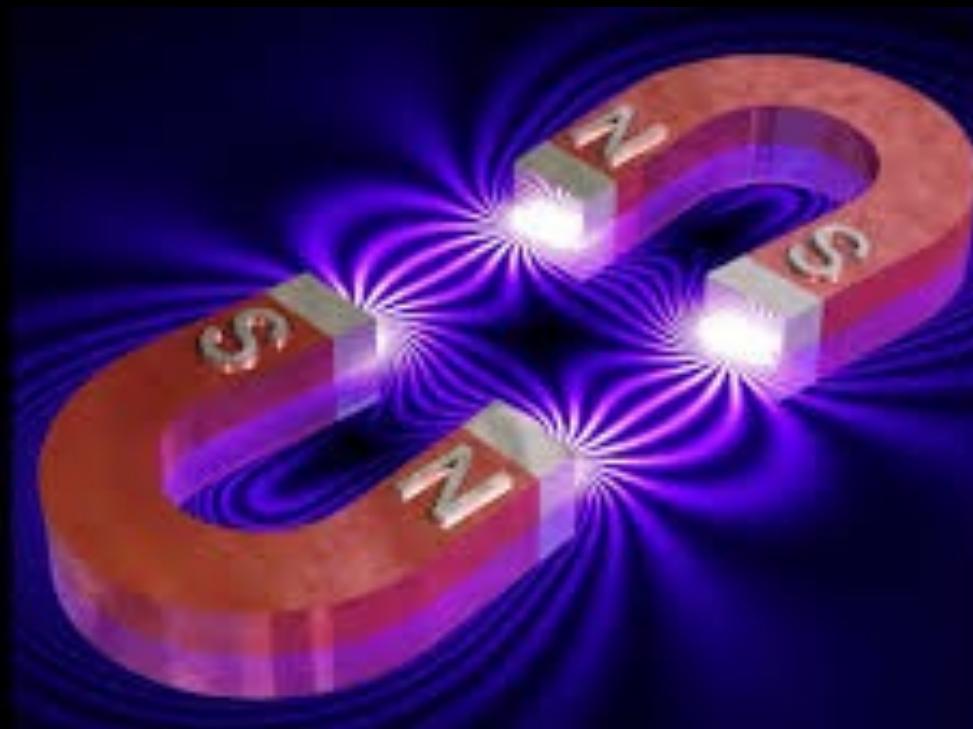


Dal Magnetismo all'Elettromagnetismo



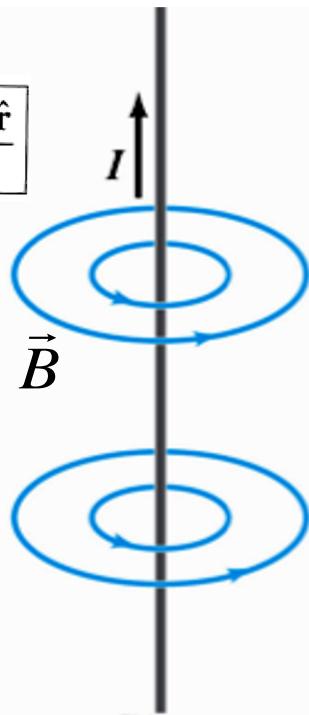
Primi Legami tra Elettricità e Magnetismo

Abbiamo visto che i fenomeni elettrici e quelli magnetici sono in stretta relazione gli uni con gli altri. In particolare abbiamo finora visto che:

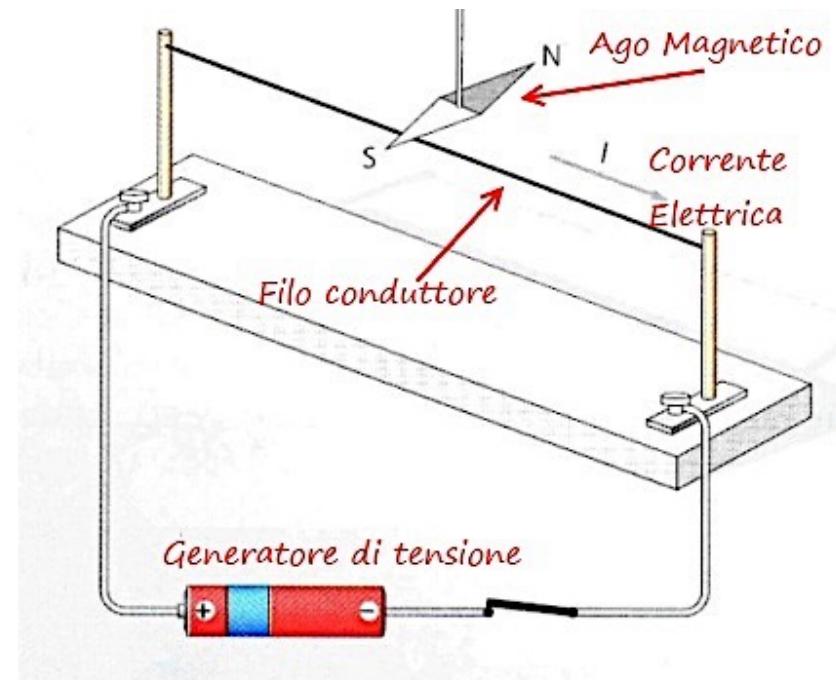
(1) le correnti elettriche producono campi magnetici...

