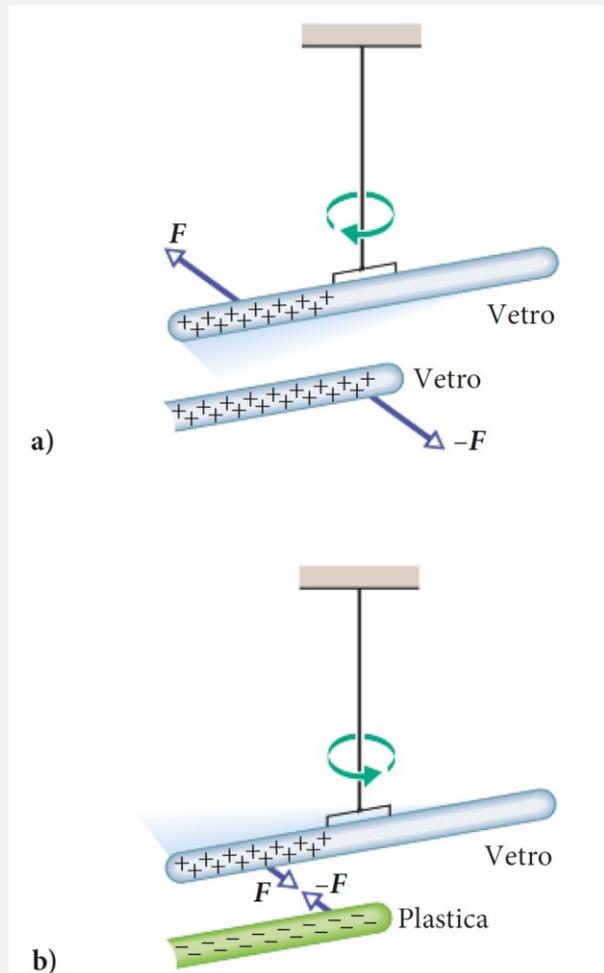


Figura 21.2 a) Due bacchette cariche con carica dello stesso segno si respingono. **b)** Due bacchette cariche con carica di segno opposto si attraggono. I segni «+» indicano una carica totale positiva e i segni «-» una carica totale negativa.

ELETTROSTATICA NEL VUOTO

Anche le forze di natura elettrica soddisfano il terzo principio della dinamica (principio di azione e reazione).

In natura esistono due tipi diversi di cariche elettriche:

- per convenzione si dice che sostanze come il vetro, per strofinio con lana, acquistano carica positiva (sostanze vetrose)
- sostanze come l'ambra per strofinio acquistano carica negativa (sostanze resinose).

Cariche dello stesso segno si respingono mentre cariche di segno opposto si attraggono.

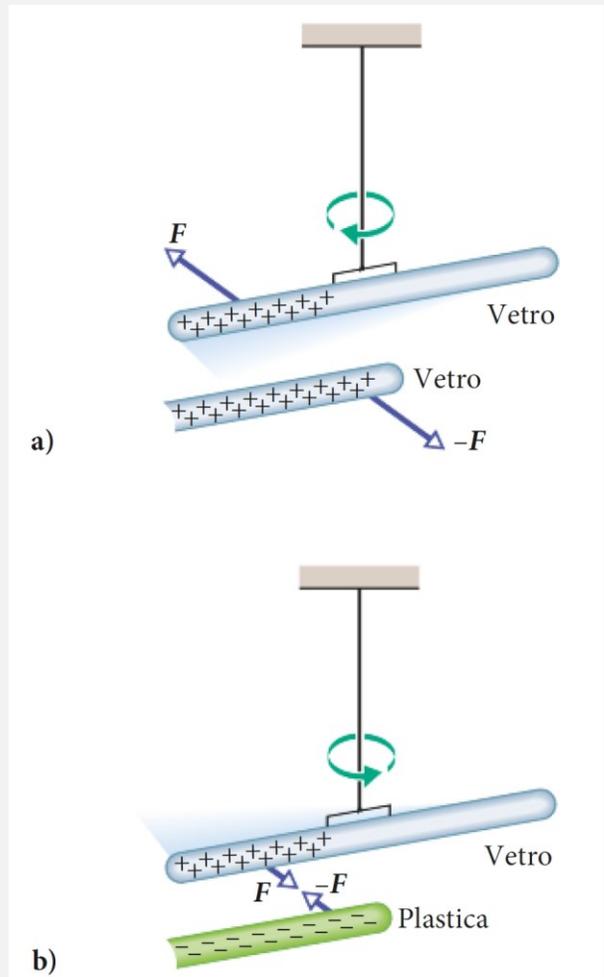


Figura 21.2 a) Due bacchette cariche con carica dello stesso segno si respingono. **b)** Due bacchette cariche con carica di segno opposto si attraggono. I segni «+» indicano una carica totale positiva e i segni «-» una carica totale negativa.

ELETTROSTATICA NEL VUOTO

LEGGE DI COULOMB: Se due particelle cariche vengono avvicinate l'una all'altra, ciascuna di esse esercita sull'altra una **FORZA ELETTROSTATICA**.

Disegnate sempre il vettore della forza con la coda sulla particella.

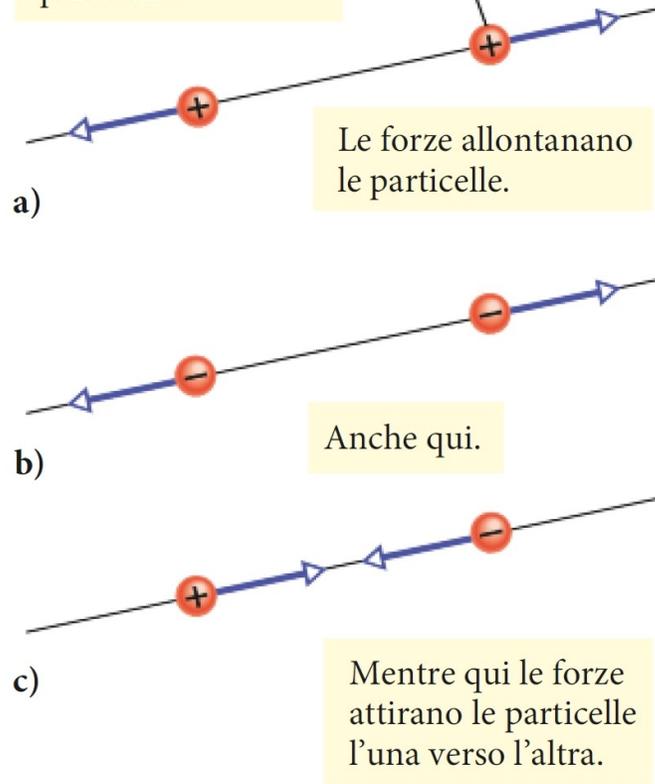


Figura 21.5 Due particelle cariche si respingono se hanno cariche dello stesso segno: **a)** entrambe positive o **b)** entrambe negative. **c)** Si attraggono se hanno cariche di segni opposti.

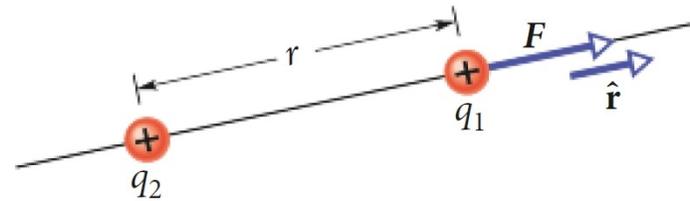


Figura 21.6 La forza elettrostatica che agisce sulla particella 1 può essere descritta in termini di un vettore \hat{r} diretto lungo un asse radiale che attraversa le due particelle ed è orientato nel verso uscente dalla particella 2.

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

r è la distanza tra le particelle e k è la costante elettrostatica / costante di Coulomb

Se le cariche hanno segno uguale, il loro prodotto è positivo, quindi la forza agente sulla particella 1 ha lo stesso verso del vettore \hat{r} .

Se le cariche hanno segno opposto, il loro prodotto è negativo, quindi la forza agente sulla particella 1 ha verso opposto a \hat{r}

ELETTROSTATICA NEL VUOTO

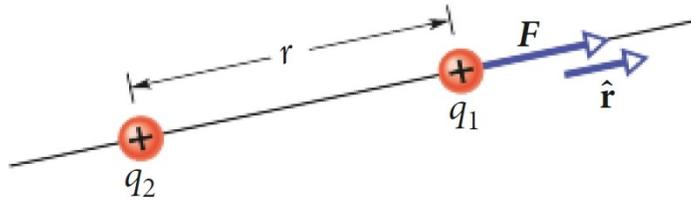


Figura 21.6 La forza elettrostatica che agisce sulla particella 1 può essere descritta in termini di un vettore \hat{r} diretto lungo un asse radiale che attraversa le due particelle ed è orientato nel verso uscente dalla particella 2.

LEGGE DI COULOMB: Se due particelle cariche vengono avvicinate l'una all'altra, ciascuna di esse esercita sull'altra una **FORZA ELETTROSTATICA**.

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

Nel SI l'unità di carica è il Coulomb C , definito come quella carica che attraversa in un secondo un conduttore percorso dalla corrente di un Ampère (A). Nel SI

$$k \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.9875 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \quad \epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$$

ϵ_0 = costante dielettrica del vuoto

ELETTROSTATICA NEL VUOTO

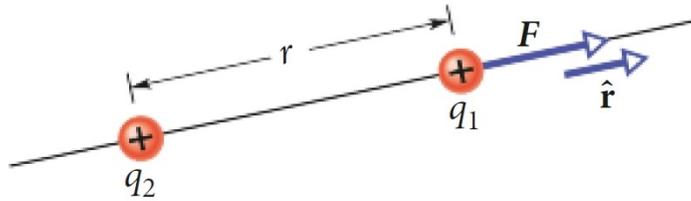


Figura 21.6 La forza elettrostatica che agisce sulla particella 1 può essere descritta in termini di un vettore \hat{r} diretto lungo un asse radiale che attraversa le due particelle ed è orientato nel verso uscente dalla particella 2.

LEGGE DI COULOMB: Se due particelle cariche vengono avvicinate l'una all'altra, ciascuna di esse esercita sull'altra una **FORZA ELETTROSTATICA**.

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

La legge di Coulomb è valida (esattamente) per cariche puntiformi.

La legge di Coulomb è formalmente analoga a quella della gravitazione, con la carica elettrica al posto della massa: l'unica differenza è che la massa è solo positiva e quindi la forza gravitazionale è sempre attrattiva.

È utile confrontare le due forze per un elettrone e un protone posti alla distanza r_0

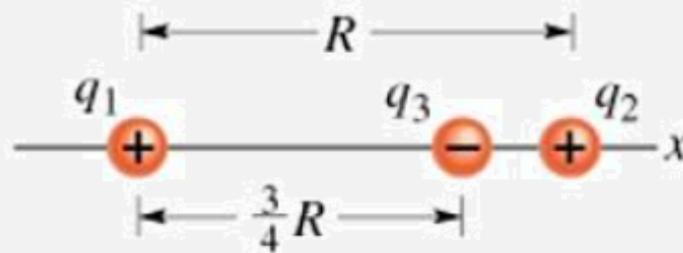
$$F_g = \frac{Gm_e m_p}{r_0^2} \quad F_e = \frac{ke^2}{r_0^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{F_e}{F_g} = \frac{ke^2}{Gm_e m_p} \simeq 2.2 \cdot 10^{39}$$

Esempio.

Tre cariche fisse q_1 , q_2 , q_3 sono collocate sull'asse x .

$$q_1 = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}, \quad q_2 = 3.2 \cdot 10^{-19} \text{ C}, \quad q_3 = -3.2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

q_1 e q_2 sono poste alla distanza $R = 0.02 \text{ m}$, mentre q_3 si trova tra di loro, alla distanza $\frac{3}{4} R$ da q_1 . Calcolare la forza elettrostatica \mathbf{F}_1 agente sulla carica q_1 per effetto della altre due.



La forza \mathbf{F}_1 è data dalla somma (vettoriale) delle forze elettrostatiche \mathbf{F}_{12} e \mathbf{F}_{13} , che sono esercitate su q_1 rispettivamente dalle cariche q_2 e q_3 . Consideriamo per prima la forza \mathbf{F}_{12} e calcoliamone il modulo attraverso la legge di Coulomb:

$$\begin{aligned} |\mathbf{F}_{12}| &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1| |q_2|}{R^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2 \cdot \frac{(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (3.2 \cdot 10^{-19} \text{ C})}{(0.02 \text{ m})^2} = \\ &= 1.15 \cdot 10^{-24} \text{ N} \end{aligned}$$

Esempio.

La forza \mathbf{F}_{12} è di tipo repulsivo, dato che le cariche q_1 e q_2 sono di uguale segno, ed è pertanto diretta nel verso negativo dell'asse x .



Consideriamo ora la forza \mathbf{F}_{13} , il cui modulo è uguale a:

$$|\mathbf{F}_{13}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1| |q_3|}{\left(\frac{3}{4}R\right)^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2 \cdot \frac{(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (3.2 \cdot 10^{-19} \text{ C})}{(0.75 \cdot 0.02 \text{ m})^2} =$$
$$= 2.05 \cdot 10^{-24} \text{ N}$$



La forza \mathbf{F}_{13} è di tipo attrattivo, dato che le cariche q_1 e q_3 sono di segno opposto, ed è pertanto diretta nel verso positivo dell'asse x .

La forza $\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13}$ è diretta lungo l'asse x , nel verso positivo (dato che il modulo di \mathbf{F}_{13} è maggiore di quello di \mathbf{F}_{12}); il modulo di \mathbf{F}_1 è uguale a:

$$|\mathbf{F}_1| = (2.05 - 1.15) \cdot 10^{-24} \text{ N} \cong 9 \cdot 10^{-25} \text{ N}$$

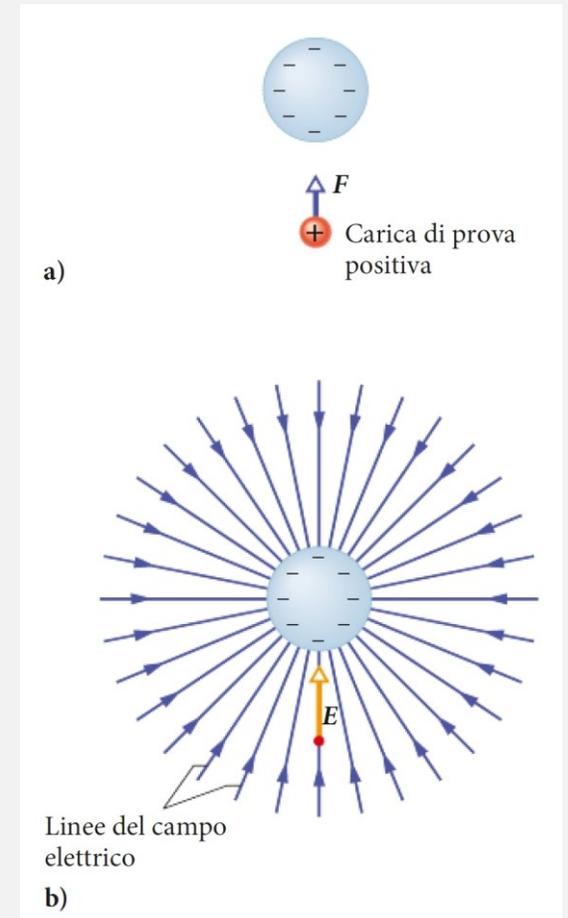
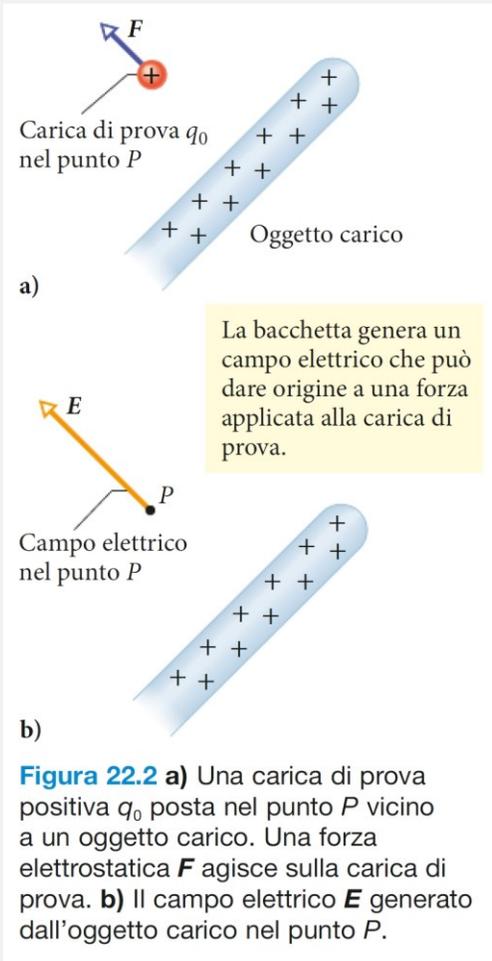
CAMPO ELETTRICO

Campo elettrico. Campo vettoriale, con modulo, direzione e verso. È costituito da una distribuzione di vettori campo elettrico E , uno per ciascun punto dello spazio che circonda una carica elettrica. In un punto P , in cui è posta una carica di prova, il campo elettrico è:

$$E = \frac{F}{q_0}$$

Le linee del campo elettrico sono uscenti dalle cariche positive (nelle quali hanno origine) ed entranti nelle cariche negative (nelle quali terminano)

Le dimensioni del campo elettrico sono quelle di una forza divisa per una carica e l'unità di misura è:
Newton/Coulomb = Volt/metro



Campo elettrico generato da una carica puntiforme. La forza che agisce su una carica di prova q per effetto di una carica puntiforme q_0 è (dalla legge di Coulomb):

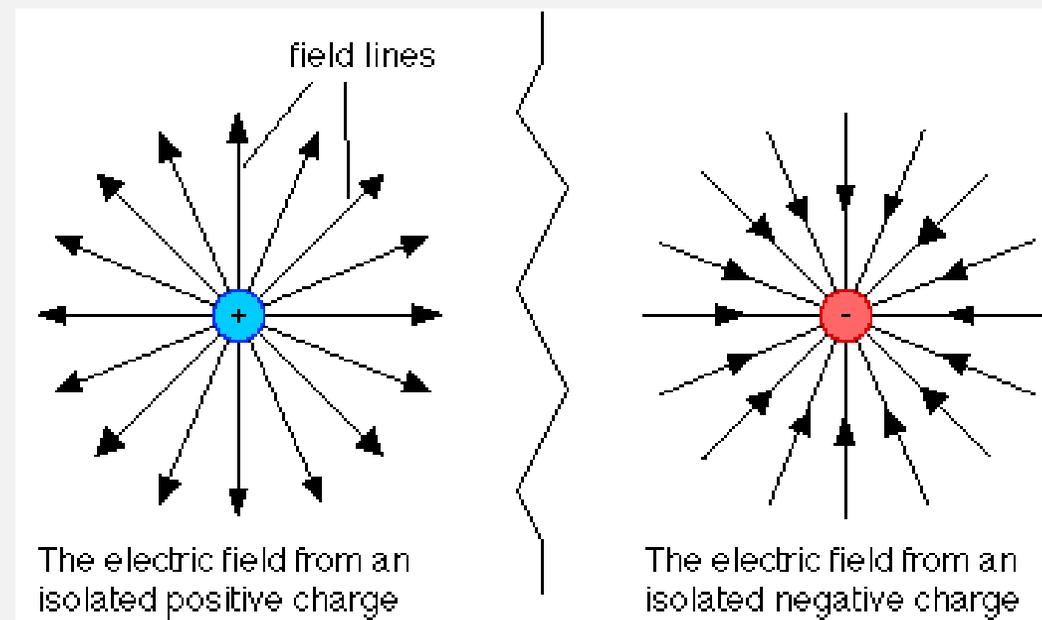
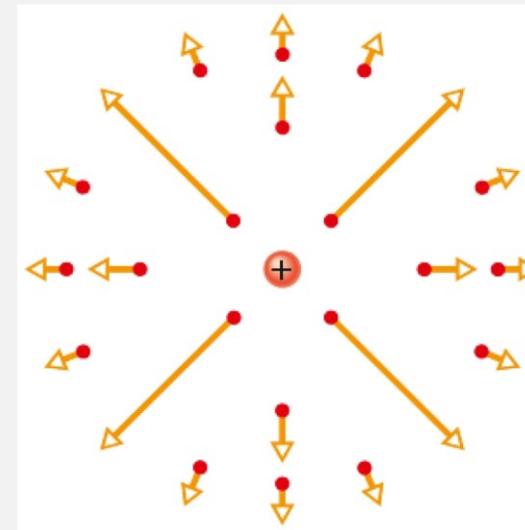
$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

Il campo elettrico generato dalla particella è:

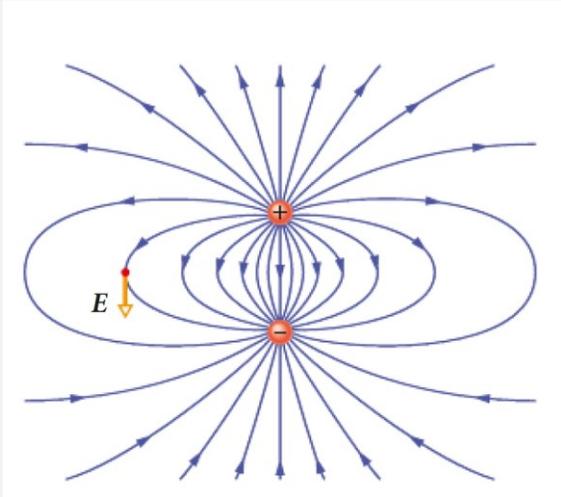
$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}} = k \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

Per ogni punto (tranne quelli in cui sono localizzate le cariche) passa una e una sola linea di forza.

ϵ_0 : costante dielettrica nel vuoto



Campo elettrico generato da un dipolo. Il dipolo elettrico è costituito da due particelle con stessa carica q , ma di segno opposto, separate da una distanza d .



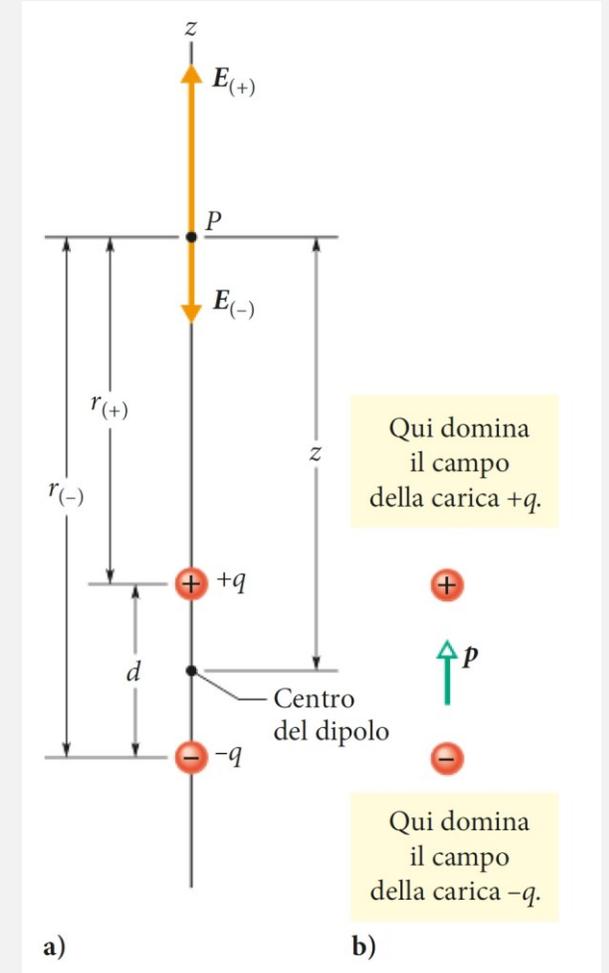
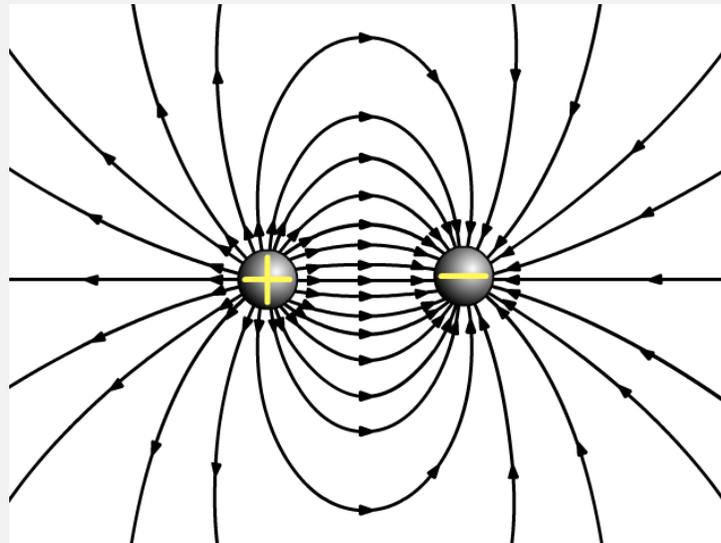
in ogni punto della linea il campo elettrostatico è tangente alla linea di campo

Nel punto P, il campo elettrico ha valore:

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{z^3}$$

Dove p è il **momento di dipolo elettrico**, corrispondente al prodotto qd

z è la distanza tra il punto considerato e il centro del dipolo



FLUSSO DEL CAMPO ELETTRICO

Il flusso Φ del campo elettrico attraverso una superficie è la «quantità» di campo elettrico che attraversa la superficie.

Superficie piana di area A immersa in un campo elettrico uniforme \mathbf{E}

La quantità di campo elettrico che attraversa la superficie dell'elemento ΔA è definita come flusso del campo elettrico $\Delta\Phi$:

$$\Delta\Phi = (E \cos \theta)\Delta A$$
$$\Delta\Phi = \mathbf{E} \cdot \Delta\mathbf{A}$$

Il flusso totale attraverso la superficie piana sarà:

$$\Phi = \sum \mathbf{E} \cdot \Delta\mathbf{A}$$

Quindi:

$$\Phi = \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$$

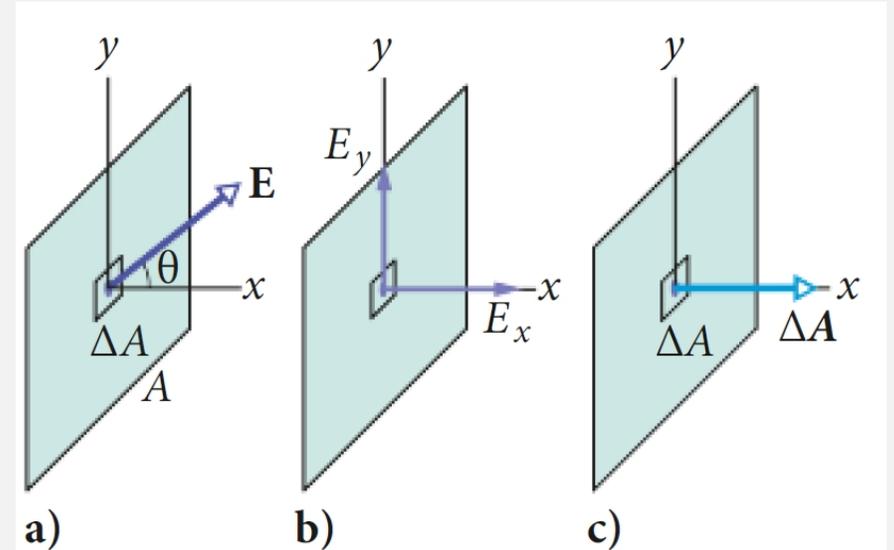


Figura 23.4 **a)** Un vettore campo elettrico attraversa un piccolo quadrato di una superficie piana. **b)** In realtà solo la componente x attraversa la porzione di superficie; la componente y la sfiora. **c)** Il vettore area della porzione è perpendicolare a essa e il suo modulo è uguale all'area della porzione di superficie.

FLUSSO DEL CAMPO ELETTRICO

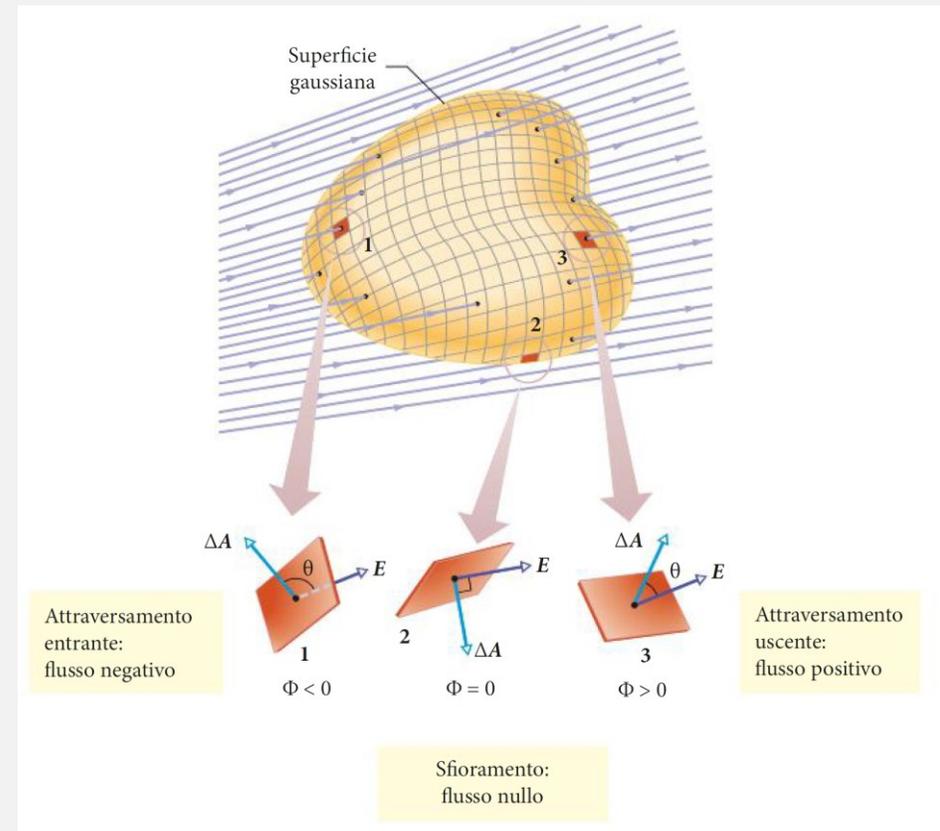
Legge di Gauss. Mette in relazione il flusso totale Φ che attraversa una superficie chiusa e la carica totale q_{int} racchiusa dalla superficie:

$$\varepsilon_0 \Phi = q_{int}$$

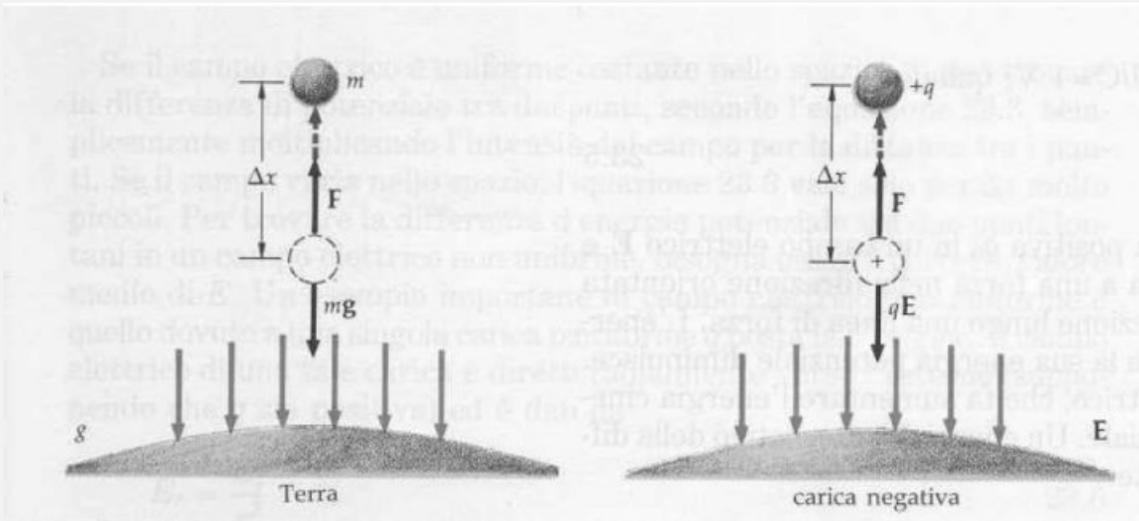
Consente di ricavare il campo elettrico conoscendo le cariche che lo generano

Dove Φ è il flusso totale attraverso una superficie. Si calcola considerando il flusso attraverso ciascuna porzione della superficie e poi sommando tutti i risultati:

$$\Phi = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$$



ENERGIA POTENZIALE ELETTROSTATICA



È analogo al caso gravitazionale in cui $E = mgh$

Lavoro compiuto da F_{ext} :

$$L_{ext} = \mathbf{F}_{ext} \cdot \Delta \mathbf{x} = F_{ext,x} \Delta x = -q_0 E_x \Delta x \quad (L_{ext} = -L_{campo})$$

Aumento di energia potenziale della carica:

$$\Delta U = L_{ext} = -q_0 E_x \Delta x \rightarrow \text{energia potenziale} \propto \text{carica esploratrice}$$

POTENZIALE ELETTRICO

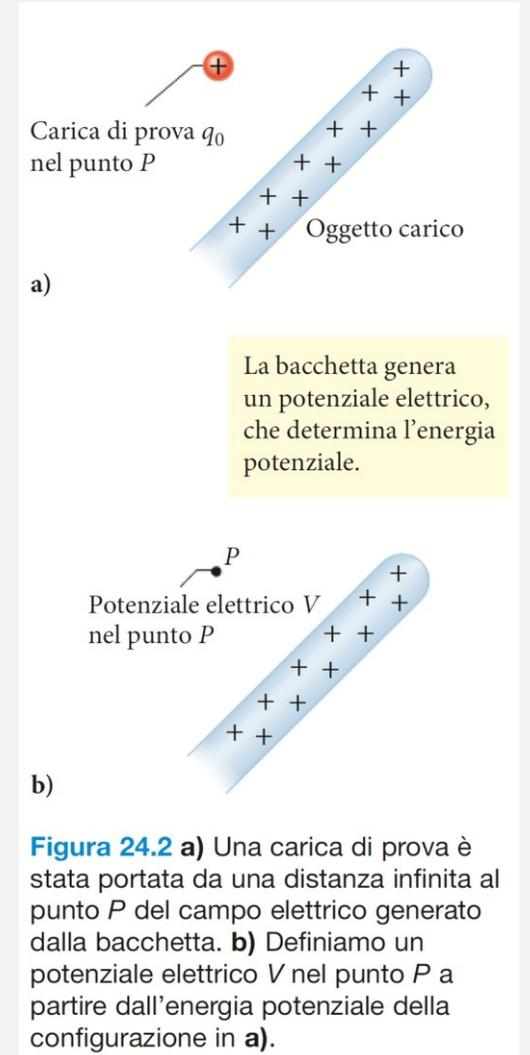
Il potenziale elettrico V in un punto P nel campo elettrico generato da un oggetto carico è:

$$V = \frac{-L_{\infty}}{q_0} = \frac{U}{q_0}$$

L_{∞} è il lavoro che sarebbe compiuto dalla forza elettrica su una carica positiva di prova q_0 se questa fosse trasportata da una distanza infinita a P ; U è l'energia potenziale elettrica che sarebbe di conseguenza immagazzinata nel sistema carica di prova – oggetto carico.

Se una particella con carica q è posta in un punto in cui il potenziale elettrico di un oggetto carico è V , l'energia potenziale elettrica U del sistema particella-oggetto è:

$$U = qV$$



DIFFERENZA DI POTENZIALE ELETTRICO

Se una particella si muove attraverso una differenza di potenziale ΔV , la variazione dell'energia potenziale elettrica è:

$$\Delta U = q\Delta V = q(V_f - V_i) \rightarrow \Delta V = \frac{\Delta U}{q} = -E_x \Delta x$$

Unità di misura nel SI: **Volt** $\rightarrow 1 V = 1 \frac{J}{C}$

Differenza di energia potenziale elettrostatica riferita all'unità di carica

Riespressione dell'unità del campo elettrico:

$$1 \frac{N}{C} = 1 \frac{N \cdot m}{C \cdot m} = 1 \frac{J}{C \cdot m} = 1 \frac{V}{m}$$

DIFFERENZA DI POTENZIALE ELETTRICO

$$U = q\Delta V = q(V_f - V_i) \rightarrow \Delta V = \frac{\Delta U}{q} = -E_x \Delta x$$

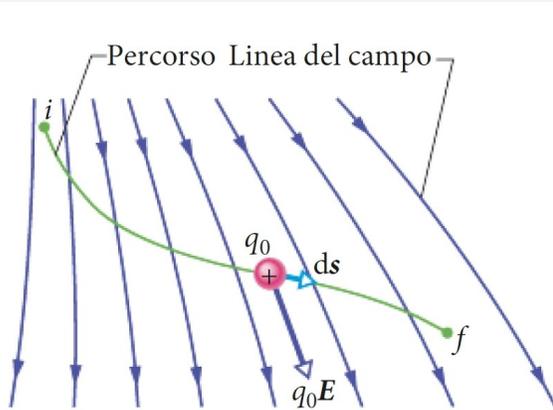


Figura 24.6 Una carica di prova q_0 si sposta dal punto i al punto f lungo il percorso mostrato in un campo elettrico non uniforme. Durante uno spostamento ds una forza elettrostatica $q_0 \mathbf{E}$ agisce sulla carica di prova. Questa forza ha la direzione e il verso della linea del campo nel punto in cui si trova la carica di prova.

Sappiamo che il Lavoro infinitesimo dL compiuto da una forza F su una particella durante uno spostamento dx è:

$$dL = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}$$

Avendo $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$, otteniamo:

$$dL = q\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$$

Lavoro totale compiuto dal campo elettrico sulla particella mentre questa si muove dal punto i al punto f :

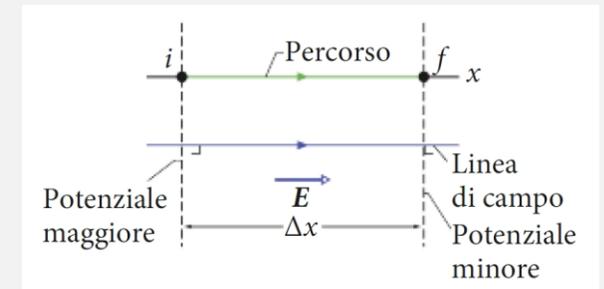
$$L = q \int_i^f \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$$

Sostituiamo:

$$V_f - V_i = - \int_i^f \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$$

Equazione per calcolare la differenza di potenziale tra due punti qualsiasi del campo (ponendo $V_i = 0$)

$$V = - \int_i^f \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$$



La differenza di potenziale tra due punti qualsiasi in un campo elettrico è uguale all'opposto dell'integrale di linea.

La forza elettrostatica è conservativa: tutti i percorsi portano allo stesso risultato.

DIFFERENZA DI POTENZIALE ELETTRICO

$$V = - \int_i^f \mathbf{E} ds$$

Poniamo V_f all'infinito e $V_i = V(\text{in } R)$ e sostituiamo $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$:

$$0 - V = - \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_R^\infty \frac{1}{r^2} dr = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{r} \right]_R^\infty = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R}$$

Risolvendo rispetto a V e scrivendo r al posto di R :

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

Potenziale dovuto a una particella carica

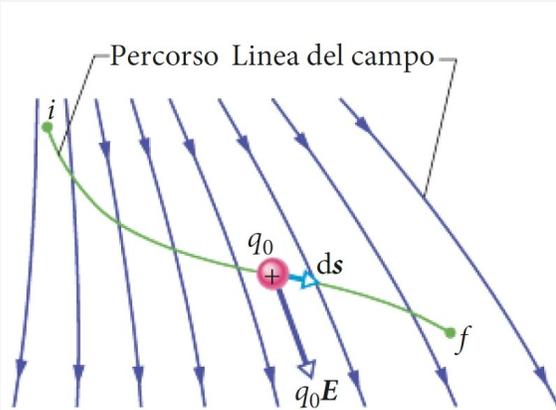


Figura 24.6 Una carica di prova q_0 si sposta dal punto i al punto f lungo il percorso mostrato in un campo elettrico non uniforme. Durante uno spostamento ds una forza elettrostatica $q_0 \mathbf{E}$ agisce sulla carica di prova. Questa forza ha la direzione e il verso della linea del campo nel punto in cui si trova la carica di prova.

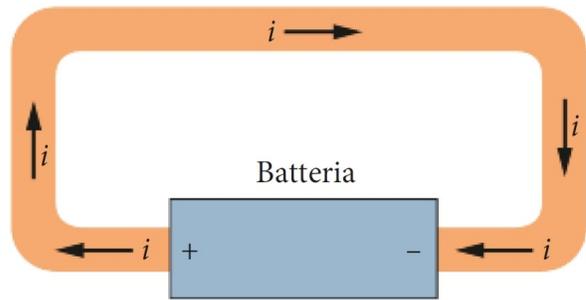
Potenziale dovuto a un sistema di particelle cariche.

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i}$$

CORRENTE ELETTRICA



a)



b)

Figura 26.1 **a)** Una spira di rame in equilibrio elettrostatico. L'intera spira si trova allo stesso potenziale e il campo elettrico è nullo in tutti i punti all'interno del rame. **b)** Aggiungere una batteria impone una differenza di potenziale tra i capi della spira connessi ai morsetti della batteria. La batteria produce così un campo elettrico all'interno della spira, da morsetto a morsetto, e il campo fa muovere le cariche attorno alla spira stessa. Questo movimento di cariche è una corrente i .

La corrente è sempre la stessa in qualunque sezione trasversale.

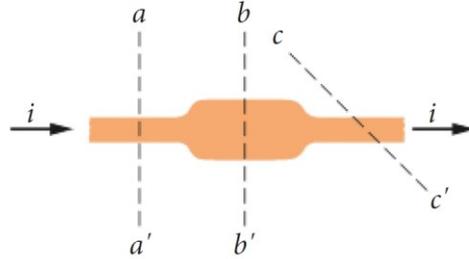


Figura 26.2 La corrente i attraverso il conduttore ha lo stesso valore nei piani aa' , bb' , e cc' .

Sezione di un conduttore, che è parte di una spira conduttrice nella quale è stata generata una data corrente. Se la carica dq passa attraverso un ipotetico piano (aa') nel tempo dt , la corrente i che attraversa quel piano è definita da:

$$i = \frac{dq}{dt}$$

Possiamo ricavare la carica che passa attraverso il piano della sezione in un intervallo di tempo da 0 a t tramite l'integrale:

$$q = \int dq = \int_0^t i dt$$

CORRENTE ELETTRICA

$$i = \frac{dq}{dt}$$

Unità di misura SI: Ampère $\rightarrow 1A = 1 \frac{C}{s} \rightarrow 1C = 1A \times 1s$

La corrente è una grandezza scalare: sia la carica sia il tempo sono scalari.

Spesso la corrente è rappresentata con frecce (ma non sono vettori!)

La freccia che indica il verso della corrente è disegnata nel verso in cui i portatori di carica positivi si muoverebbero, anche se i reali portatori di carica sono negativi e si muovono nel verso opposto [il verso convenzionale della corrente elettrica è quello delle cariche positive, anche se il moto reale degli elettroni è in verso opposto]

DENSITÀ DI CORRENTE

Flusso di carica che attraversa una sezione trasversale del conduttore in un punto particolare: **densità di corrente J** → ha stessa direzione e stesso verso della velocità delle cariche in moto se queste sono positive e verso opposto se queste sono negative.

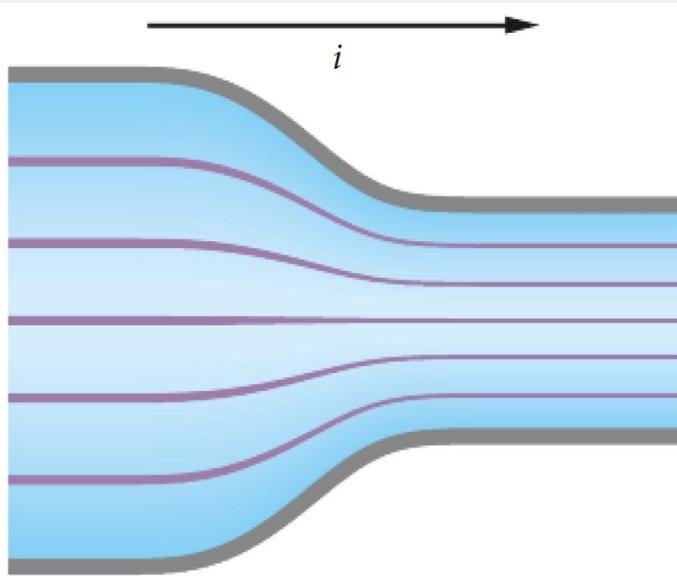


Figura 26.4 Linee di flusso che rappresentano la densità di corrente nel flusso di carica attraverso un conduttore con un restringimento.

L'intensità di corrente può essere scritta attraverso l'elemento di superficie come $J \cdot dA$, dove dA è il vettore area dell'elemento, a esso perpendicolare:

$$i = \int J \cdot dA$$

Se la corrente è uniforme attraverso la superficie e parallela a dA , allora anche J è uniforme e parallela a dA :

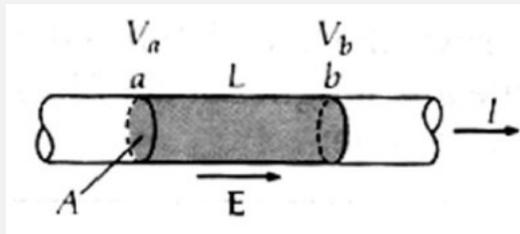
$$i = \int J \cdot dA = J \int dA = JA \rightarrow J = iA$$

dove A è l'area totale della superficie.

RESISTENZA

Se applichiamo la stessa differenza di potenziale tra le estremità di bacchette di rame e di vetro geometricamente simili, si hanno correnti molto diverse: la caratteristica del conduttore che entra in gioco in questo caso è la sua **resistenza elettrica**.