Filo elettrico
rettilineo infinito

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\ell \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$



Christian Oersted
(1777-1851)

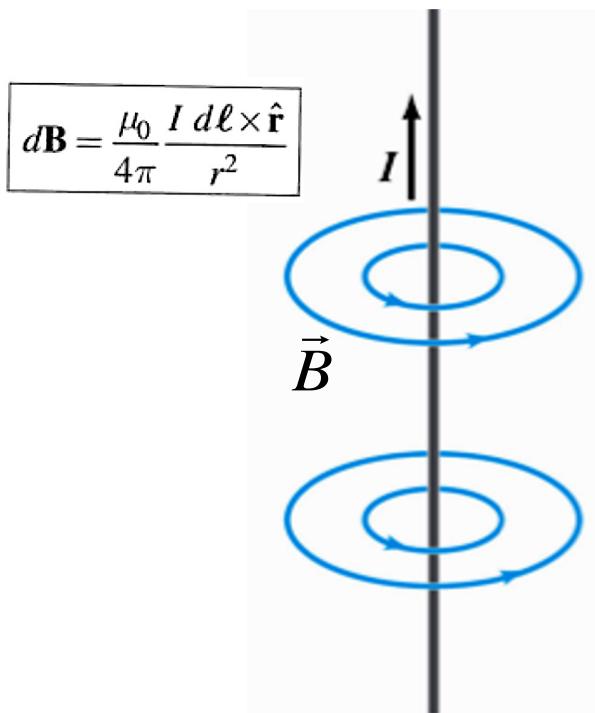


Primi Legami tra Elettricità e Magnetismo

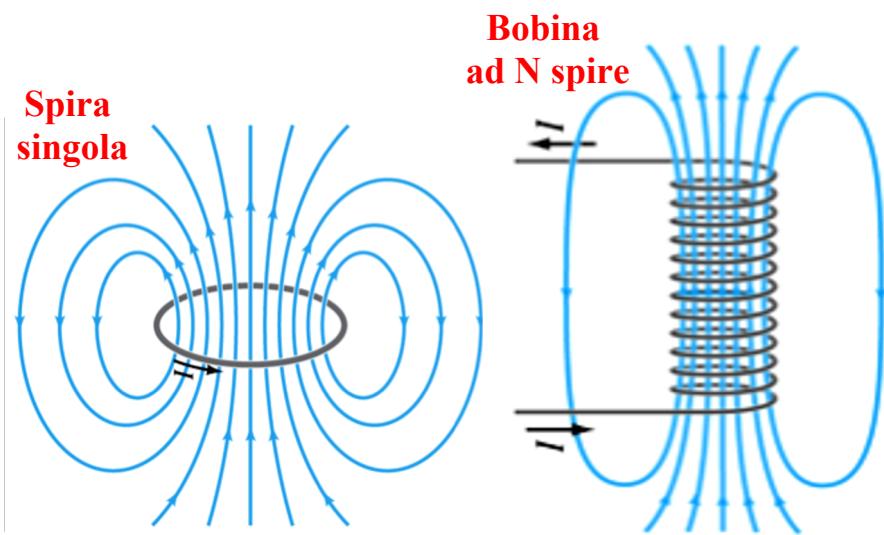
Abbiamo visto che i fenomeni elettrici e quelli magnetici sono in stretta relazione gli uni con gli altri. In particolare abbiamo finora visto che:

(1) le correnti elettriche producono campi magnetici...

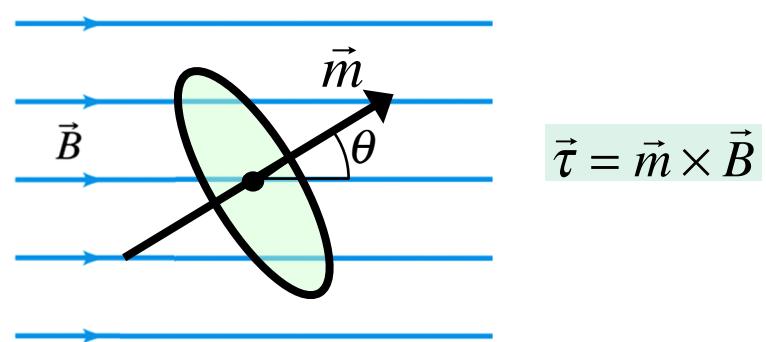
Filo elettrico
rettilineo infinito



Christian Oersted
(1777-1851)

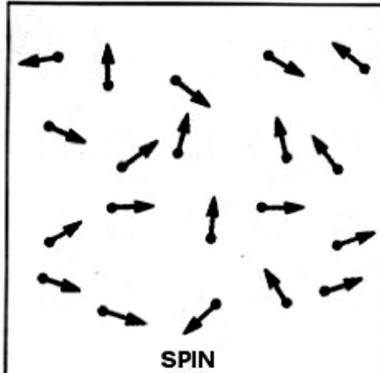


...e le spire (o le bobine) ruotano
dentro i campi magnetici...