Determiniamo la resistenza tra due punti qualsiasi di un conduttore applicando una differenza di potenziale V tra quei punti e misurando la corrente i che si stabilisce. La resistenza R è allora:



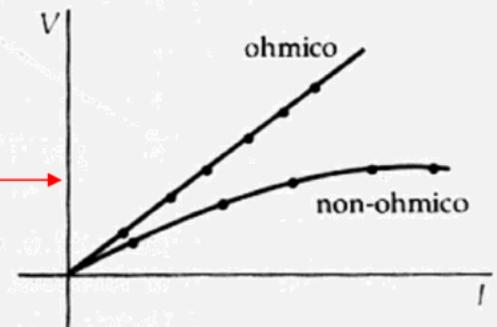
$$R = \frac{V}{i}$$

unità di misura SI, l'**Ohm** (Ω):

$$1\Omega = \frac{1V}{1A}$$

*Un conduttore la cui funzione all'interno di un circuito è quella di fornire una resistenza specifica è detto **resistore***

N.B. ci sono anche materiali che **non** seguono la legge di **Ohm**



LEGGE DI OHM

La resistenza di un oggetto dipende da:

- le sue caratteristiche geometriche (L,A)
- il materiale (ρ)

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\text{II LEGGE DI OHM})$$

ρ = resistività elettrica del materiale
unita' di misura si: $\Omega \cdot m$

Cavi elettrici fatti di rame
anche perché **duttile e per il prezzo**

Conduttori

Semiconduttori

Isolanti

Tabella 24.1
Resistività e coefficienti di temperatura

Materiale	Resistività ρ a 20 °C, $\Omega \cdot m$
argento	$1,6 \cdot 10^{-8}$
rame	$1,7 \cdot 10^{-8}$
alluminio	$2,8 \cdot 10^{-8}$
tungsteno	$5,5 \cdot 10^{-8}$
ferro	$10 \cdot 10^{-8}$
piombo	$22 \cdot 10^{-8}$
mercurio	$96 \cdot 10^{-8}$
nichelcromo	$100 \cdot 10^{-8}$
carbonio	$3500 \cdot 10^{-8}$
germanio	0,45
silicio	640
legno	$10^8 \div 10^{14}$
vetro	$10^{10} \div 10^{14}$
ebanite	$10^{13} \div 10^{16}$
ambra	$5 \cdot 10^{14}$
zolfo	10^{15}

MAGNETISMO

Abbiamo definito il campo elettrico E in un punto ponendo una particella di prova con carica q ferma in quel punto e misurando la forza elettrica F che agisce sulla particella:

$$E = \frac{F_E}{q}$$

Quando una particella carica si muove in un campo magnetico B , una forza magnetica agisce sulla particella:

$$F_B = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Dove q è la carica della particella e \mathbf{v} è la velocità della particella

Quindi: la forza F_B esercitata sulla particella è uguale alla carica q moltiplicata per il prodotto vettoriale tra la velocità \mathbf{v} e il campo magnetico \mathbf{B}

Considerando la definizione di prodotto vettoriale:

$$F_B = |q|vB \sin \phi$$

Dove ϕ è l'angolo fra le direzioni della velocità \mathbf{v} e del campo magnetico \mathbf{B}

FORZA DI LORENTZ

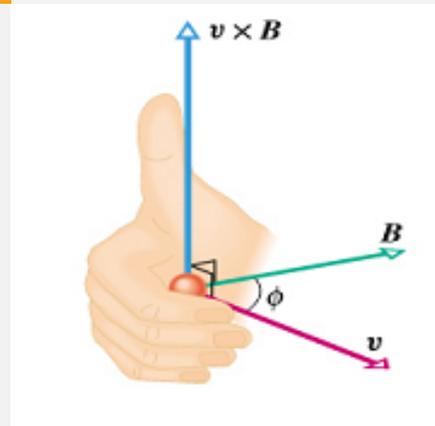
Se esiste un campo vettoriale \mathbf{B} e c'è una particella di carica q che si muove in questo campo con una certa velocità \mathbf{v} , allora questa carica sarà soggetta alla forza di Lorentz.

Definiamo un campo vettoriale \mathbf{B} , che chiameremo *densità di flusso magnetico* o *induzione magnetica*, per mezzo della forza esercitata su una carica in movimento

$$\vec{\mathbf{F}} = q\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}$$

$$F = qvB\sin(\phi)$$

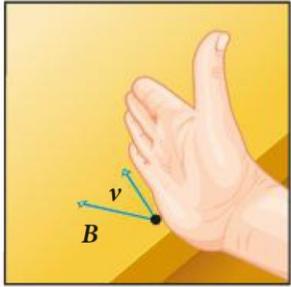
$$[B] = \left[\frac{F}{qv} \right] = \left[\frac{E}{LT^{-1}} \right] = \left[\frac{VT}{L^2} \right]$$



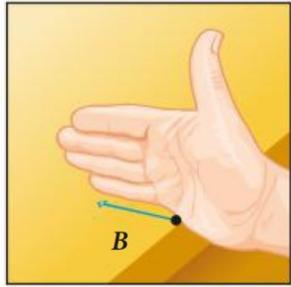
B si misura in Tesla [Vs/m^2]
= Weber / m^2
oppure Gauss (10^{-4}T)

MAGNETISMO

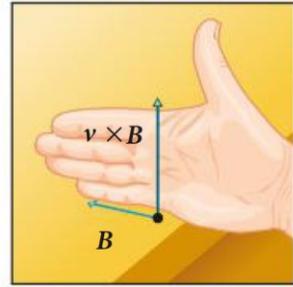
Le dita si chiudono da \mathbf{v} verso \mathbf{B} per ottenere $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$.



a)

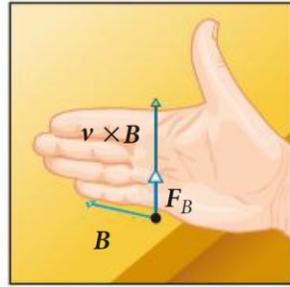


b)



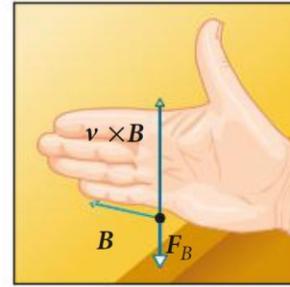
c)

La forza su una carica positiva.



d)

La forza su una carica negativa.



e)

Figura 28.2 a-c) La regola della mano destra (in cui le dita partendo da \mathbf{v} si muovono verso \mathbf{B} descrivendo il più piccolo angolo ϕ tra i due vettori) dà la direzione e il verso di $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ indicati dal pollice. **d)** Se q è positiva, il verso di $\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ è il verso di $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. **e)** Se q è negativa, il verso di $\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ è opposto a quello di $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$.

Caratteristiche Forza:

$$\mathbf{F} \propto q$$

$$\mathbf{F} \propto \mathbf{v}$$

$$\mathbf{F} \propto \sin \theta$$

$\mathbf{F} \perp$ al piano di \mathbf{v} e \mathbf{B}

Il **verso di \mathbf{F}** dipende da quelli di \mathbf{V} e \mathbf{B} e dal **segno di q** ($q\mathbf{v}$, \mathbf{B} e \mathbf{F} =terna destrorsa)

Modulo \mathbf{B} = costante di proporzionalità:

$$\frac{F}{qv \sin \theta} = B \Rightarrow F = qvB \sin \theta$$

Unità di misura SI: Tesla

$$\frac{1\text{N}}{1\text{C} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = 1\text{T} \quad (= 10^4 \text{G})$$

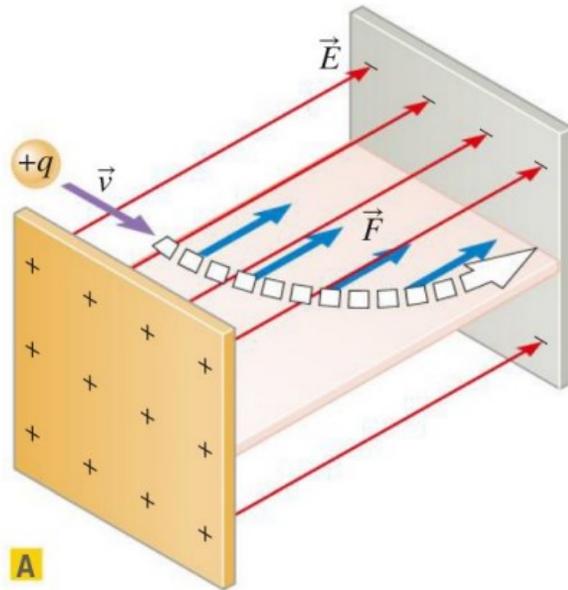
il campo elettrico E in ogni punto dello spazio è la forza F per unità di carica che agisce su una carica di prova positiva q posta in quel punto:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

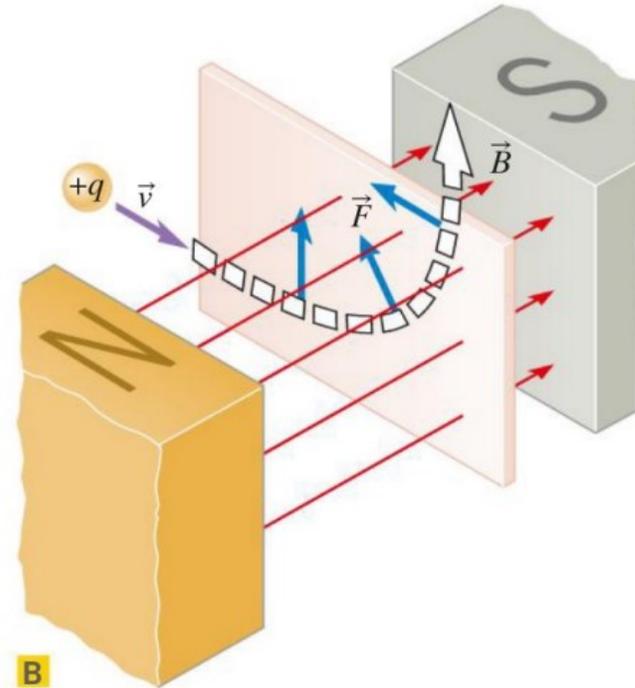
Nel caso del magnetismo però la forza dipende non solo dalla carica q ma anche dalla componente $v \cdot \text{sen}(\theta)$, della velocità che è perpendicolare al campo magnetico:

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}}{q \cdot v \cdot \text{sen}(\theta)}$$

Campo elettrico

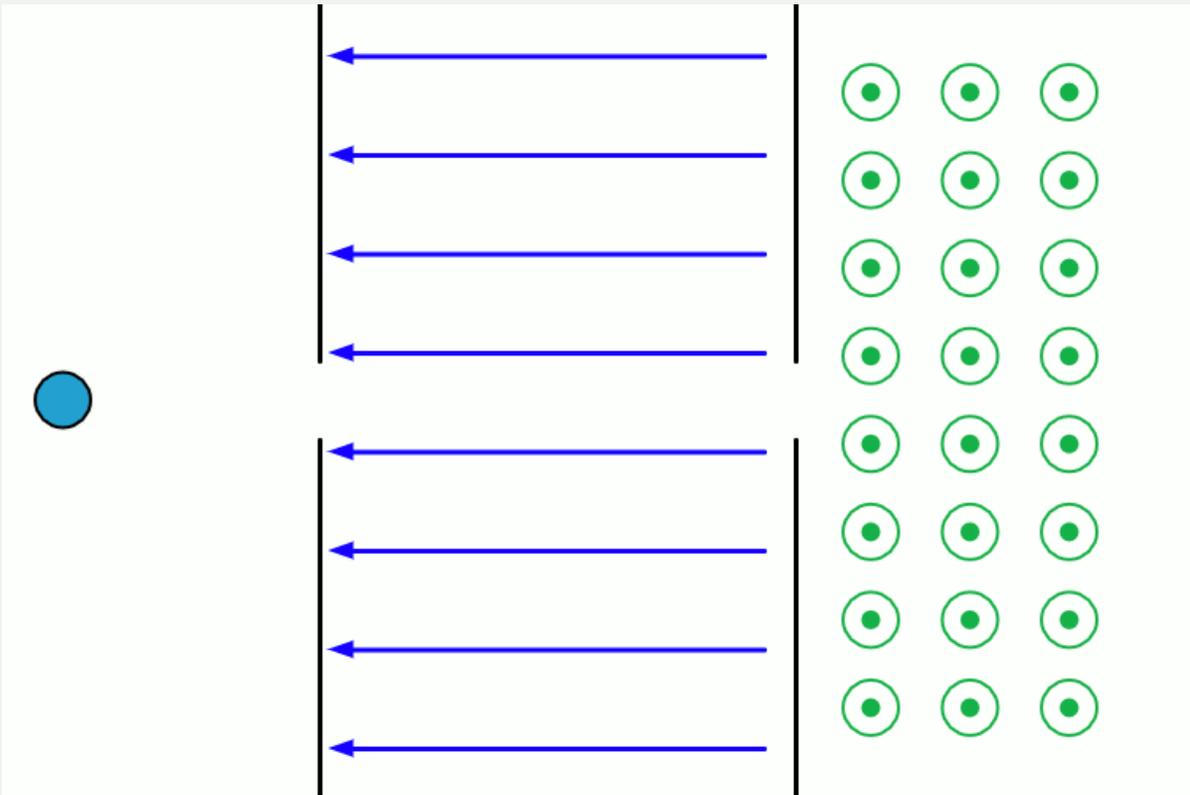


La forza elettrica F che agisce su una carica positiva è parallela al campo elettrico E e incurva la traiettoria della particella nel piano orizzontale.



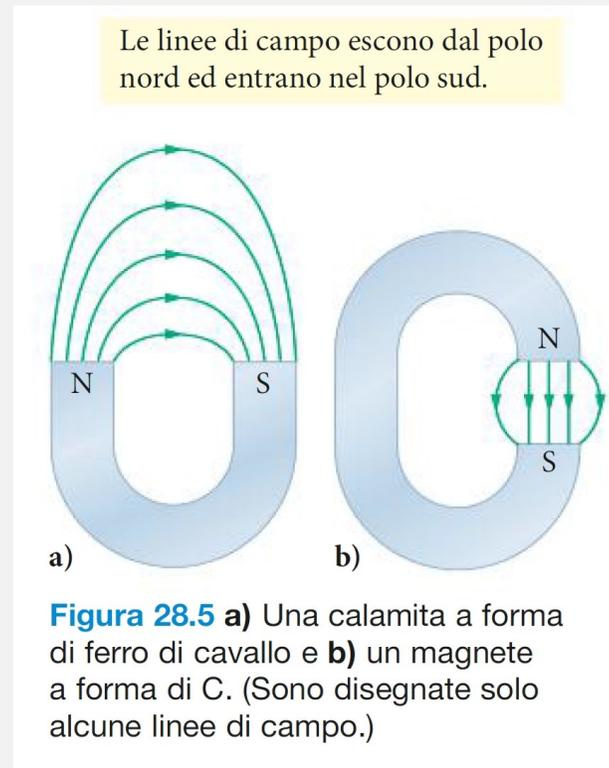
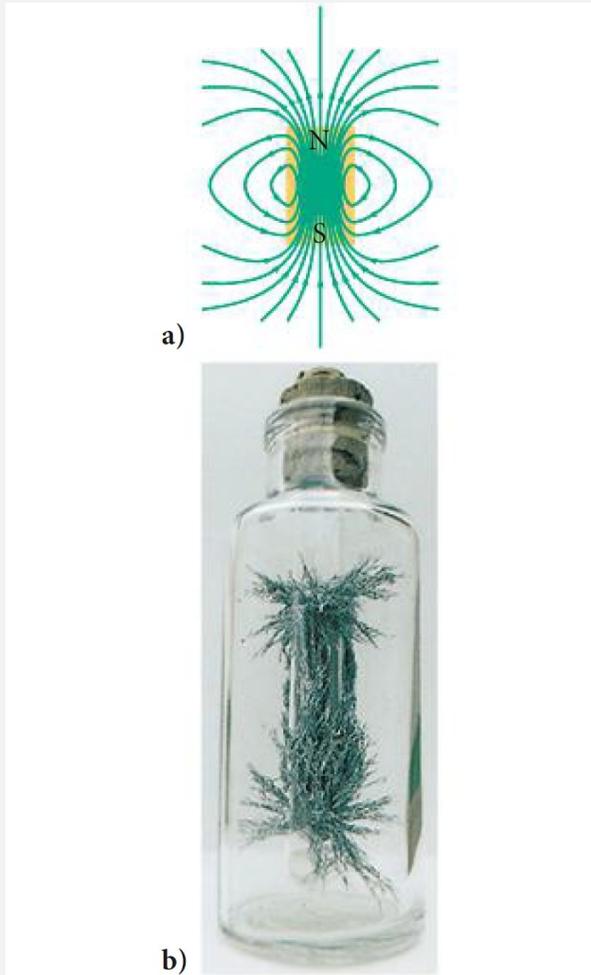
Campo magnetico

La forza di Lorentz F è perpendicolare sia al campo magnetico B sia alla velocità v e incurva la traiettoria della particella in un piano verticale.



CAMPO MAGNETICO

Il campo magnetico si può rappresentare con linee di campo: 1) la direzione della tangente a una linea di campo magnetico in un punto dà la direzione e il verso di \mathbf{B} in quel punto; 2) la spaziatura tra le linee è una misura del modulo di \mathbf{B} (il campo magnetico è più intenso dove le linee sono più ravvicinate)

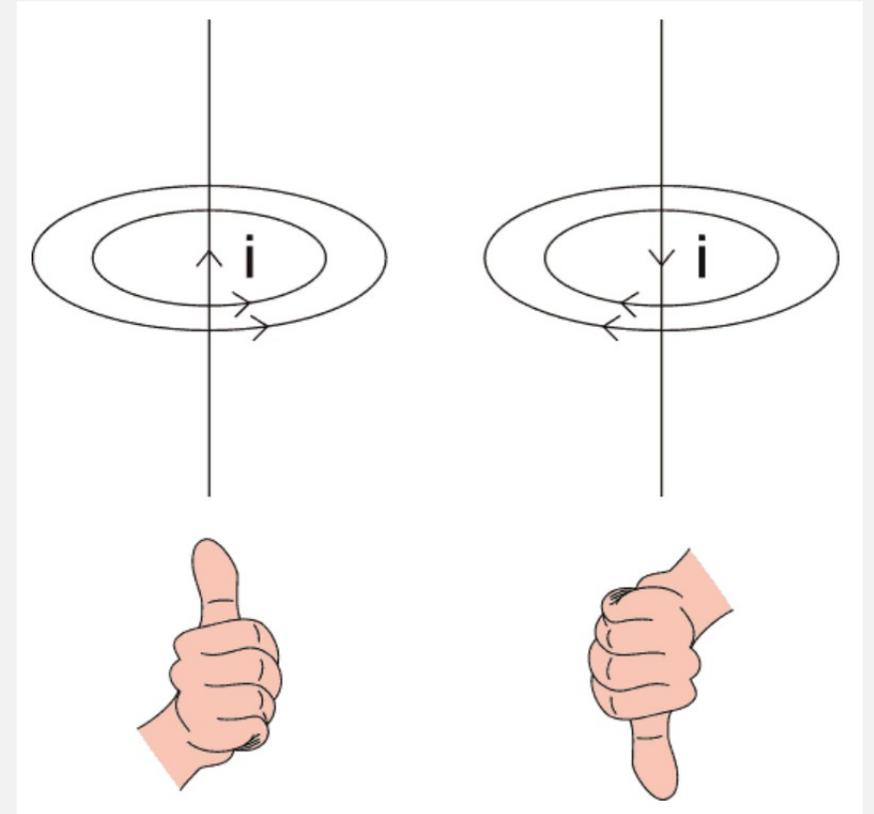
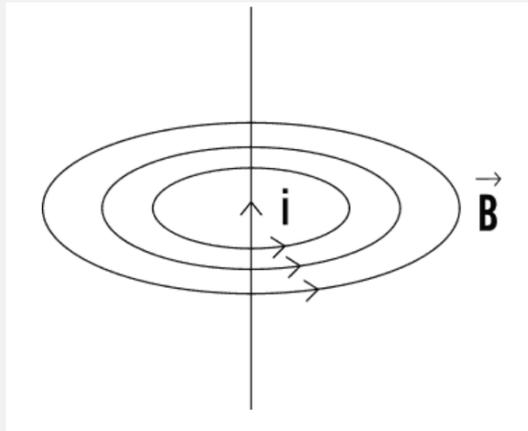


Le linee di campo (chiuso) entrano da un'estremità del magnete e escono dall'altra. L'estremità da cui le linee di campo emergono è detta polo nord del magnete; l'altra estremità, dove le linee di campo entrano nel magnete, è detta polo sud. Poiché un magnete ha due poli, è detto **dipolo magnetico**

CAMPO MAGNETICO

Campo magnetico generato da una corrente.

Un filo rettilineo molto lungo percorso da corrente genera linee di forza di campo magnetico circolari e concentriche sul filo



l'intensità B del campo magnetico prodotto da un filo rettilineo indefinitamente esteso è direttamente proporzionale alla corrente I che lo percorre e inversamente proporzionale alla distanza radiale r dal filo

$$B \propto \frac{I}{r}$$

CAMPO MAGNETICO

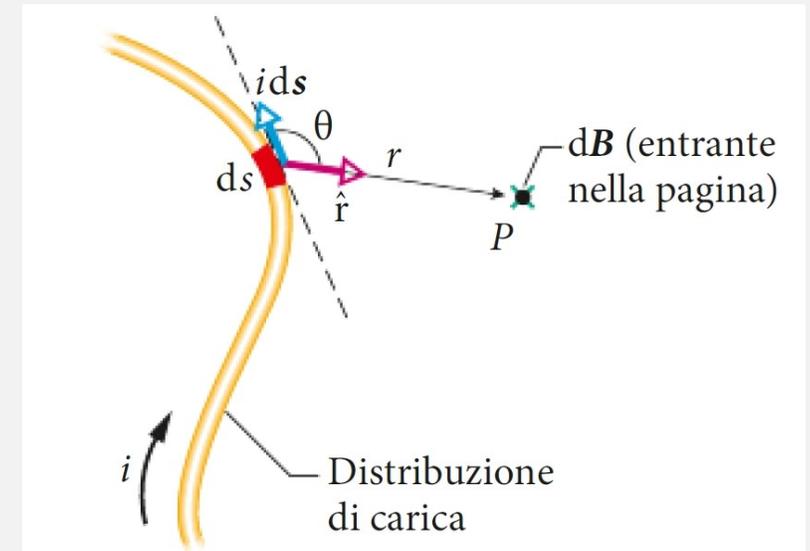
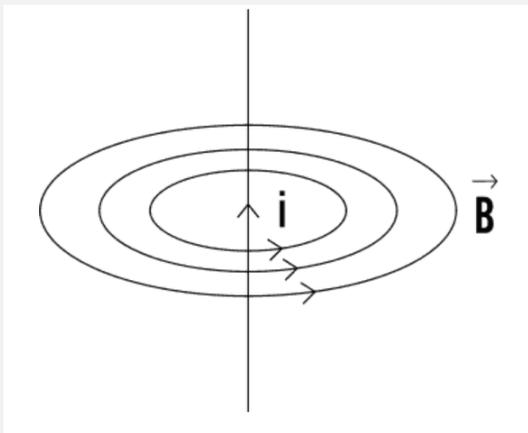
Campo magnetico generato da una corrente.

Un filo rettilineo molto lungo percorso da corrente genera linee di forza di campo magnetico circolari e concentriche sul filo

Il modulo del campo $d\mathbf{B}$ prodotto nel punto P a una distanza r da un elemento di corrente ids è:

$$dB = \frac{\mu_0 i ds \sin \theta}{4\pi r^2}$$

Dove θ è l'angolo fra ids e \hat{r} ; μ_0 è la permeabilità magnetica del vuoto = $4\pi \cdot 10^{-7} T \cdot m/A$



CAMPO MAGNETICO

Legge di Biot-Savart

Direzione e verso di \mathbf{B} ? \rightarrow quelli del prodotto vettoriale $d\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{r}}$:

$$d\mathbf{B} = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) \frac{i d\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

Questo elemento di corrente genera un campo magnetico in P entrante nel piano della pagina.

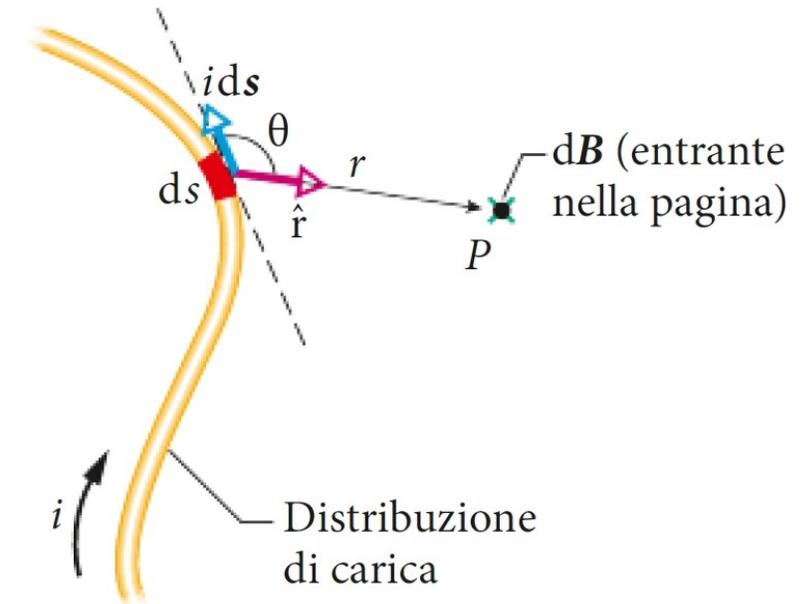


Figura 29.1 Un elemento di corrente $i d\mathbf{s}$ genera un campo magnetico infinitesimo $d\mathbf{B}$ nel punto P . La crocetta \times verde (la coda di una freccia) sul pallino che indica il punto P mostra che $d\mathbf{B}$ è *entrante* nel piano della pagina.

CAMPO MAGNETICO

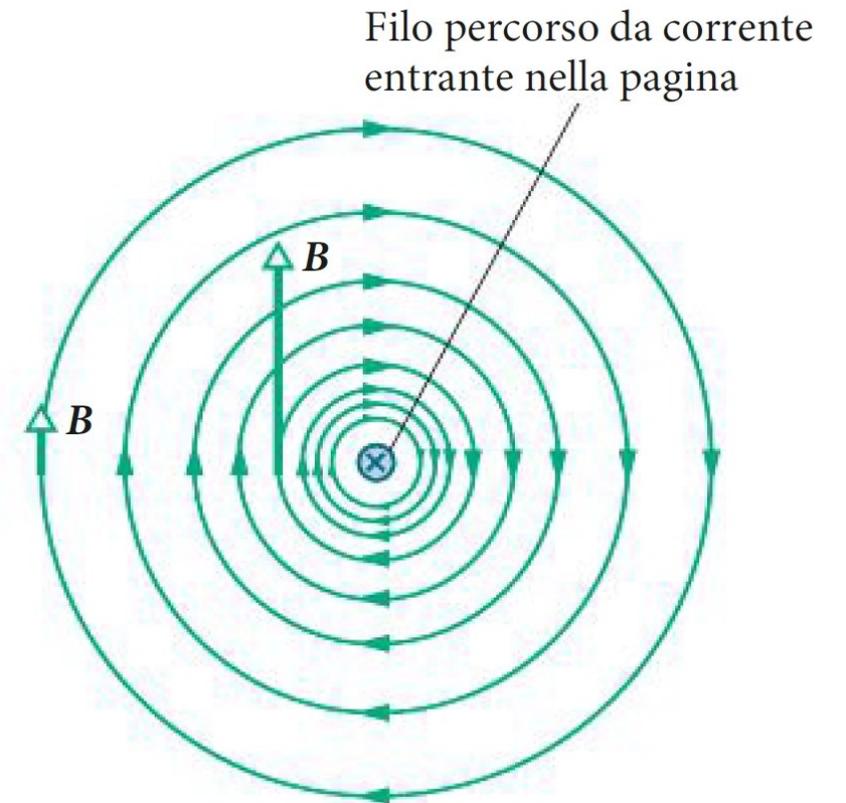
Legge di Biot-Savart

Il modulo del campo magnetico a una distanza R da un lungo (infinito) filo rettilineo in cui scorre una corrente i è data da:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

L'aumento della distanza tra le linee all'aumentare della distanza dal filo rappresenta la diminuzione del modulo di B dovuta al termine $1/R$ (così come la diminuzione della lunghezza dei vettori)

Il vettore campo magnetico in qualsiasi punto è tangente alla circonferenza.

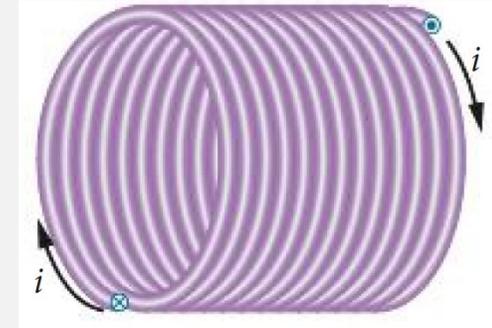
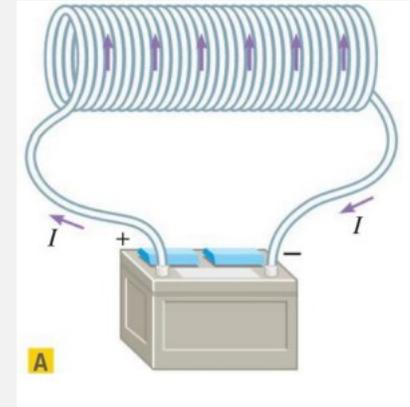


CAMPO MAGNETICO

Campo magnetico generato da un solenoide.

Un solenoide è una bobina di forma cilindrica formata da una serie di spire circolari molto vicine fra loro e realizzate con un unico filo di materiale conduttore.

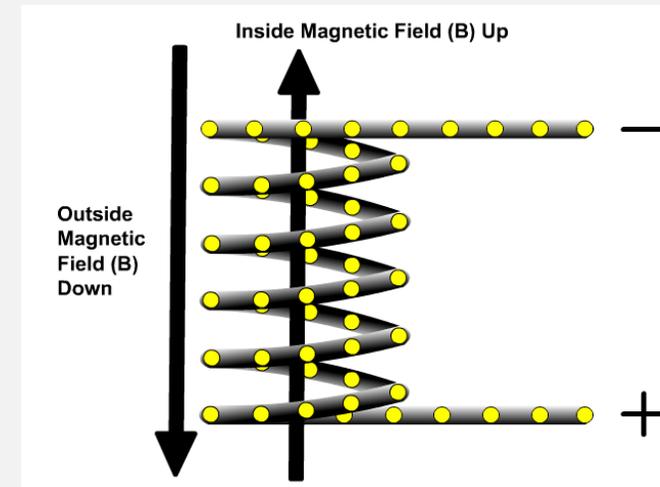
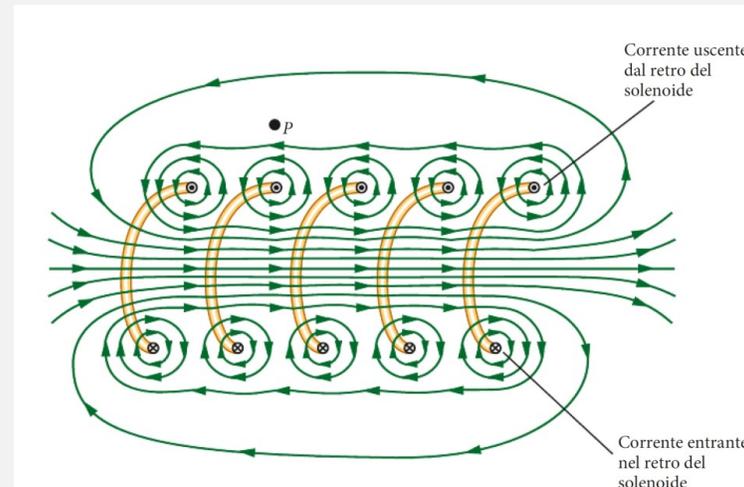
Se la lunghezza dell'avvolgimento di spire è minore di 10 volte il raggio della singola spira è definito bobina, mentre se la lunghezza dell'avvolgimento è maggiore di 10 volte il raggio è definito solenoide.



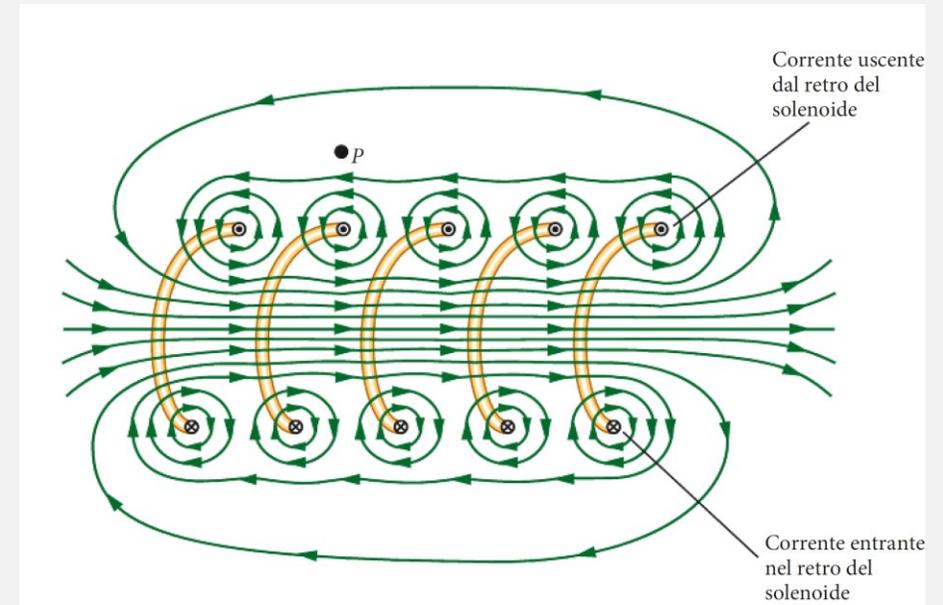
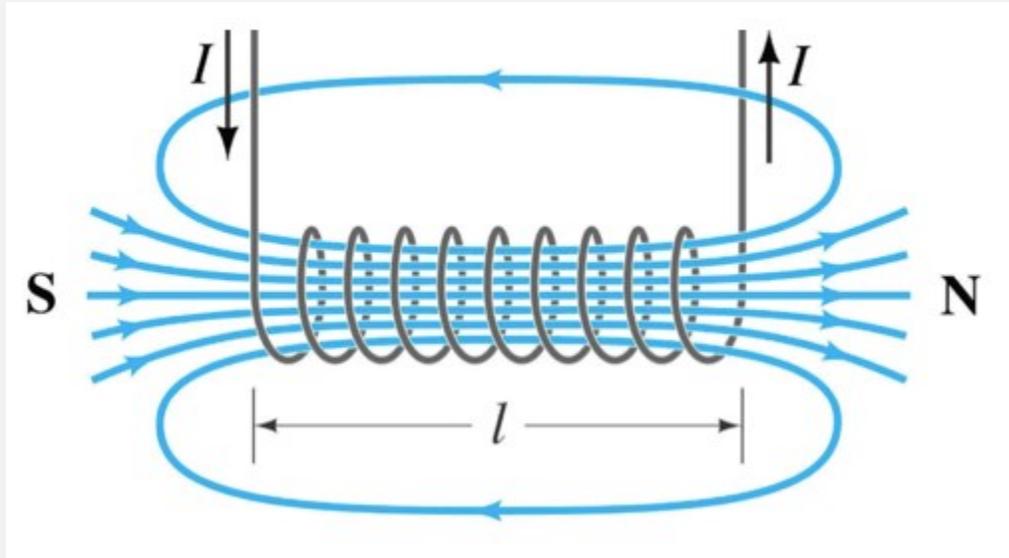
All'interno di un lungo solenoide percorso dalla corrente I , in punti non vicini alle sue estremità, il modulo B del campo magnetico è:

$$B = \mu_0 \frac{I}{L} n$$

n è il numero di spire per unità di lunghezza; L è la lunghezza del solenoide



Campo magnetico generato da un solenoide.



Quando il solenoide è molto lungo rispetto al diametro, il campo magnetico all'esterno del solenoide è praticamente nullo, mentre all'interno, lontano dalle estremità, è uniforme e parallelo all'asse del solenoide

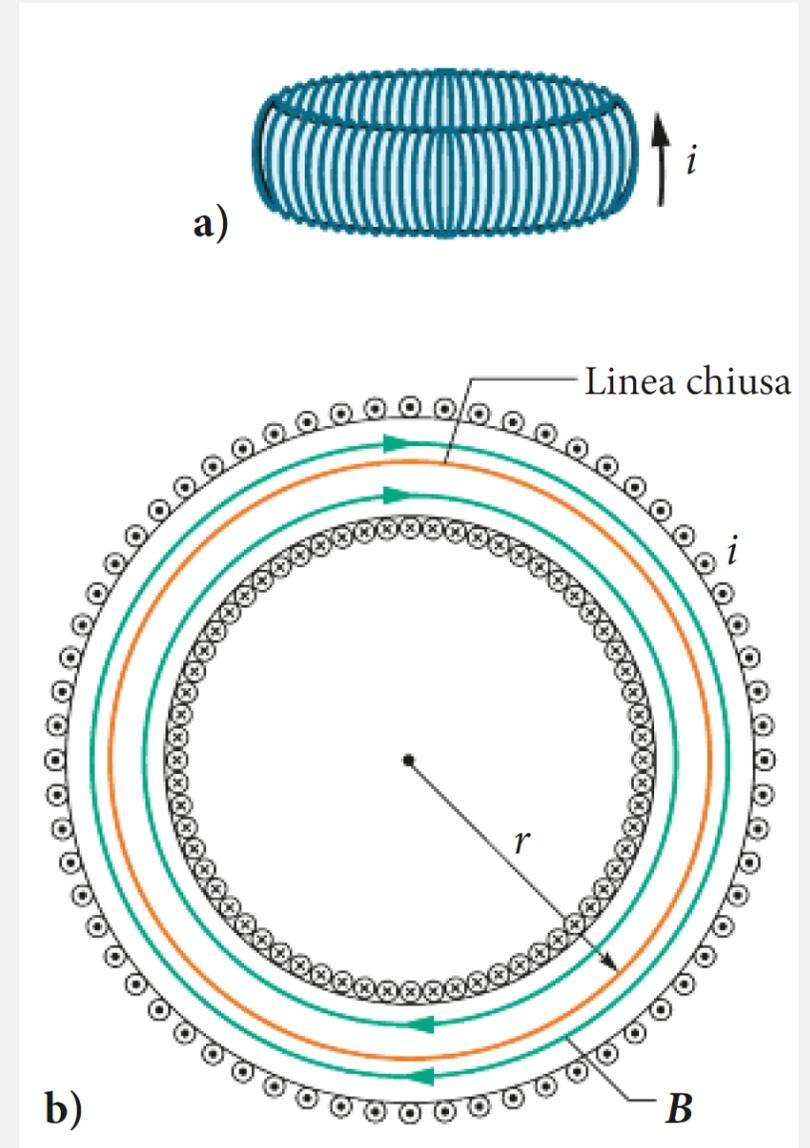
Campo magnetico generato da un toroide.

In un punto all'interno di un toroide il modulo B del campo magnetico è:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} n$$

r è la distanza dal centro del toroide al punto

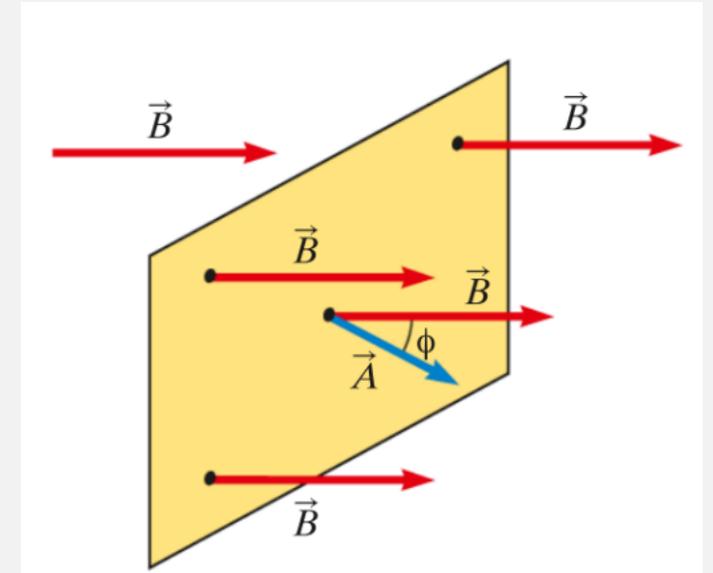
Toroide: solenoide piegato fino a che le sue estremità non si incontrano, formando un «bracciale» vuoto al centro



Il flusso del campo magnetico.

Se il campo magnetico è uniforme, si definisce flusso di B attraverso la superficie S la grandezza:

$$\Phi(\vec{B}) = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \phi$$

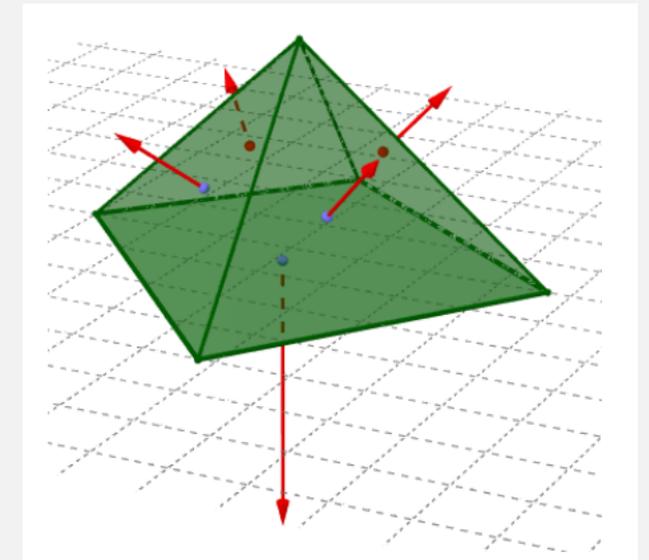


Il flusso del campo magnetico attraverso una superficie gaussiana.

Se possiamo dividere la superficie gaussiana in tante regioni tanto piccole da poter essere considerate piane

Se il campo magnetico su ogni regione è uniforme:

$$\Phi_S(\vec{B}) = \vec{B}_1 \cdot \vec{A}_1 + \vec{B}_2 \cdot \vec{A}_2 + \vec{B}_3 \cdot \vec{A}_3 + \dots$$



Il flusso del campo magnetico attraverso una superficie gaussiana → IL TEOREMA DI GAUSS

Il flusso $\Phi_S(\vec{B})$ del campo magnetico attraverso una superficie gaussiana S qualsiasi è **nullo**:

$$\Phi_S(\vec{B}) = 0$$

Il flusso del campo elettrico è dato dalla somma algebrica delle cariche racchiuse dalla superficie, pertanto la carica netta può essere diversa da zero

Il flusso del campo magnetico è **sempre nullo**. Questa differenza è dovuta al fatto che non esistono monopoli magnetici e quindi una superficie racchiude sempre un numero uguale di «poli nord» e «poli sud».

CAMPO MAGNETICO

Legge di Ampère

Calcolare il campo magnetico generato da una qualsiasi distribuzione di correnti → sommare i contributi dB dovuti a tutti gli elementi di corrente.

MA

Se la distribuzione ha una qualche simmetria, si può applicare la legge di Ampère →

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 i_c$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \oint B \cos \theta ds = \mu_0 i_c$$

i_c è la corrente totale compresa all'interno della linea chiusa

Solo le correnti all'interno della linea chiusa sono usate nella legge di Ampère.

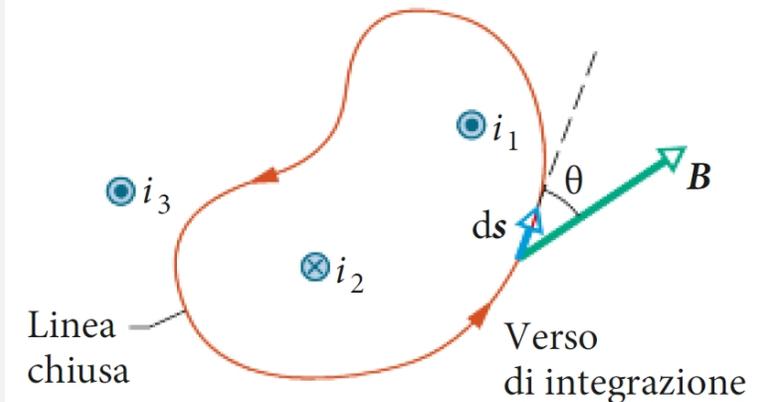


Figura 29.13 La legge di Ampère applicata a un'arbitraria linea chiusa che comprende due lunghi fili rettilinei, ma esclude un terzo filo. Notate i versi delle correnti.

CAMPO MAGNETICO

Legge di Ampère

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 i_c$$

i_c è la corrente totale compresa all'interno della linea chiusa

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_o \left(i + \epsilon_o \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$$

I campi magnetici sono prodotti sia dalle correnti di conduzione che da variazioni temporali del campo elettrico.