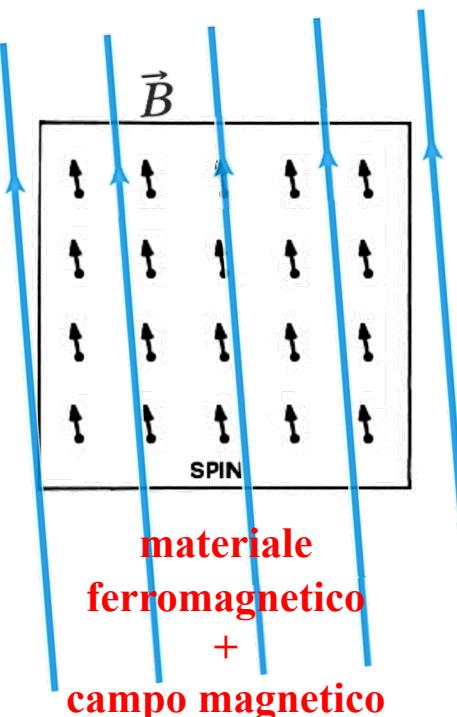
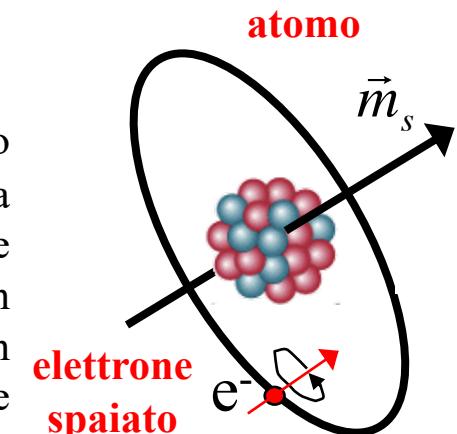
Quest'ultima proprietà, come sappiamo, risponde già alle nostre domande sull'origine del magnetismo nella materia...

Abbiamo visto che gli elettroni di un atomo possiedono un momento magnetico legato al loro cosiddetto **spin**, che è una proprietà quantistica intrinseca classicamente interpretabile come dovuta ad una rotazione dell'elettrone su se stesso. Di solito gli elettroni hanno, a coppie, spin antiparalleli che ancora una volta si compensano, ma gli atomi con un elettrone "spaiato" mantengono un momento di spin \vec{m}_s dello stesso ordine di grandezza di quello orbitale.



materiale ferromagnetico

Sostanze come il **ferro**, il **cobalto** o il **nickel**, sono dette **ferromagnetiche** e costituiscono i **magneti permanenti** (o calamite): esse sono caratterizzate da momenti magnetici atomici di spin che normalmente sono disallineati a causa dell'agitazione termica (figura a sinistra) ma che in presenza di un campo magnetico esterno (a volte basta anche quello terrestre), tendono ad allinearsi producendo una **magnetizzazione macroscopica** del materiale (figura a destra), che in alcuni casi permane a lungo anche una volta che il campo viene rimosso.



...ma spiega anche il funzionamento di alcuni dispositivi elettrici con parti macroscopiche in rotazione...



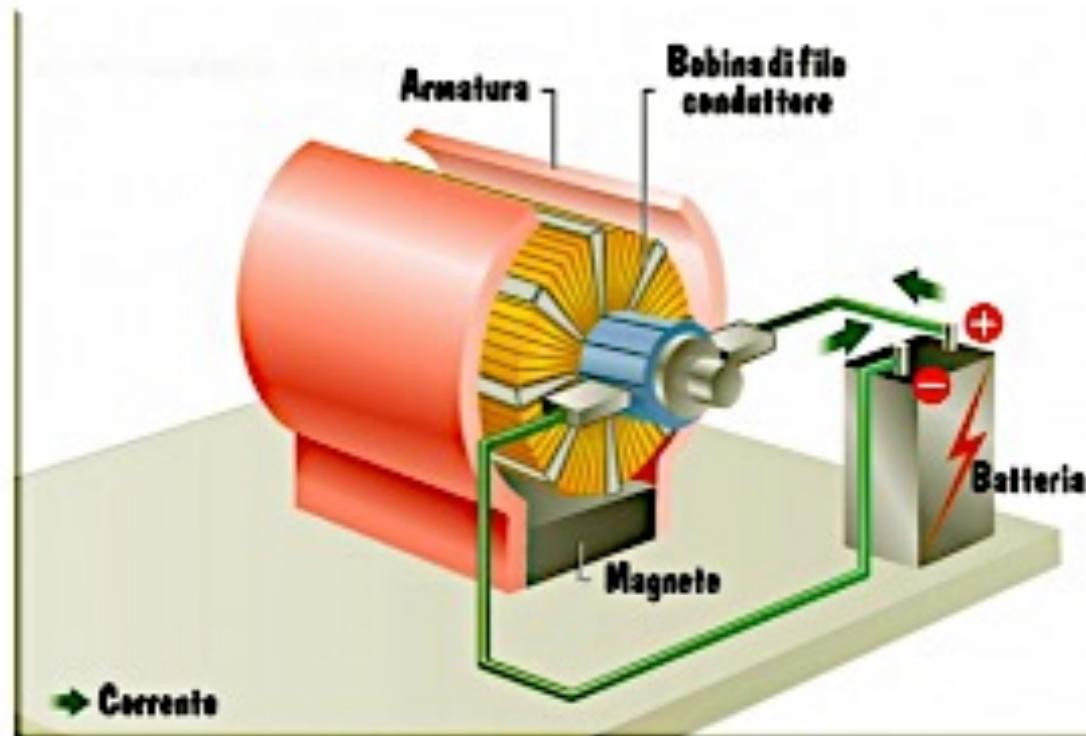
Esempio: il Motore Elettrico

Generalmente, un **motore elettrico** è costituito da un involucro (armatura) che contiene delle **calamite**, una parte rotante (**rotore**), attorno la quale sono avvolte delle **bobine** di filo conduttore, e delle **spazzole** che sfiorano il rotore.

Le spazzole sono collegate ad una **pila**, che genera una differenza di potenziale; la corrente elettrica che viene fatta circolare, quindi, passa attraverso le spazzole, e da esse nel rotore, fino a raggiungere le bobine. Passando attraverso i fili conduttori, la **corrente elettrica genera un campo magnetico**, cosicché l'intera **bobina si trasformerà in un magnete**.

Il dispositivo è costruito in modo che la **bobina e le calamite poste nell'involucro esterno** rivolgano l'un l'altra i poli opposti, e **si respingano**; essendo respinta, la bobina genera un movimento, e mette in rotazione il rotore.

Il processo, poi, continua in maniera automatica, in quanto **ogni volta che il rotore compie una parziale rotazione**, le spazzole lo sfiorano in parti diverse, e ciò implica che la **corrente elettrica scorra nella bobina in verso opposto**. Il rotore, quindi, riprende a ruotare nel senso opposto a quello precedente.

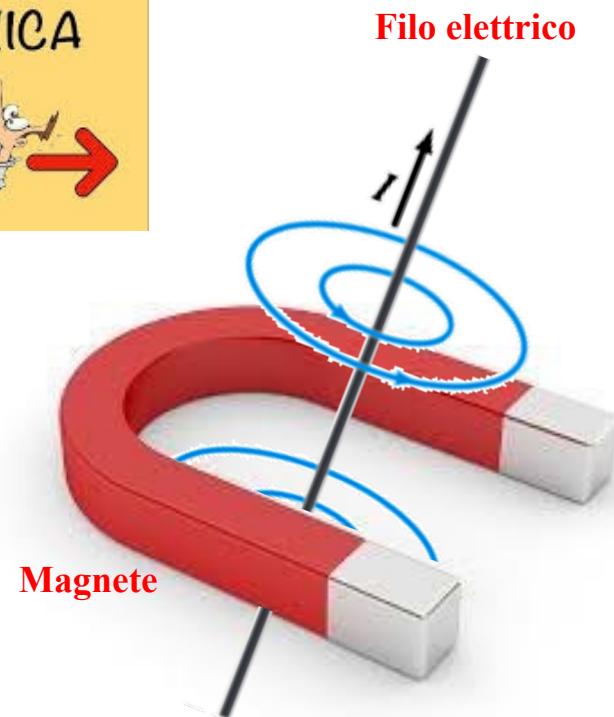
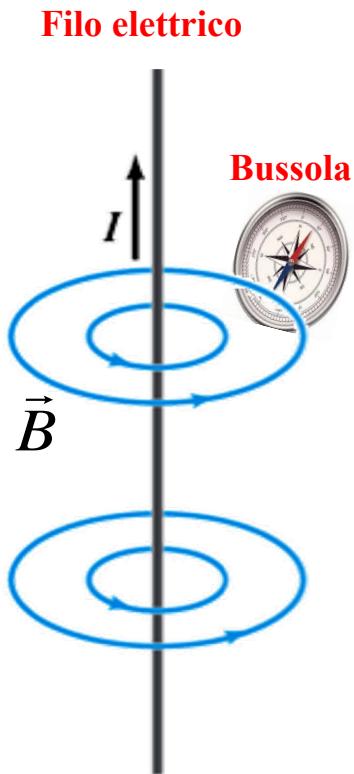


Forza esercitata da un Magnete su un filo elettrico

Ma se un **filo percorso da corrente** è in grado di produrre un campo magnetico, e quindi di **esercitare una forza** su un magnete (ad es. un ago magnetico) posto nelle sue vicinanze, per la **terza legge della dinamica** di Newton, intuitivamente ci potremmo aspettare che **anche un magnete eserciti una forza su un filo percorso da corrente**: in realtà le cose stanno proprio così e anche questo effetto è stato dimostrato sperimentalmente da Oersted! Vediamo cosa si osserva negli esperimenti...