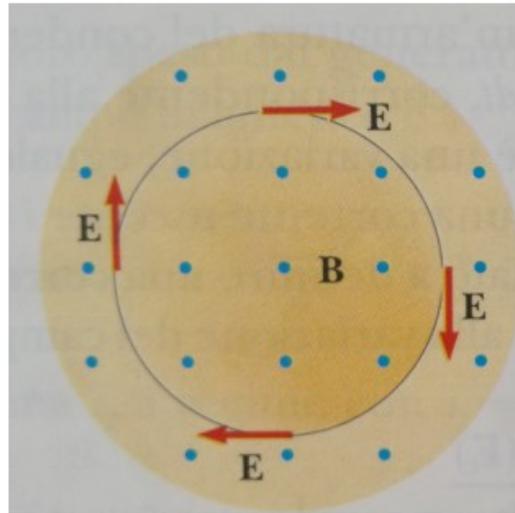
$$i_s = \epsilon_o \frac{d\Phi_E}{dt}$$

corrente «di spostamento»

(legge di Faraday:
un campo magnetico
variabile nel tempo
genera un campo
elettrico)

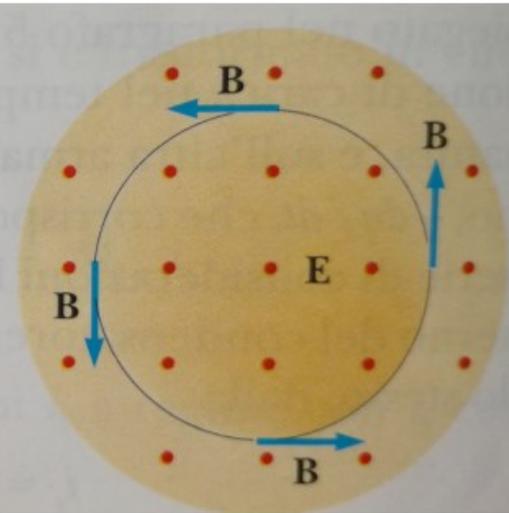
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Campo **B** ortogonale al piano,
uniforme crescente nel tempo:



$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Campo **E** ortogonale al piano,
uniforme crescente nel tempo:



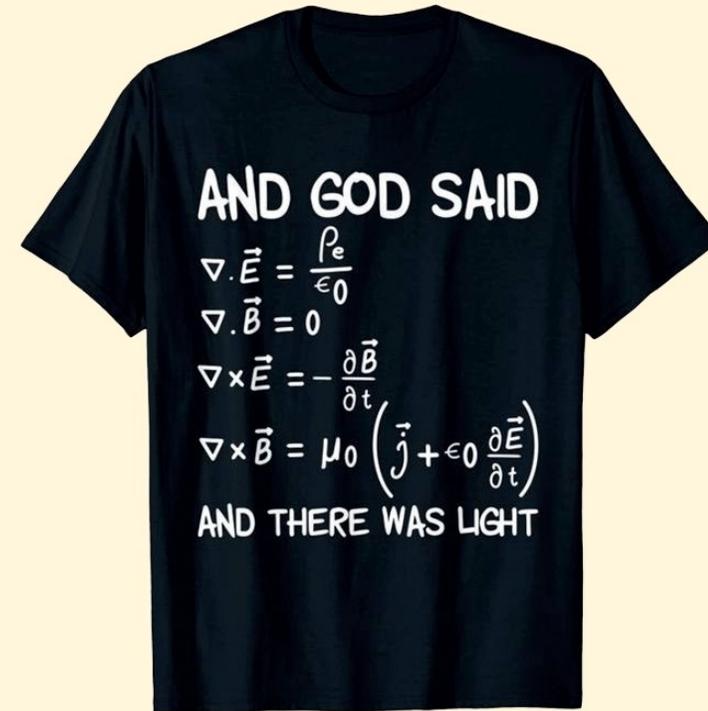
(legge di Ampère –
Maxwell: un campo
magnetico è generato da
una corrente elettrica i o
da un campo elettrico
variabile nel tempo)

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{\sum_i Q_i}{\epsilon_0}$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi(\mathbf{B})}{dt}$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

$$\oint_l \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \left[i + \epsilon_0 \frac{d\Phi(\mathbf{E})}{dt} \right]$$

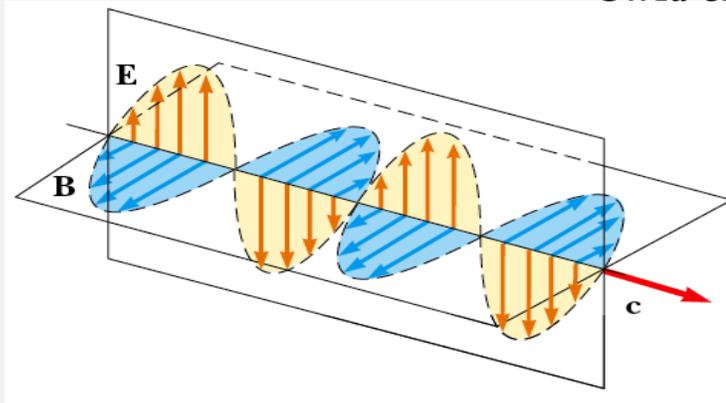


Le equazioni di Maxwell dimostrano che il campo elettrico e il campo magnetico sono unificabili e che la luce è un'onda elettromagnetica.

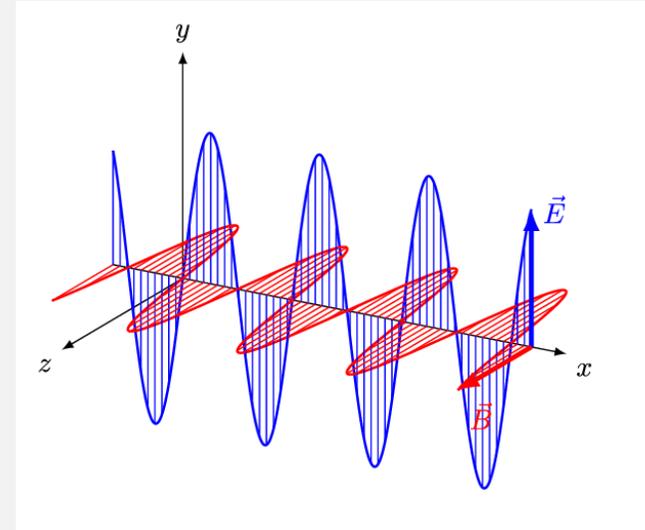
RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA

- I vettori campo elettrico \vec{E} e campo magnetico \vec{B} oscillano in piani mutuamente perpendicolari, entrambi perpendicolari alla direzione di propagazione (onda trasversale)

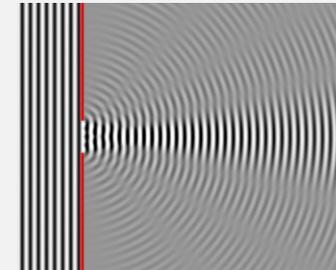
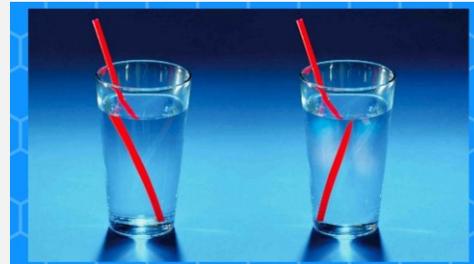
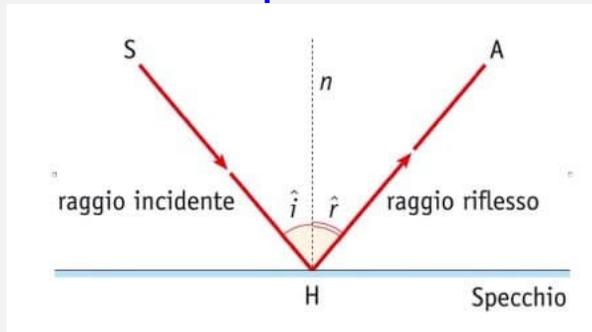
Onda elettromagnetica piana

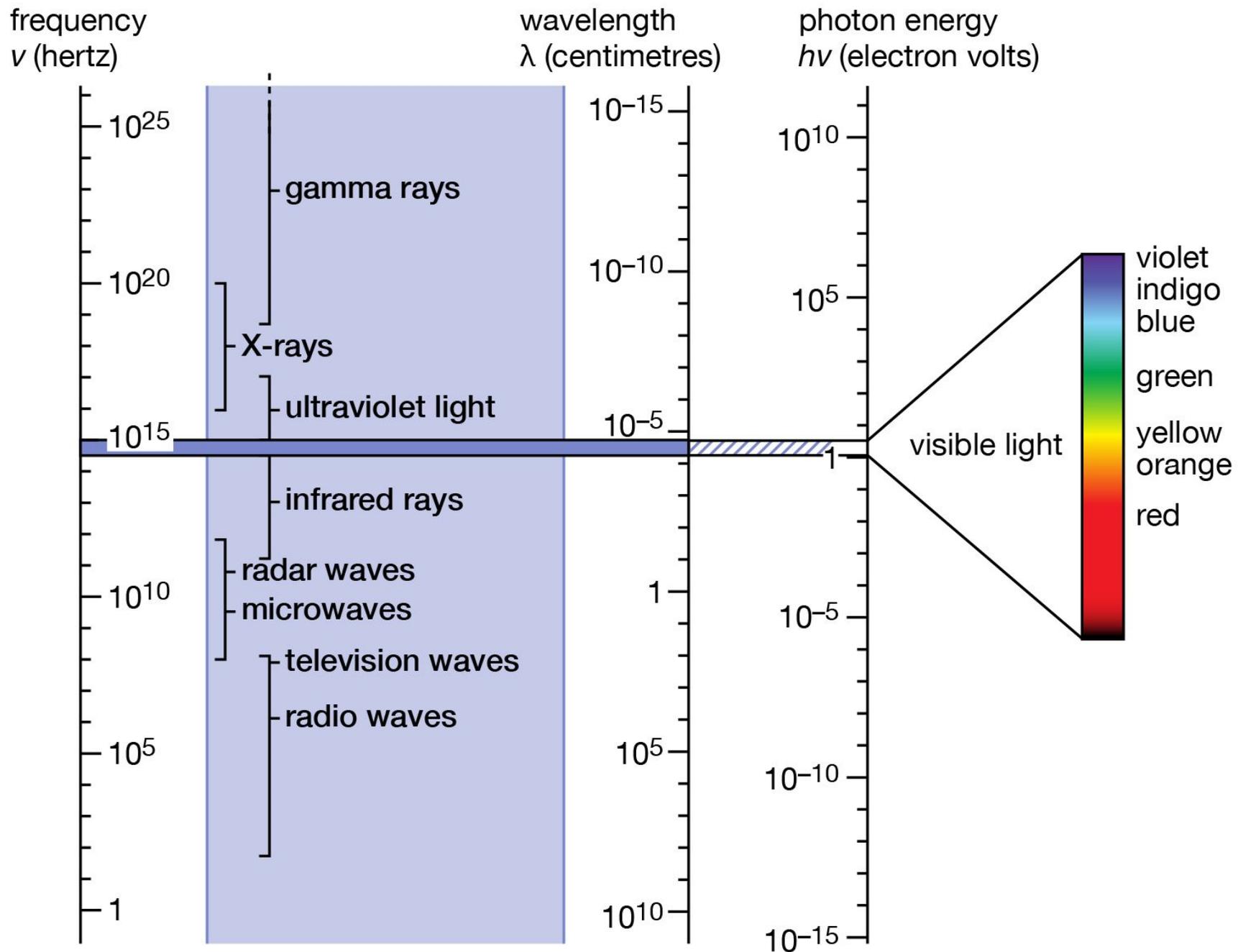


c = velocità delle onde e.m. nel vuoto = 3×10^8 m/s



- Il comportamento ondulatorio della radiazione e.m. è confermato da diversi fenomeni tipici delle onde (riflessione, rifrazione, diffrazione...)





DUALISMO ONDA-CORPUSCOLO (MECCANICA QUANTISTICA)

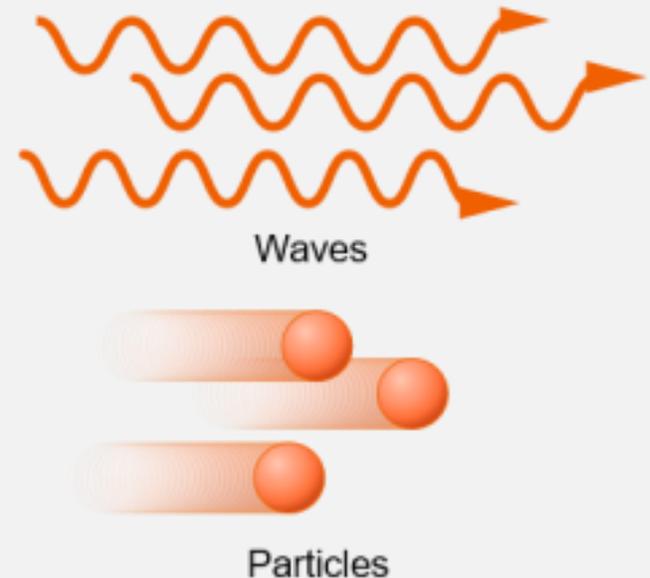
Accanto ai fenomeni che confermano che la radiazione elettromagnetica si propaga come un'onda, ve ne sono altri che invece **si possono spiegare solo trattandola come un fascio di particelle (fotoni)**, aventi massa e carica elettrica nulle, che si propagano nello spazio con velocità c

Nei processi di trasferimento di energia, la radiazione elettromagnetica si comporta come una particella priva di massa, ma dotata di energia, il FOTONE.

L'energia di un fotone dipende dalla frequenza (ν) della radiazione:

$$E_{\text{fotone}} = h\nu$$

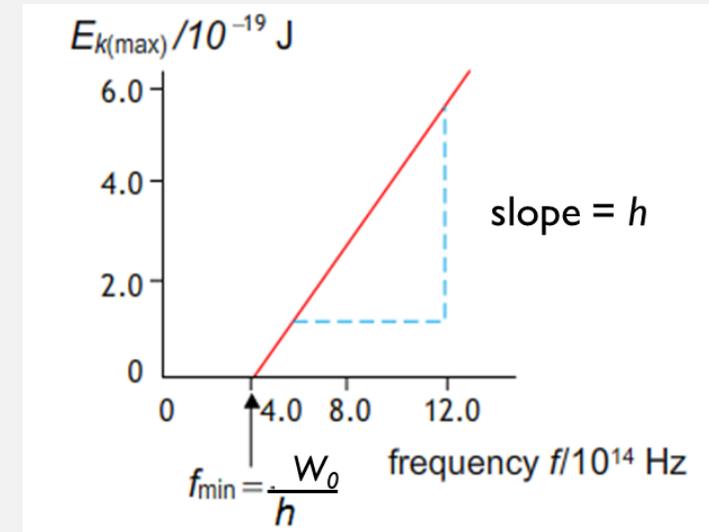
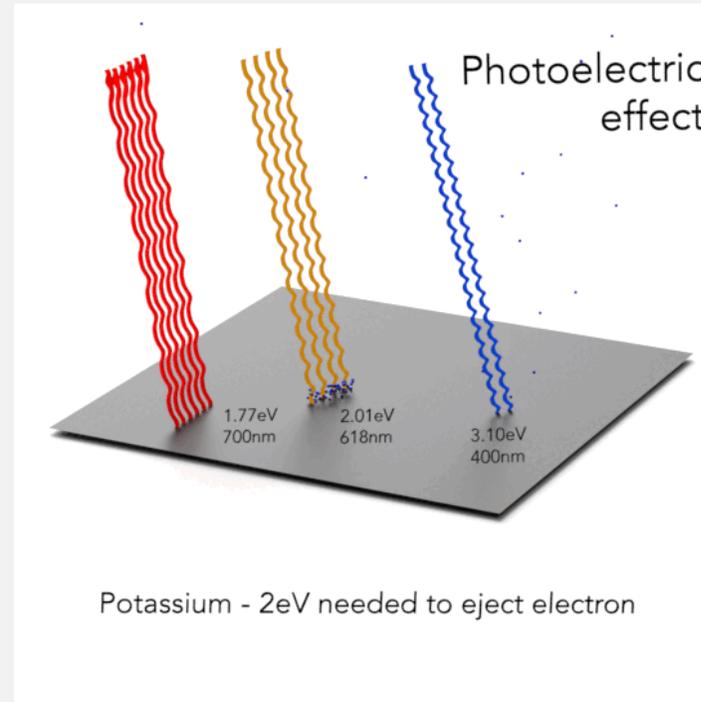
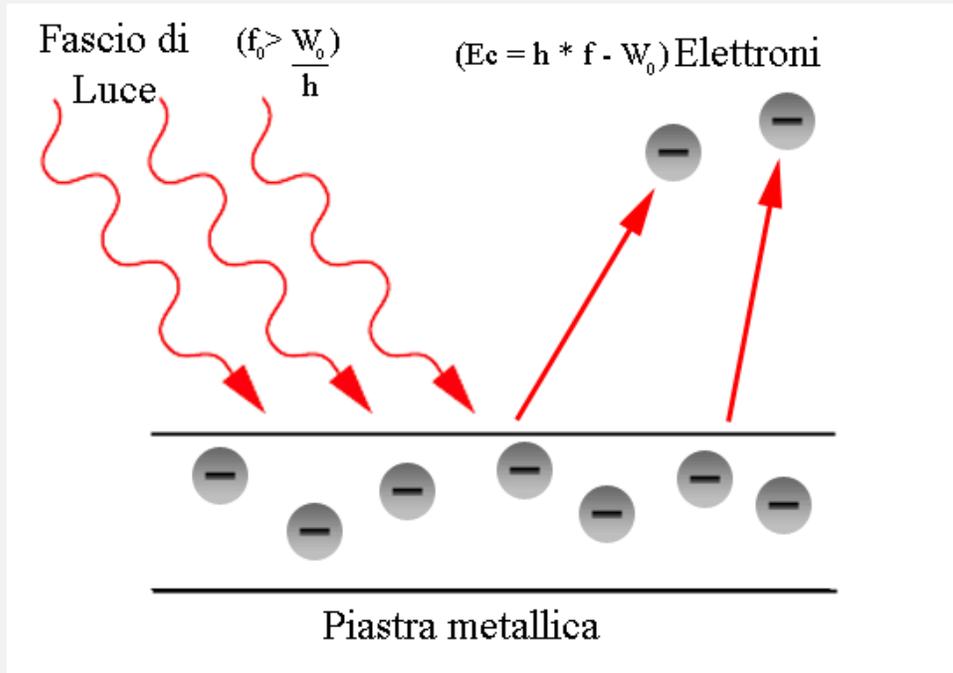
h (costante di Planck) = 6.63×10^{-34} Js



DUALISMO ONDA-CORPUSCOLO (MECCANICA QUANTISTICA)

Effetto fotoelettrico: se la radiazione e.m. che colpisce la piastra metallica ha una frequenza ν maggiore di una certa soglia ν_0 , viene assorbita e vengono emessi elettroni con energia cinetica $E_c = h\nu - W_0$, in cui $W_0 = h\nu_0$ è il lavoro di estrazione (energia minima necessaria per estrarre gli elettroni dal metallo)

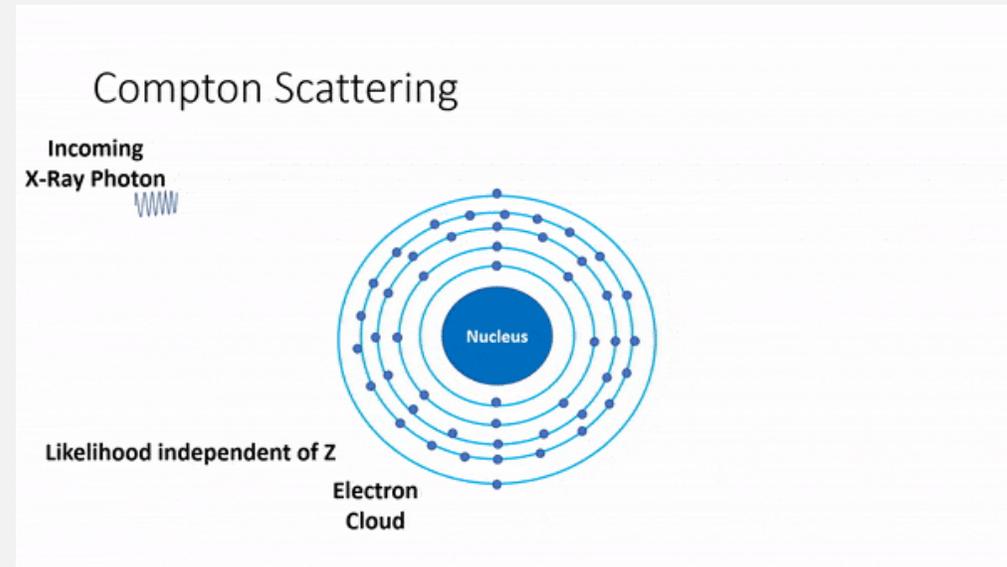
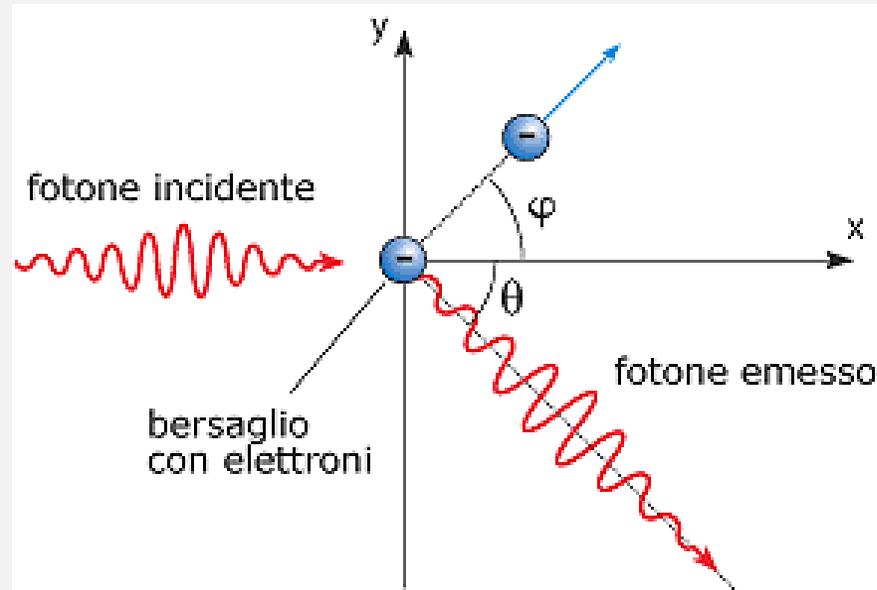
($h =$ costante di Planck = 6.67×10^{-34} J·s)