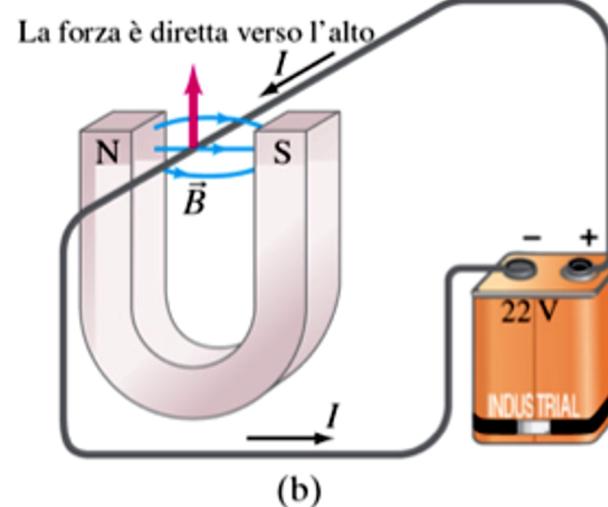
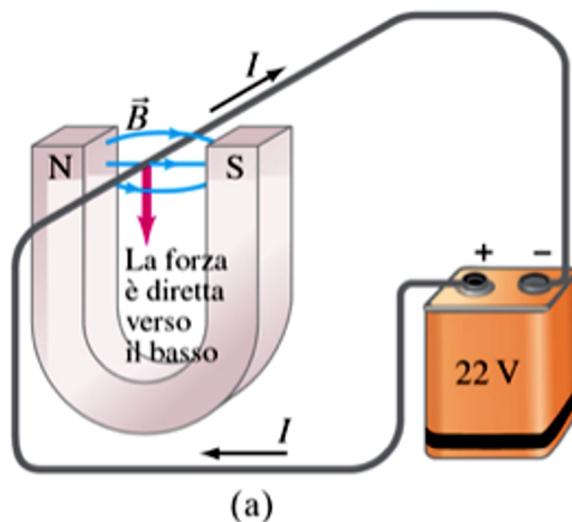
Christian Oersted
(1777-1851)



Forza esercitata da un Magnete su un filo elettrico

Ma se un **filo percorso da corrente** è in grado di produrre un campo magnetico, e quindi di **esercitare una forza** su un magnete (ad es. un ago magnetico) posto nelle sue vicinanze, per la **terza legge della dinamica** di Newton, intuitivamente ci potremmo aspettare che **anche un magnete eserciti una forza su un filo percorso da corrente**: in realtà le cose stanno proprio così e anche questo effetto è stato dimostrato sperimentalmente da Oersted! Vediamo cosa si osserva negli esperimenti...

Consideriamo un filo percorso da una **corrente** I e passante, come mostrato nella figura qui sotto, tra i poli di un magnete a U tra i quali esisterà un **campo magnetico** \vec{B} : sul filo si osserva agire una **forza** \vec{F} diretta ortogonalmente al campo magnetico che nel caso (a) punterà verso il basso mentre nel caso (b), invertendo il verso della corrente, punterà verso l'alto. In sostanza la direzione della forza \vec{F} risulta sempre ortogonale al piano formato dal vettore \vec{I} , di intensità I e diretto lungo il filo nel verso della corrente, e dal vettore \vec{B} , mentre il suo verso può essere agevolmente determinato con la **regola della mano destra** (c): piegando le dita da \vec{I} su \vec{B} il pollice indicherà il verso di \vec{F} . E' questo un primo indizio che potrebbe suggerire la presenza di un **prodotto vettoriale** che agisce dietro le quinte...



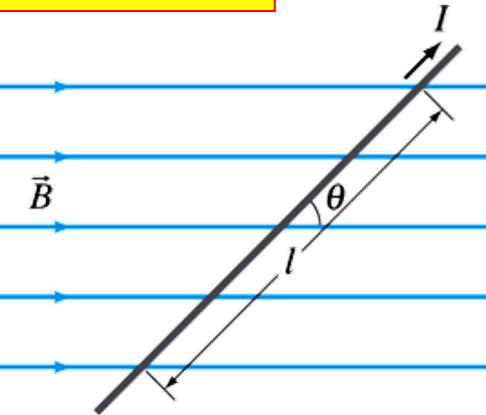
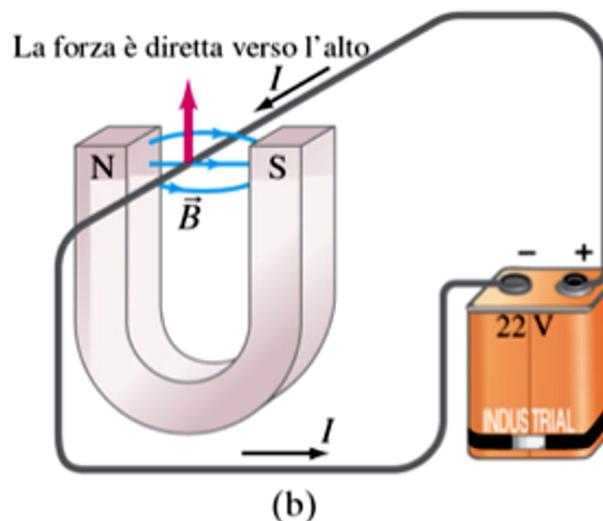
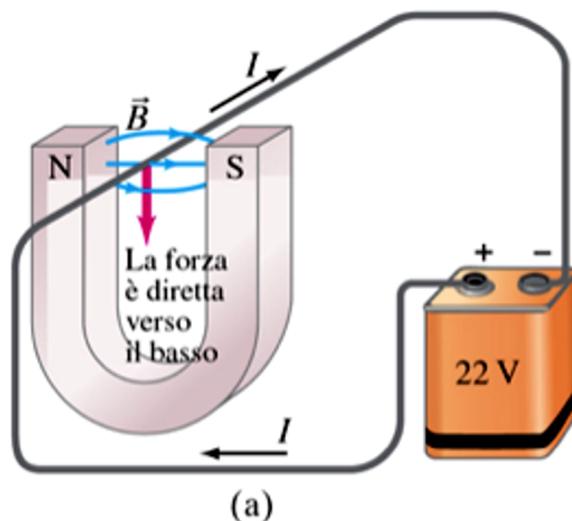
Forza esercitata da un Magnete su un filo elettrico