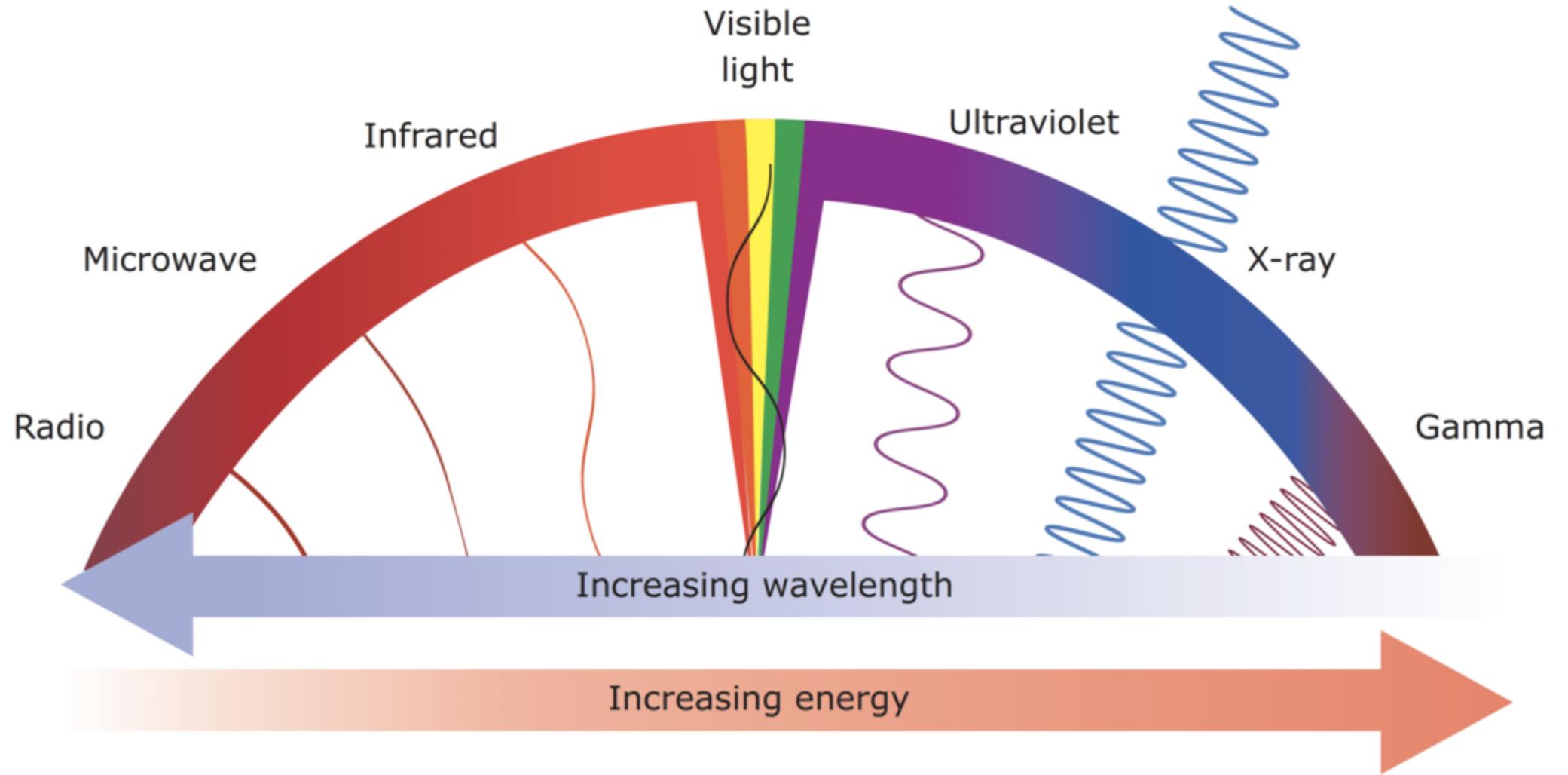
DUALISMO ONDA-CORPUSCOLO (MECCANICA QUANTISTICA)

Accanto ai fenomeni che confermano che la radiazione elettromagnetica si propaga come un'onda, ve ne sono altri che invece **si possono spiegare solo trattandola come un fascio di particelle (fotoni)**, aventi massa e carica elettrica nulle, che si propagano nello spazio con velocità c

Effetto Compton: inviando una radiazione e.m. su un certo materiale, si osserva che una parte delle onde incidenti viene diffusa in una direzione diversa da quella di incidenza, e con una frequenza minore. Questo si può spiegare solo trattando come un urto elastico fra particelle l'interazione fra la radiazione e.m. e gli elettroni degli atomi del materiale, in cui si conservano la quantità di moto e l'energia cinetica totali

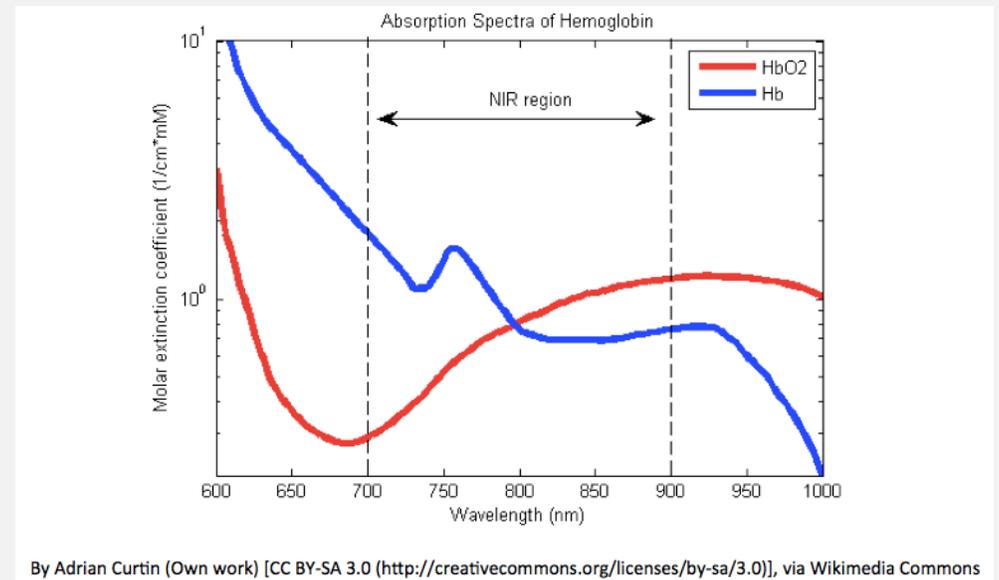
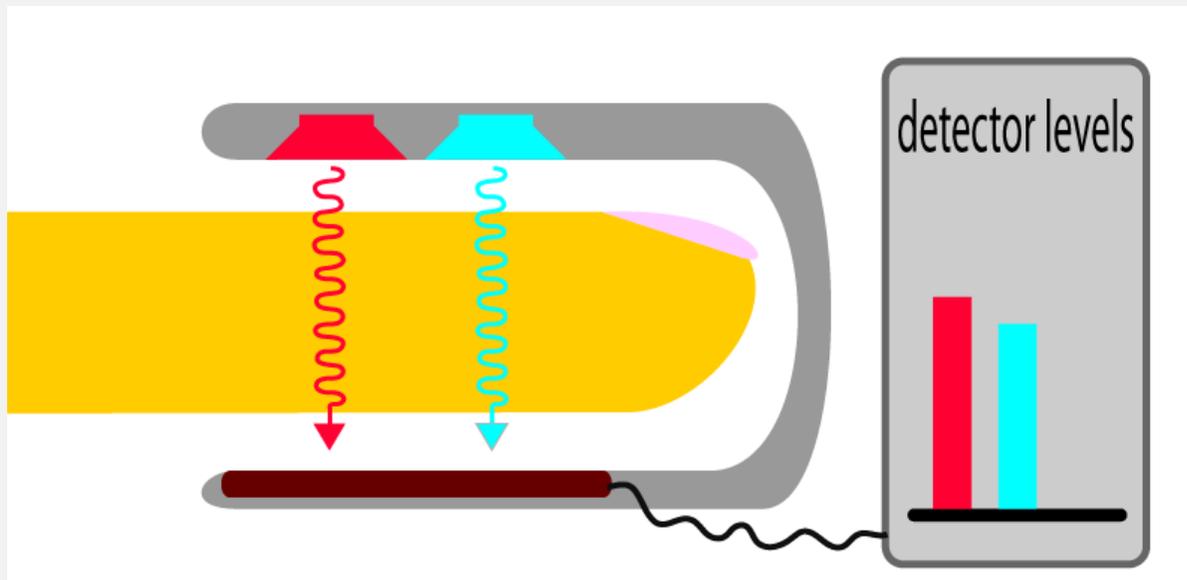


SPETTRO ELETTROMAGNETICO



Infrarosso: pulsossimetria

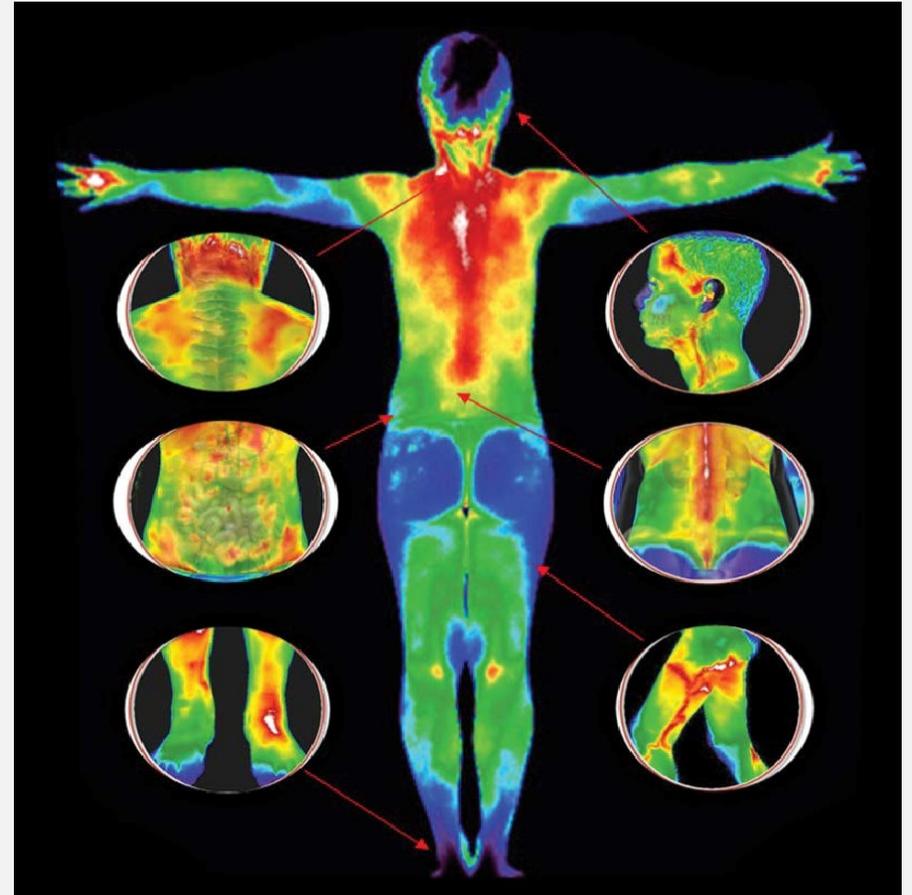
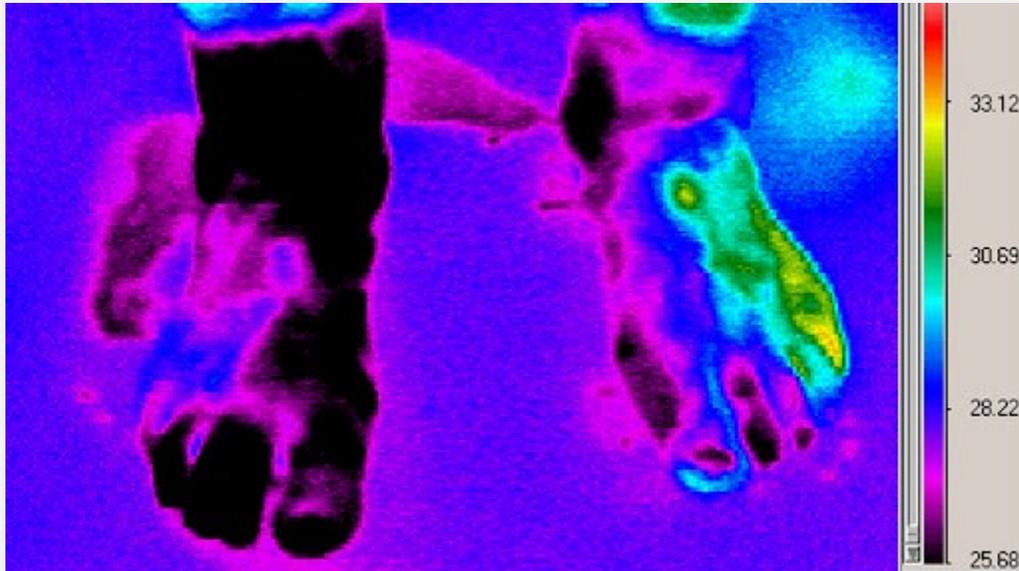
L'emoglobina ossigenata (O_2Hb) e l'emoglobina non ossigenata (Hb) presentano differenze significative nell'assorbimento alla luce rossa e vicino infrarosso (near-IR).



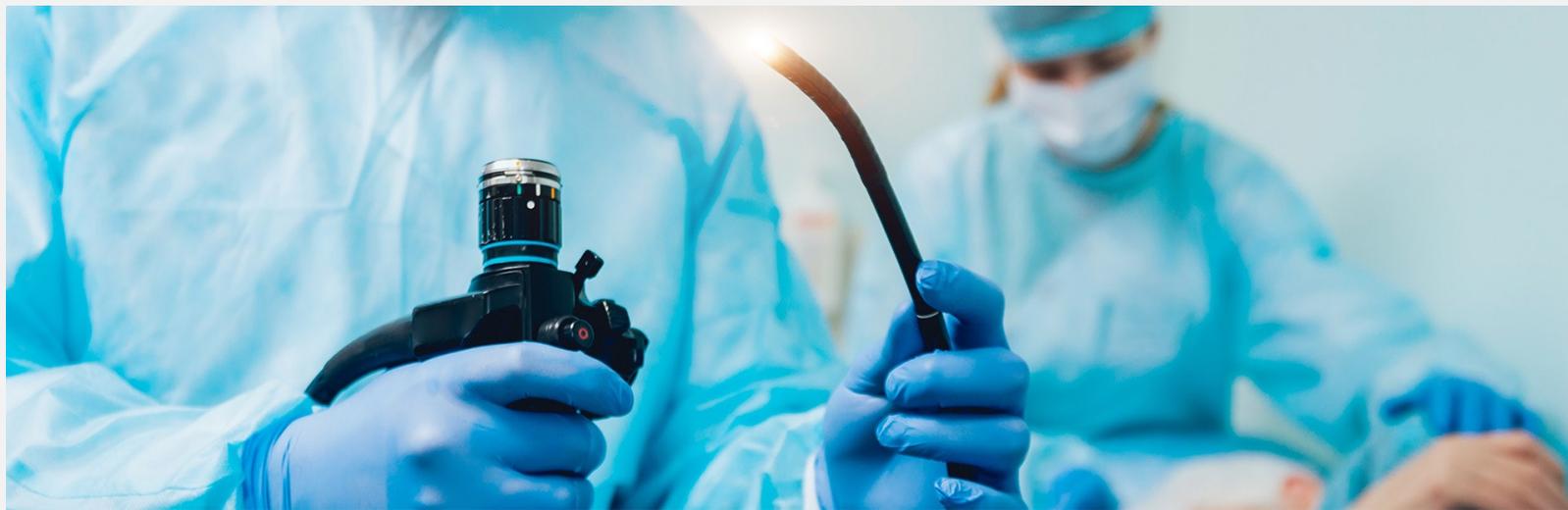
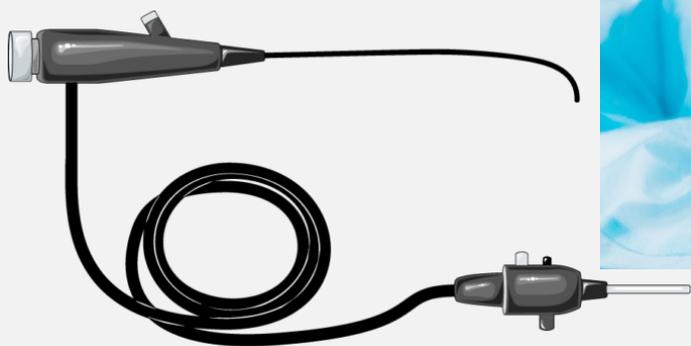
By Adrian Curtin (Own work) [CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)], via Wikimedia Commons

Infrarosso: termografia

Tecnica diagnostica non distruttiva in grado di determinarne la temperatura superficiale, misurando la radiazione infrarossa emessa da un corpo



Luce visibile: endoscopia



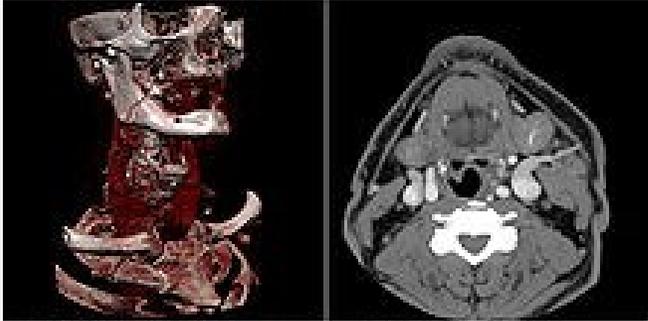
Luce visibile: fototerapia a luce blu



Raggi X: radiografia



Raggi X: tomografia computerizzata

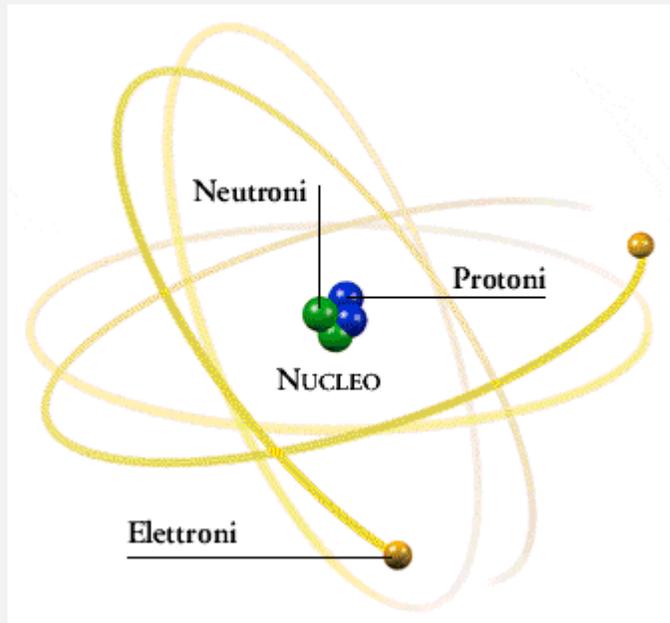


Raggi X: radioterapia



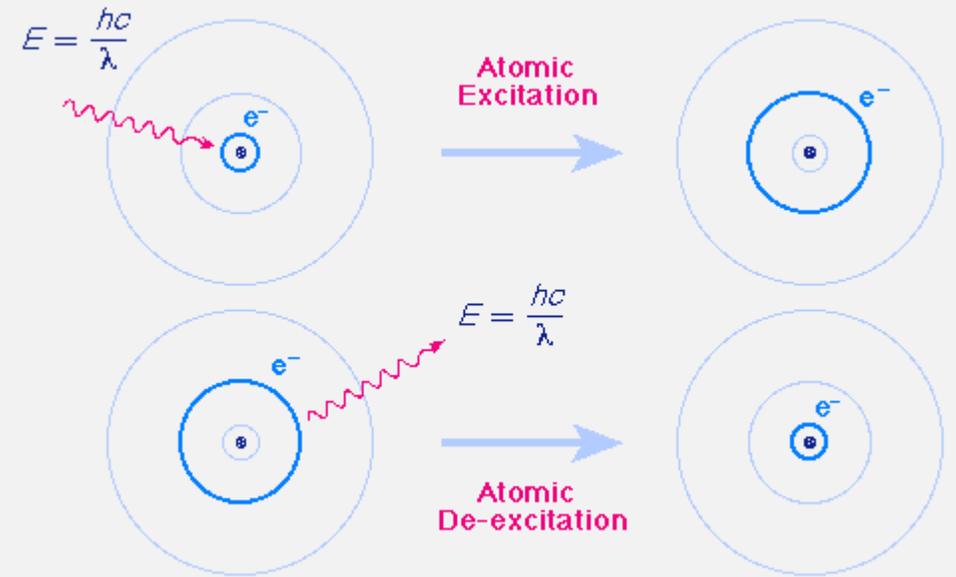
Struttura atomica

L'atomo si definisce come la più piccola parte di un elemento che mantiene le caratteristiche fisiche dell'elemento stesso

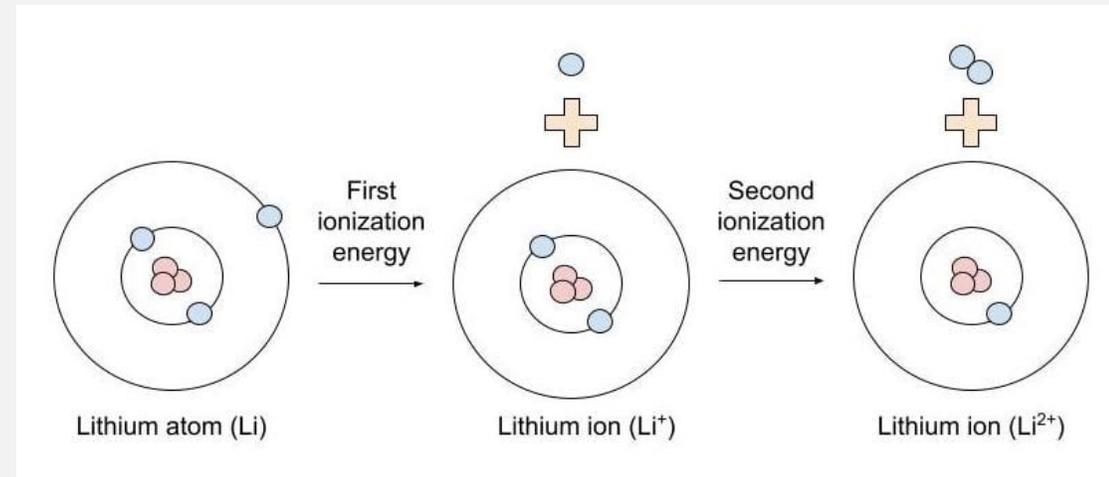


Eccitazione - Ionizzazione

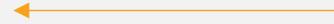
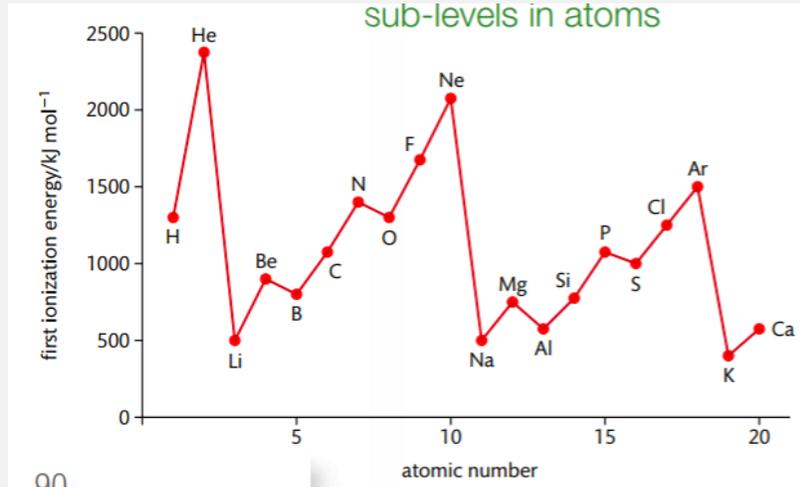
Se ad un elettrone viene fornita energia dall'esterno, l'elettrone passa a ruotare su un'altra orbita (ECCITAZIONE), ma ritorna dopo un po' di tempo a ruotare nell'orbita primitiva emettendo l'energia assorbita sotto forma di onda elettromagnetica.