Gli esperimenti mostrano, inoltre, che: (1) la **forza \vec{F} agente sul filo** è direttamente proporzionale alla corrente I e alla lunghezza l della parte di filo esposta al campo magnetico \vec{B} , assunto approssimativamente uniforme tra i due poli del magnete; (2) aumentando l'intensità del campo magnetico \vec{B} , cresce proporzionalmente anche il modulo di \vec{F} ; (3) la forza \vec{F} dipende anche dall'angolo θ tra la direzione della corrente e quella del campo magnetico.

Riassumendo tutte queste **evidenze sperimentali**, se ne può concludere che la forza agente su un filo di lunghezza l percorso da una corrente I e sottoposto all'azione di un campo magnetico \vec{B} è data dal **prodotto vettoriale**:

$$\vec{F} = \vec{I}l \times \vec{B} \rightarrow F = IlB \sin\theta$$

La forza avrà dunque **modulo massimo** quando la corrente è ortogonale alle linee di campo ($\theta=90^\circ$, $F = Il/B$) mentre è **nulla** quando la corrente e le linee di campo sono parallele ($\theta=0^\circ$).

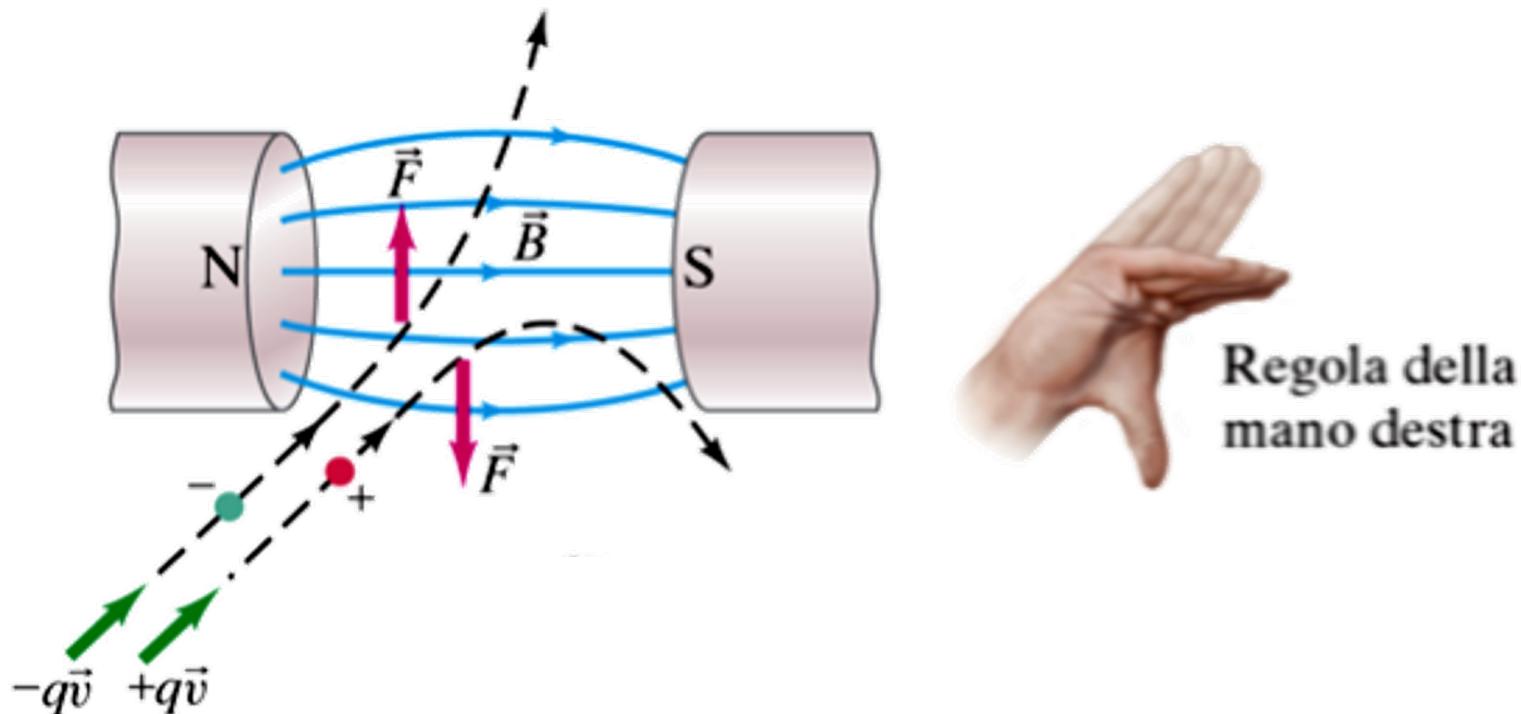


Cariche in moto in un Campo Magnetico: la Forza di Lorentz

Poichè si è visto che i campi magnetici esercitano una forza sui conduttori percorsi da corrente, e poichè la corrente non è altro che un flusso di cariche (elettroni) in movimento, non è difficile convincersi del fatto che **anche una carica libera \vec{q} in moto in un campo magnetico \vec{B} a velocità \vec{v} subisce una forza**, detta **Forza di Lorentz**, espressa dal seguente prodotto vettoriale:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \rightarrow F = qvB \sin\theta$$