Se ad un elettrone viene fornita energia dall'esterno in quantità sufficientemente elevata, esso può essere definitivamente allontanato dall'atomo cui appartiene (IONIZZAZIONE) e l'atomo, restato privo dell'elettrone, si chiama IONE.



Radiazioni ionizzanti



bisogna compiere **lavoro**, cioè fornire energia:

Energia minima di ionizzazione:

$$E = 13.6 \text{ eV}$$

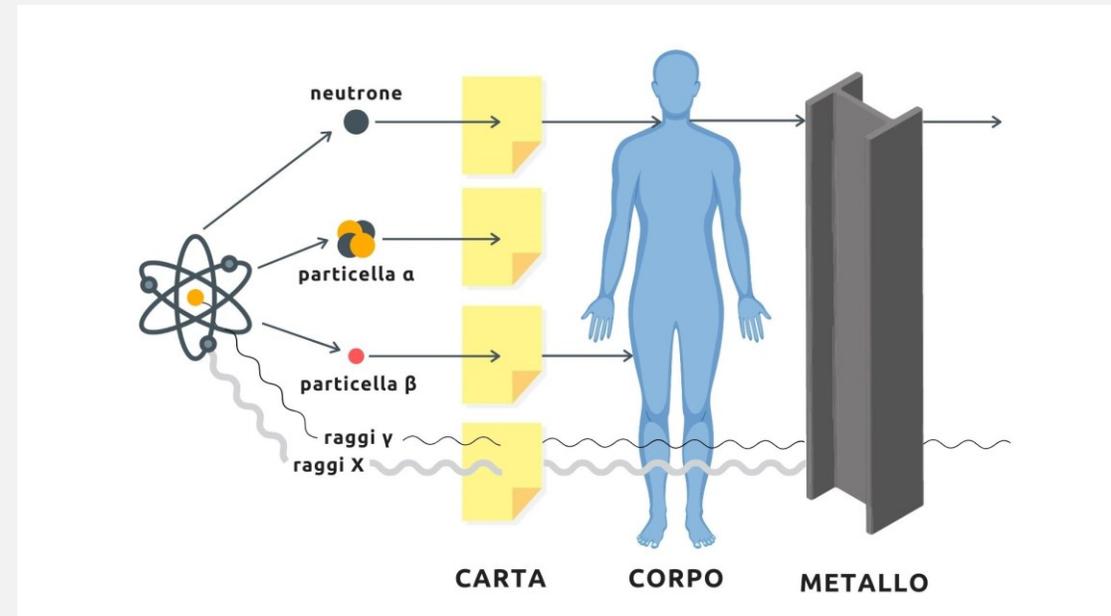
(potenziale di ionizzazione dell'atomo di idrogeno)

Radiazioni ionizzanti: $E > 100 \text{ eV}$

Se gli elettroni liberati hanno ricevuto sufficiente energia cinetica, a loro volta possono ionizzare altri atomi.

Direttamente ionizzanti: particelle cariche (elettroni, protoni, particelle α , etc.) la cui energia cinetica è sufficiente per produrre ionizzazione per collisione

Indirettamente ionizzanti: raggi X, raggi γ e neutroni che, interagendo con la materia, possono mettere in moto particelle direttamente ionizzanti o dar luogo a reazioni nucleari



Radiazioni ionizzanti – UV

Produzione UV

naturale: Sole

artificiale: lampade UV

Effetti chimico-biologici:

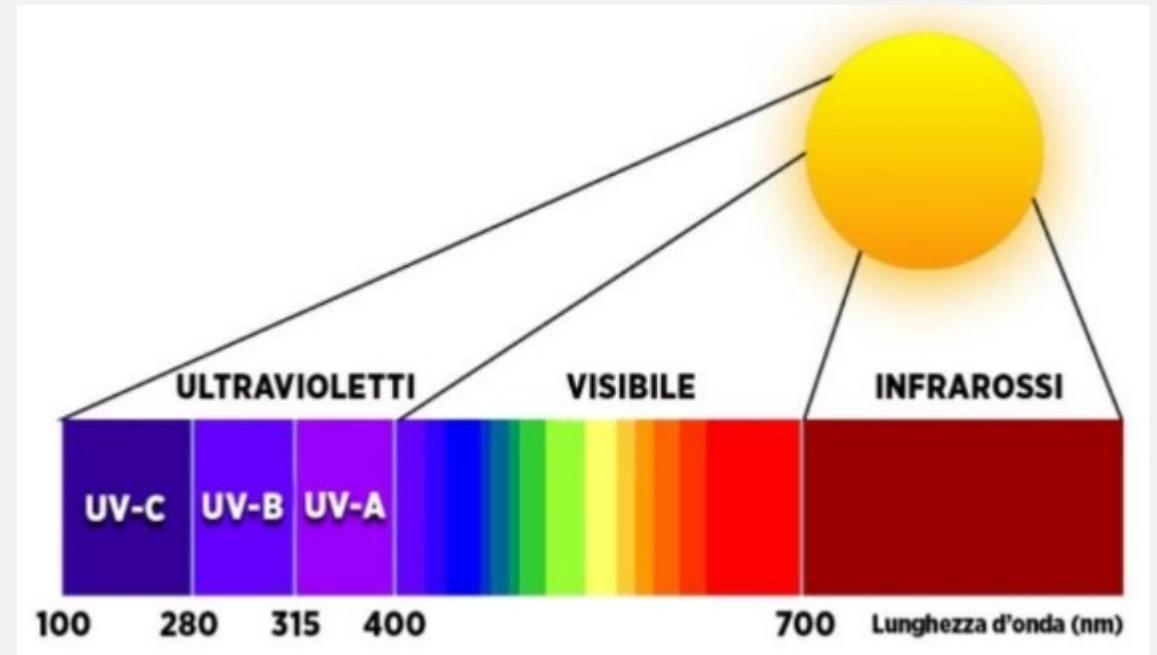
eccitazione di atomi e molecole
dissociazione legame C-C (4 eV)

Si distinguono in:

UVA: $\lambda = 400-315$ nm

UVB: $\lambda = 315-280$ nm

UVC: $\lambda = 280-100$ nm (*ionizzanti*)



Radiazioni ionizzanti ad alta energia

raggi X

produzione artificiale

- tubo a raggi X

raggi γ

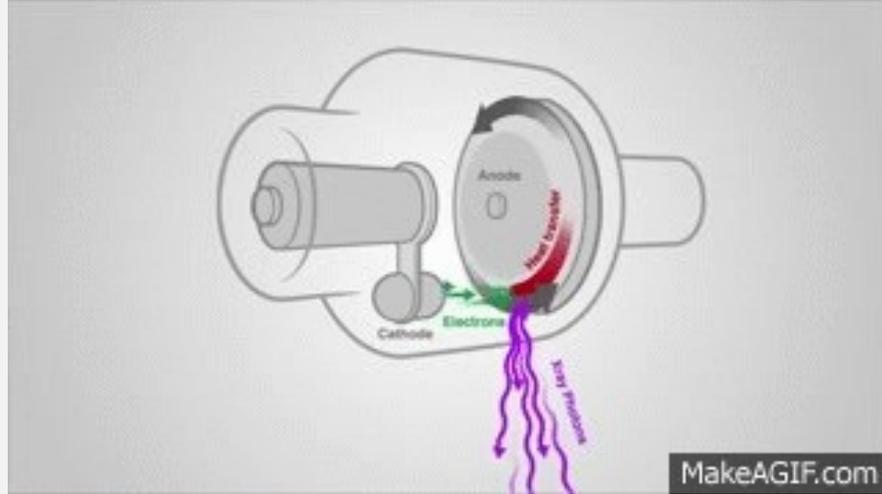
produzione naturale

- emissione γ da decadimento di nuclei atomici instabili (“radionuclidi”)

produzione artificiale

- acceleratori di particelle

Produzione di raggi X

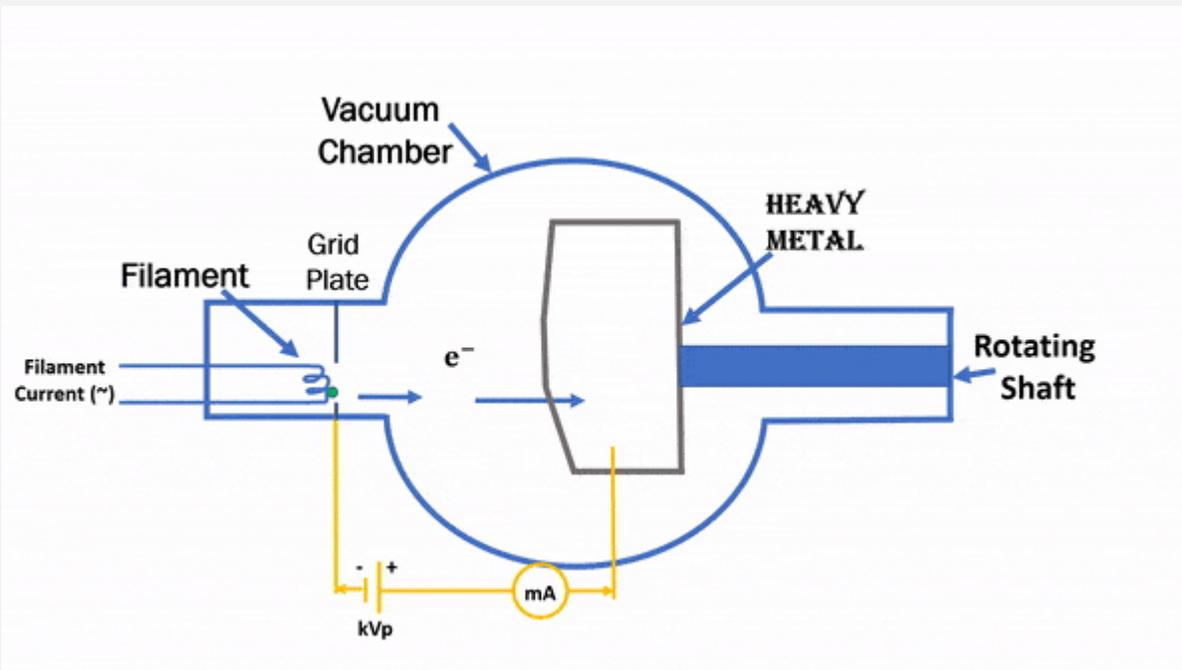


Un tubo a raggi X (tubo radiogeno) consiste di un tubo a vuoto con un catodo ed un anodo

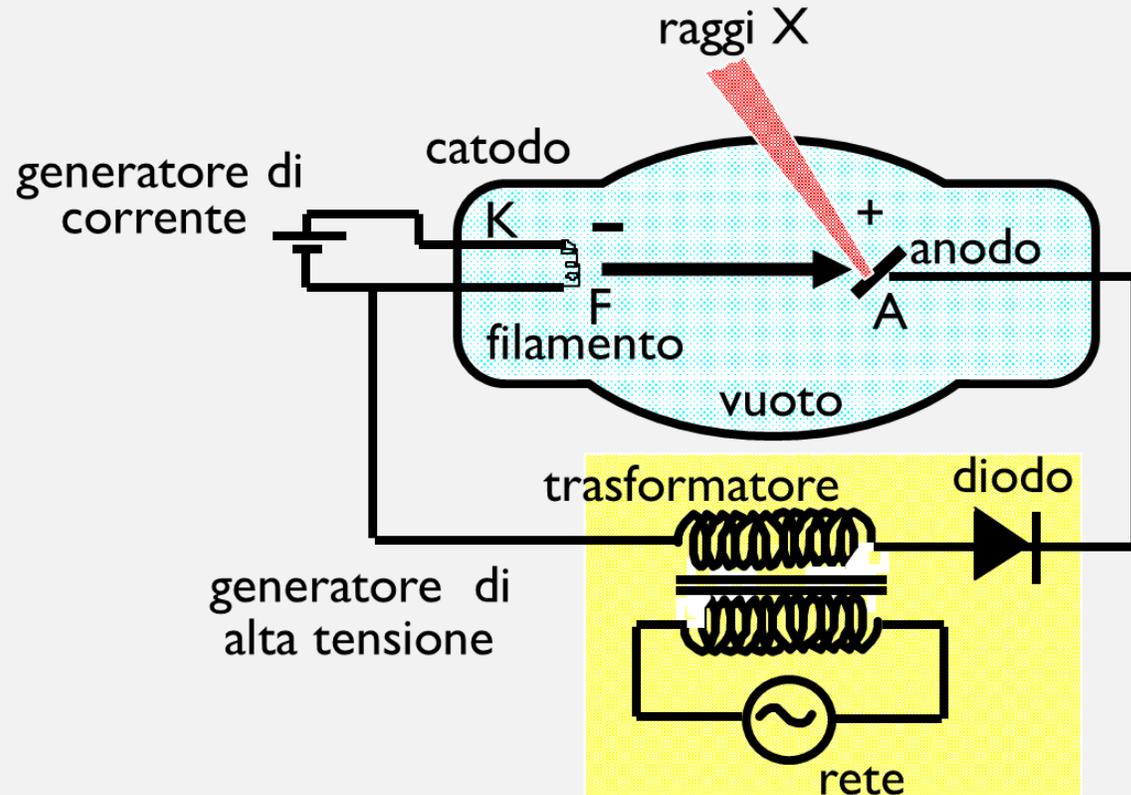
La corrente nel catodo per eccitazione termica rilascia elettroni (**emissione termoionica**), che vengono accelerati verso l'anodo (tipicamente di tungsteno o di molibdeno) da una ddp (kV o kVp), tra anodo (+) e catodo (-)

La corrente di elettroni nel tubo è misurata in **mA**

Gli elettroni colpiscono l'anodo e rilasciano la loro energia producendo calore e raggi X (circa l'1% dell'energia ceduta viene trasformata in RX)

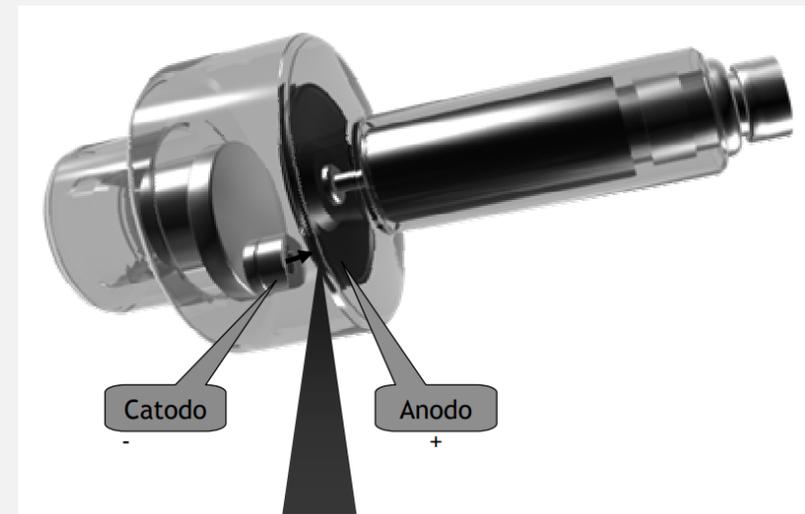


Tube a raggi X – tubo di Coolidge



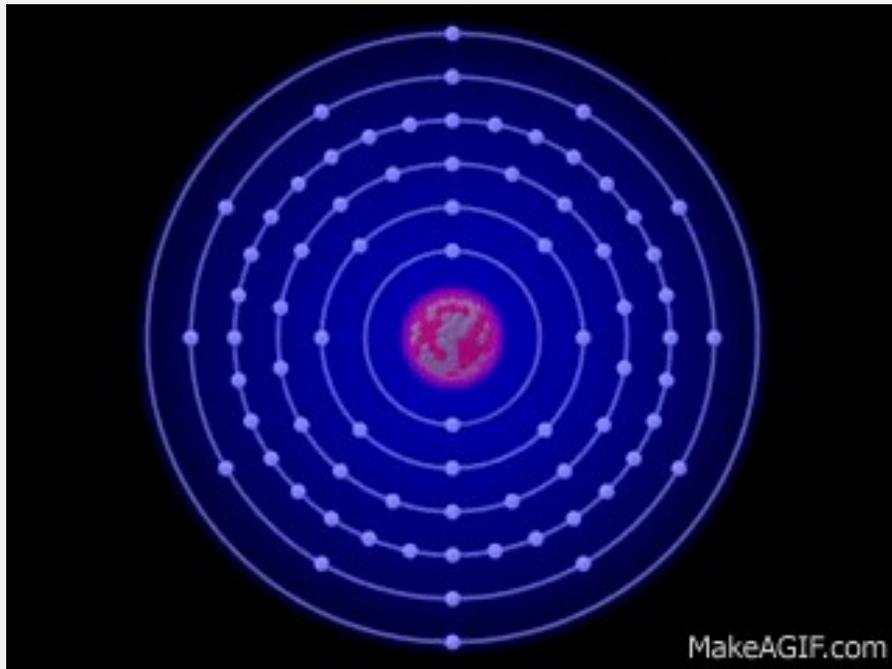
Regolazione dei raggi X emessi:

1. La corrente nel tubo (flusso di elettroni nel tubo, mA), proporzionale alla corrente nel catodo, che determina il numero di elettroni da esso emessi
2. La ddp o tensione (kV o kVp), che controlla l'energia acquistata dagli elettroni nel passaggio catodo all'anodo

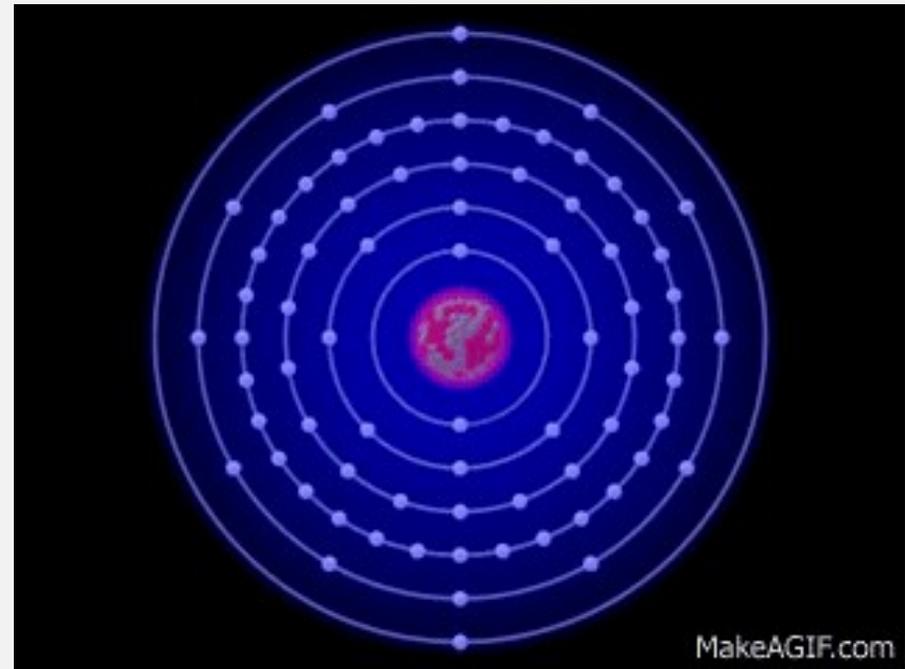


Nell'urto degli elettroni con gli atomi dell'anodo vengono prodotti i raggi X, tramite due distinti meccanismi concomitanti:

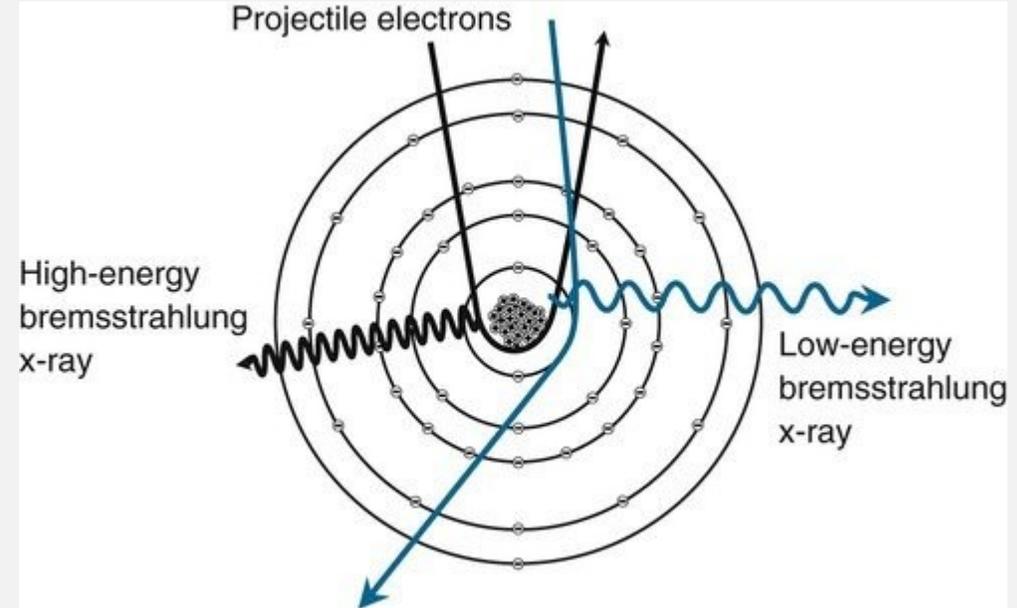
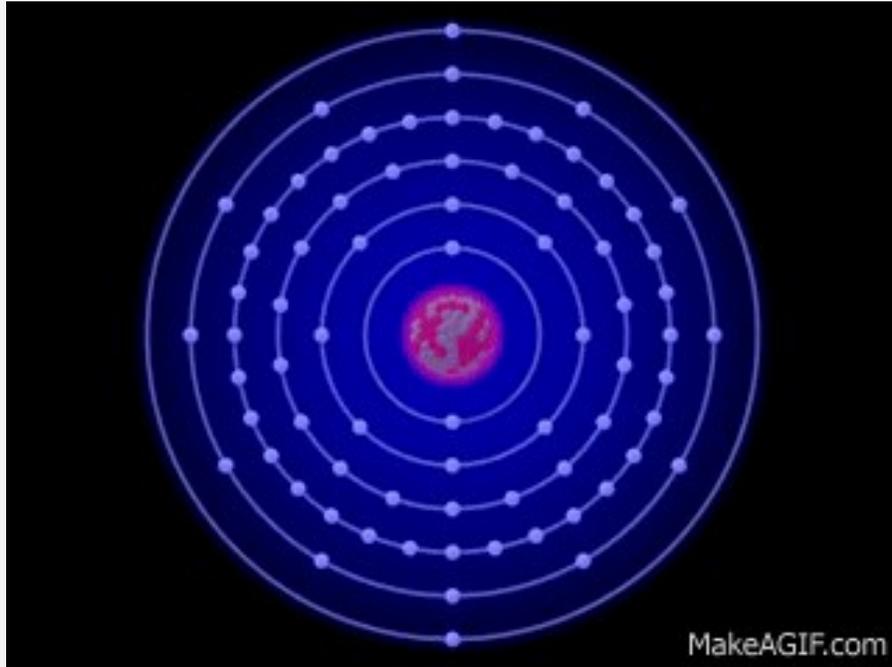
**1) Radiazione di frenamento
(Bremsstrahlung)**



2) Ionizzazione di un livello interno



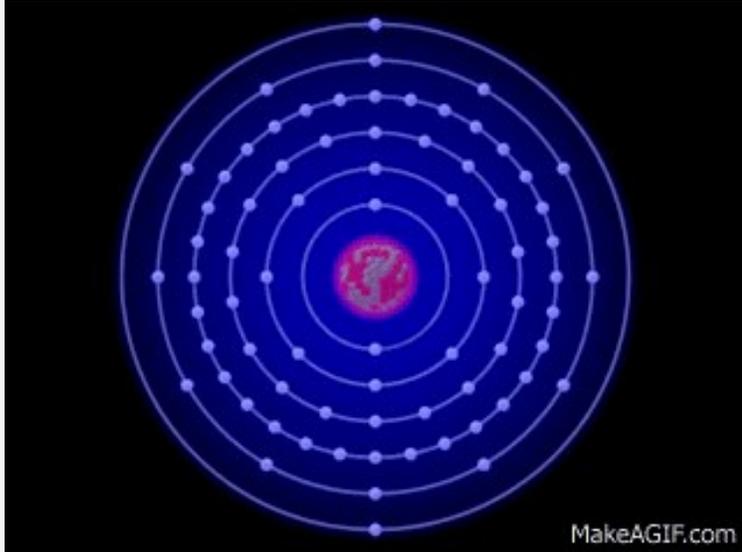
I) Radiazione di frenamento (Bremsstrahlung)



Bremsstrahlung è una radiazione elettromagnetica che viene prodotta a causa della decelerazione di una particella carica, tipicamente un elettrone, deviata da un'altra particella carica, tipicamente il nucleo atomico

La particella in moto deviata perde energia cinetica e emette una radiazione sotto forma di fotone (principio di conservazione dell'energia)

2) Ionizzazione di un livello interno

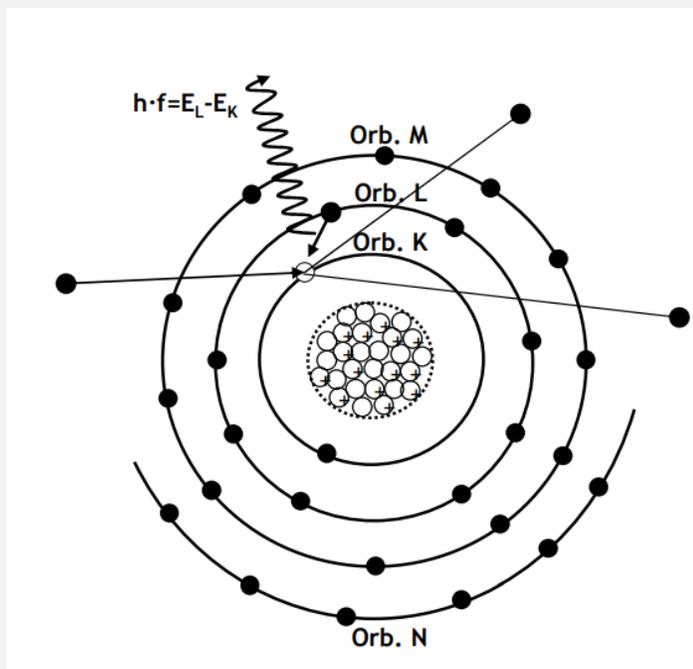


Radiazione caratteristica

- raggi X prodotti quando un elettrone rimosso dalla sua orbita per urto con l'elettrone proiettile viene sostituito da un elettrone di un orbitale più esterno

- “buco elettronico” riempito da elettroni dell'orbitale immediatamente successivo; meno probabile transizioni da un orbitale più lontano

- raggi X energetici, utili in radiologia diagnostica, generati solo dalla rimozione di elettroni a livello dell'orbitale K di elementi dotati di elevato numero atomico



Decadimento radioattivo

Nuclide: ben definito nucleo costituito da un determinato numero di protoni e di neutroni.

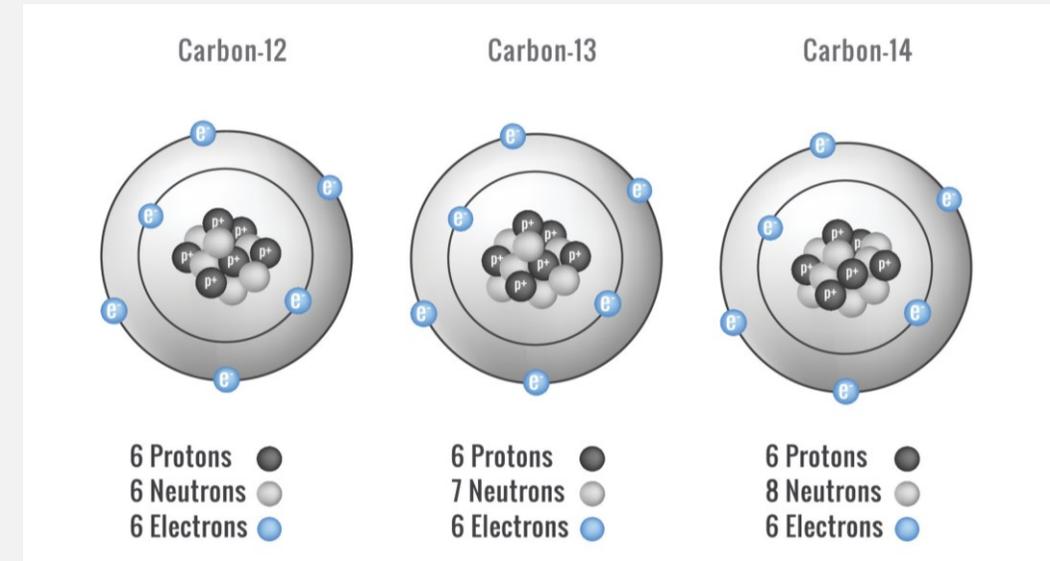
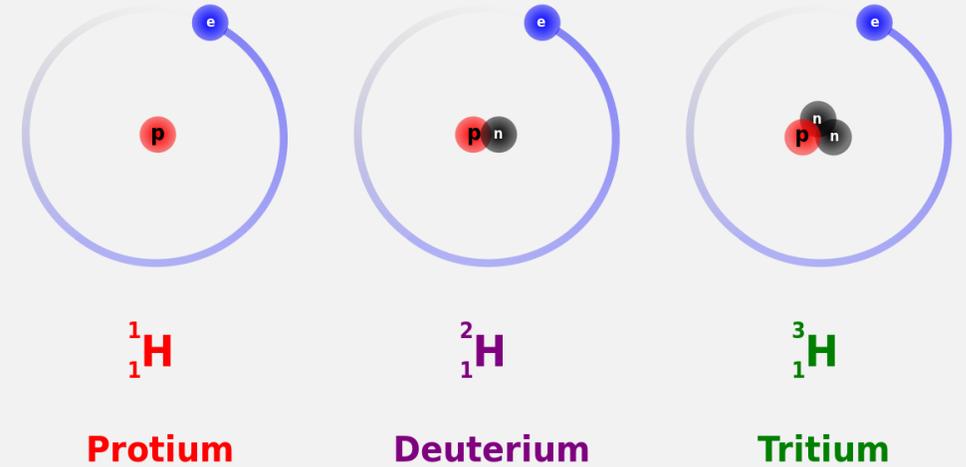


dove:

- X indica l'elemento chimico;
- Z : numero atomico dell'elemento = numero di protoni nel nucleo (\equiv numero di elettroni atomici);
- A : numero di massa del nucleo, cioè il numero totale di protoni (Z) e neutroni (N) $\rightarrow A = Z + N$.

I protoni ed i neutroni sono chiamati genericamente nucleoni:

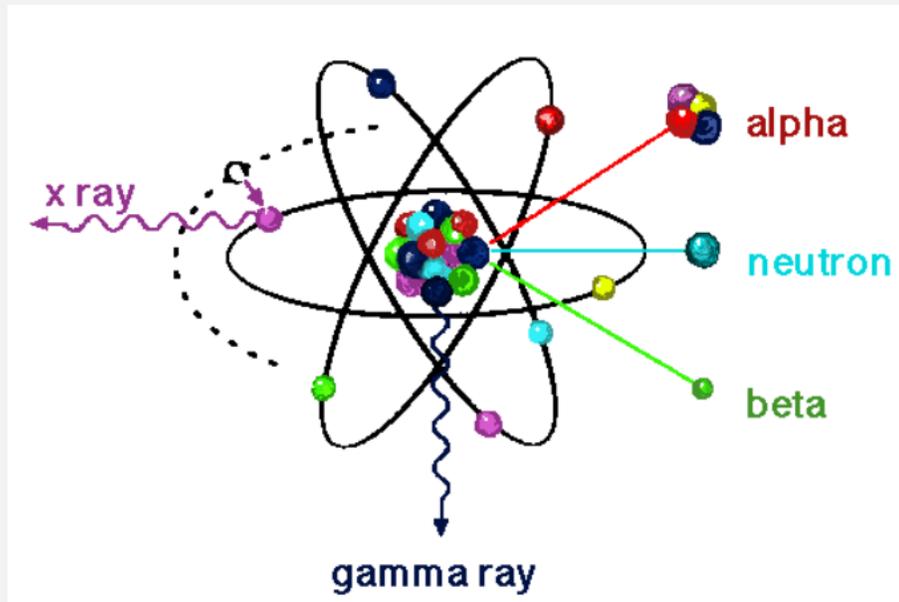
$$N = A - Z$$



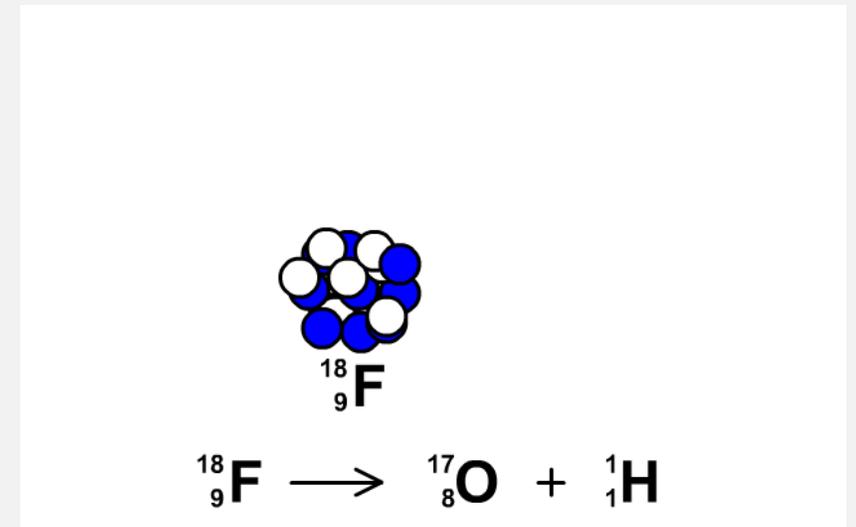
Decadimento radioattivo

Radioattività: Emissione spontanea di particelle e di onde elettromagnetiche da parte di nuclei instabili.

- ✓ Naturale (in quasi tutti i nuclei avente Z compreso tra 81 e 92);
- ✓ Artificiale (bombardamento del nucleo con particelle come protoni o neutroni).

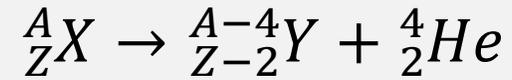


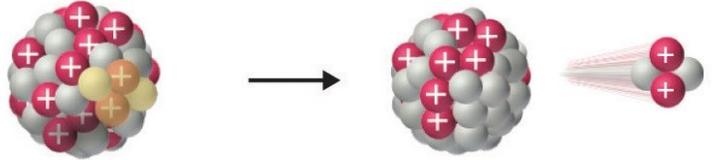
Trasmutazione: trasformazione di un elemento in un altro attraverso decadimento radioattivo



Decadimento radioattivo

Decadimento alfa: il nucleo instabile emette una particella alfa (α), che è composta da due protoni e due neutroni (un nucleo di ${}^4\text{He}$), quindi una particella carica positivamente. Tale trasformazione può quindi essere rappresentata come:



Decay Type	Radiation Emitted	Generic Equation	Model
Alpha decay	${}^4_2 \alpha$	${}^A_Z X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2} X' + {}^4_2 \alpha$	 <p>The diagram illustrates the alpha decay process. On the left, a 'Parent' nucleus is shown as a cluster of red spheres (protons) and grey spheres (neutrons). An arrow points to the right, where a 'Daughter' nucleus (smaller cluster of red and grey spheres) and an 'Alpha Particle' (a cluster of two red and two grey spheres) are shown. The alpha particle is depicted with a red glow and a tail, indicating it is being emitted from the parent nucleus.</p>

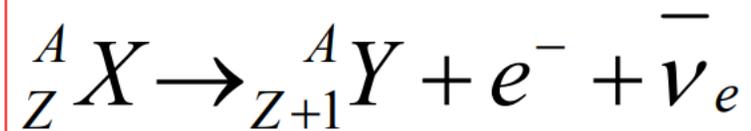
Decadimento radioattivo

Decadimento beta: tre tipologie:

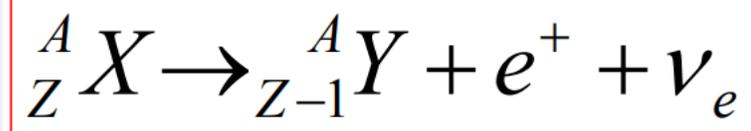
- decadimento β^- : trasformazione di un neutrone del nucleo in un protone, con emissione di un elettrone
- decadimento β^+ : trasformazione di un protone del nucleo in un neutrone, con emissione di un positrone
- cattura elettronica (E.C.): trasformazione di un protone del nucleo in un neutrone mediante cattura di un elettrone atomico

Viene emesso un neutrino (o antineutrino): particella di “massa infinitesima” e priva di carica

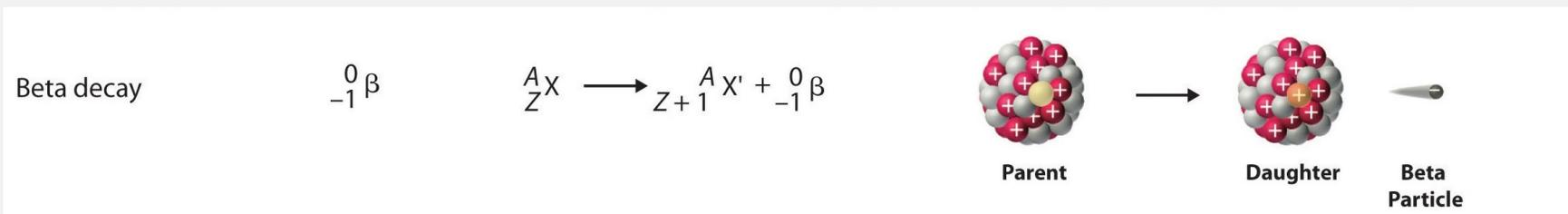
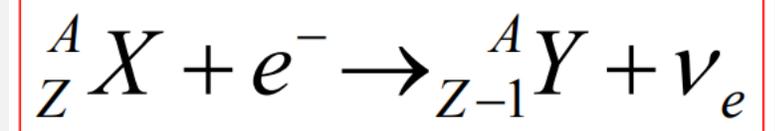
decadimento β^-



decadimento β^+



Cattura elettronica

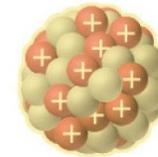
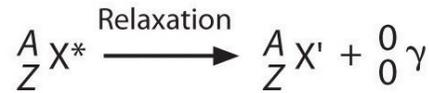


Decadimento radioattivo

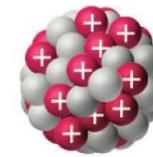
Emissione gamma: Un nucleo formatosi in seguito ad un decadimento radioattivo può ritrovarsi nel suo stato fondamentale oppure trovarsi in uno dei suoi stati eccitati. Come avviene per l'atomo, anche il nucleo si porterà nella configurazione più stabile emettendo radiazione elettromagnetica (raggi gamma) corrispondente al salto energetico dei livelli interessati

Nessuna variazione di massa atomica A e numero atomico Z

Gamma emission



Parent
(excited nuclear state)

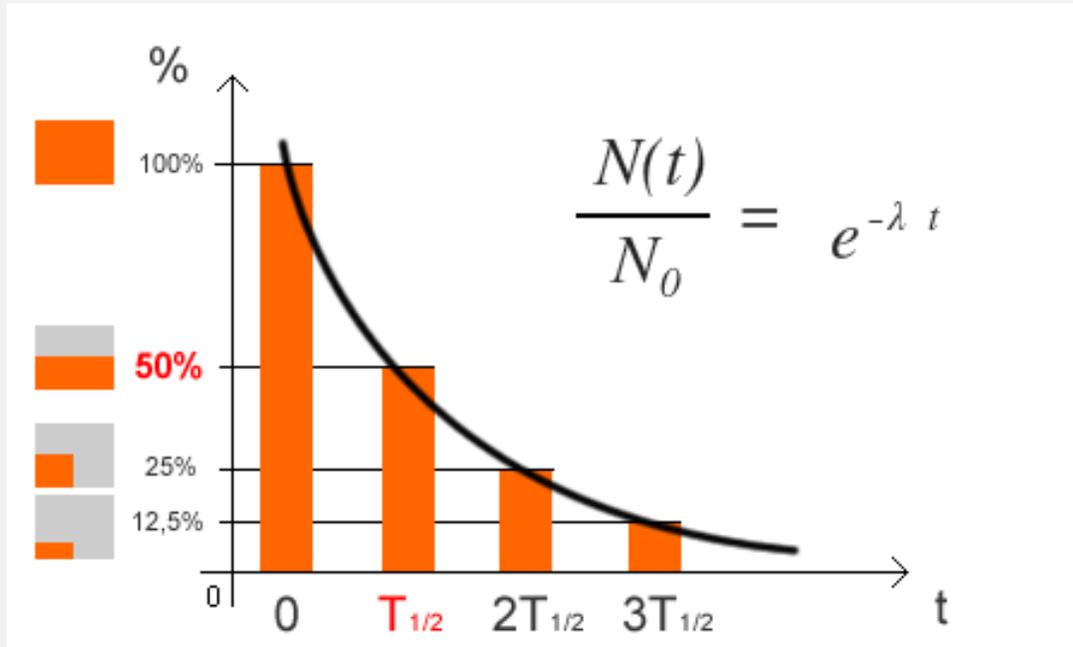


Daughter



Gamma ray

Decadimento radioattivo



N = numero di
nuclei atomici

legge del decadimento

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

La **costante di disintegrazione o decadimento** (λ) è una caratteristica di ogni elemento chimico. È una costante positiva di proporzionalità ed è indipendente dalle condizioni ambientali, dalla pressione o la temperatura in cui si trova l'elemento.

La velocità di decadimento (**attività**) si misura in **becquerel (Bq)**

→ 1 Bq = 1 dps (1 disintegrazione / s)

In passato si usava il Curie (Ci) → 1 Ci = $3.7 \cdot 10^{10}$ dps = 37 GBq

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$

$T_{1/2}$ = tempo di
dimezzamento

λ = costante di
decadimento

Radiazioni termiche

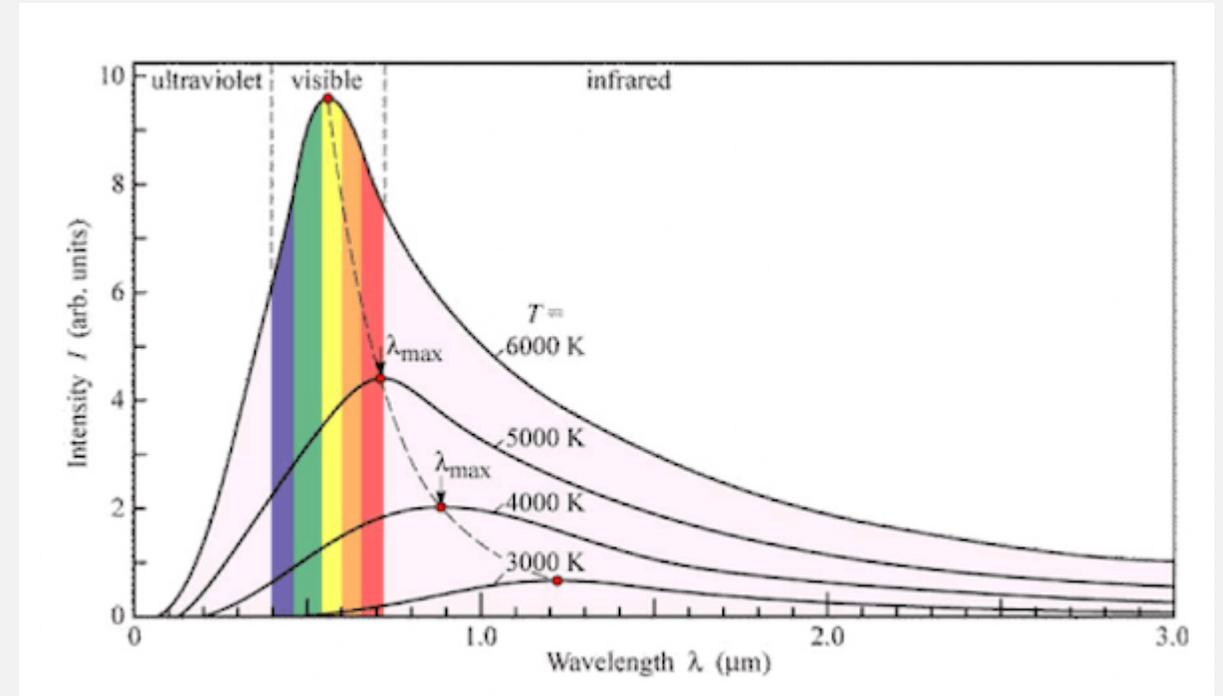
→ Irraggiamento termico

intensità $I = \frac{Q}{\Delta t \Delta S}$ cal/(sm²)
oppure W/m²

LEGGI
DELL'EMISSIONE TERMICA (E)

legge di Stefan $E \propto T^4$ (watt m⁻²)

legge di Wien $\lambda_{\max} \propto 1/T$ (cm)



Sono radiazioni termiche: microonde, infrarossi

Radiazioni termiche

Microonde

Frequenza: $300 \text{ MHz} < \nu < 300 \text{ GHz}$

Energia: $10^{-6} \text{ eV} < E = h\nu < 10^{-3} \text{ eV}$

effetti: calore

non ionizzanti

Riscaldamento di regioni limitate e profonde
in corpi ricchi di acqua.

(Esposizione limite per l'uomo: $I = 10 \text{ mW/cm}^2$,
cioè 1/10 della massima potenza radiante solare assorbita)

Infrarosso

$0.7 \text{ }\mu\text{m} < \lambda < 20 \text{ }\mu\text{m}$

vicino IR lontano IR

effetto termico

$\lambda \approx 0.7 \text{ }\mu\text{m}$

$\lambda > 1.4 \text{ }\mu\text{m}$

penetrazione

$\Delta x \approx 10 \text{ cm}$

$\Delta x < 1 \text{ mm}$

fotografia I.R. → immagine termica (termografia)

A livello atomico, l'unità di misura dell'energia non è quella della fisica classica, il Joule. L'unità usata è l'elettronvolt (**eV**) ed i suoi multipli:

1 eV = energia acquistata da un elettrone accelerato dalla differenza di potenziale di 1 Volt
 $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$