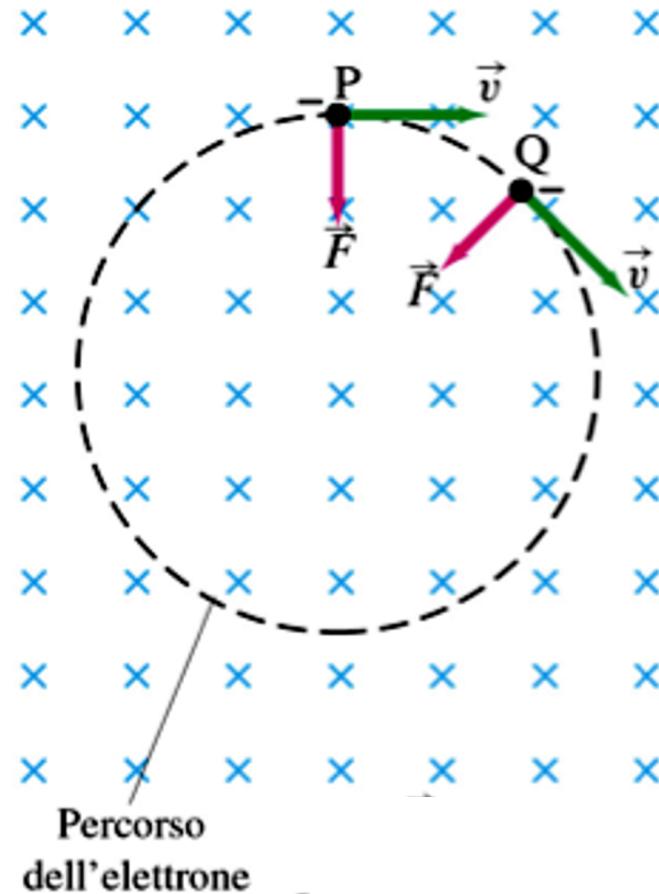
dove θ è l'angolo tra i vettori \vec{v} e \vec{B} . Quando la particella si muove ortogonalmente al campo, $\theta=90^\circ$ e la forza è massima: $F_{\max} = qvB$. La direzione della forza \vec{F} è sempre ortogonale al piano individuato dai vettori \vec{v} e \vec{B} e quando la carica q è positiva se ne può ricavare il verso con la solita regola della mano destra (se q è negativa il verso sarà opposto).



Cariche in moto in un Campo Magnetico: la Forza di Lorentz

Da queste considerazioni risulta che una carica negativa, ad esempio **un elettrone**, in moto verso destra su un piano ortogonale ad un campo magnetico uniforme (*entrante*, nella figura qui accanto) sente una forza che lo obbliga a percorrere in senso orario una **traiettoria circolare**. Lungo tale traiettoria il modulo della velocità dell'elettrone resta costante perché la forza magnetica, diretta costantemente verso il centro della circonferenza e dunque sempre perpendicolare alla velocità, gioca qui il ruolo di **forza centripeta** la quale, come sappiamo, **non compie lavoro** (se la carica fosse stata positiva la rotazione sarebbe avvenuta in senso antiorario).

\vec{B} è diretto
dentro la pagina



$$F = qvB$$



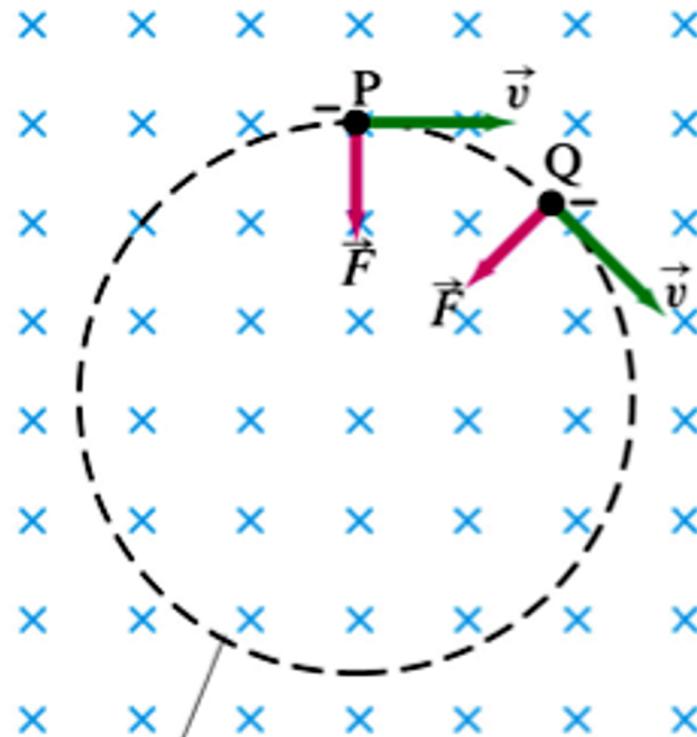
Regola della
mano destra

Esercizio

Un elettrone si muove con velocità $2.0 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ in un piano perpendicolare a un campo magnetico uniforme di intensità $B=0.010 \text{ T}$. **Descrivere in modo quantitativo la traiettoria percorsa dall'elettrone e determinarne il raggio di curvatura.**

Come sappiamo, l'elettrone si muoverà lungo una **traiettoria circolare** con **velocità v** di modulo costante e **accelerazione centripeta $a = v^2/r$** . Per determinare il raggio di curvatura r usiamo la **seconda legge della dinamica** di Newton sapendo che (essendo $\theta=90^\circ$) la forza che agisce sulla particella è quella di Lorentz, $F = qvB$:

$$F = ma \rightarrow qvB = \frac{mv^2}{r} \rightarrow r = \frac{mv}{qB} = \frac{(9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})(2.0 \cdot 10^7 \text{ m/s})}{(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})(0.010 \text{ T})} = 1.1 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 1.1 \text{ cm}$$



Esercizio

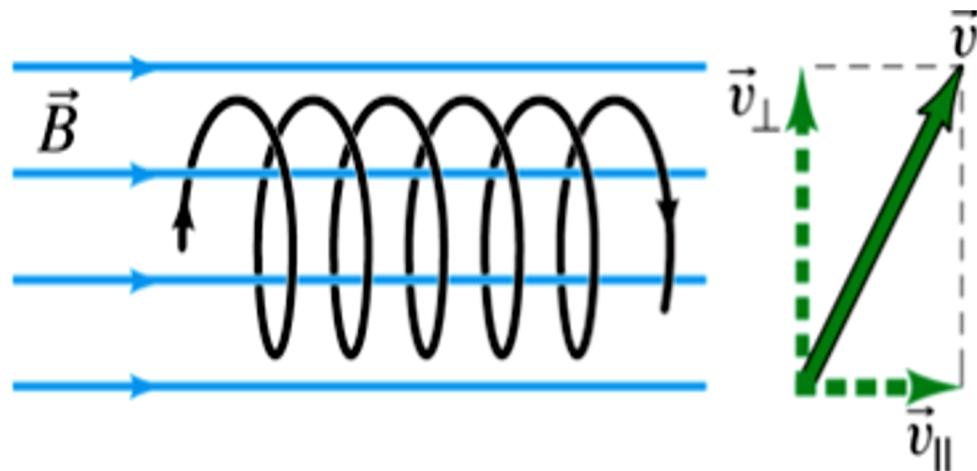
Un elettrone si muove con velocità $2.0 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ in un piano perpendicolare a un campo magnetico uniforme di intensità $B=0.010 \text{ T}$. **Descrivere in modo quantitativo la traiettoria percorsa dall'elettrone e determinarne il raggio di curvatura.**

Come sappiamo, l'elettrone si muoverà lungo una **traiettoria circolare** con **velocità** v di modulo costante e **accelerazione** centripeta $a = v^2/r$. Per determinare il raggio di curvatura r usiamo la **seconda legge della dinamica** di Newton sapendo che (essendo $\theta=90^\circ$) la forza che agisce sulla particella è quella di Lorentz, $F = qvB$:

$$F = ma \rightarrow qvB = \frac{mv^2}{r} \rightarrow r = \frac{mv}{qB} = \frac{(9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})(2.0 \cdot 10^7 \text{ m/s})}{(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})(0.010 \text{ T})} = 1.1 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 1.1 \text{ cm}$$

Se invece la **velocità iniziale** dell'elettrone nel campo magnetico uniforme \vec{B} **non fosse perpendicolare** alla direzione delle linee di forza del campo, la traiettoria seguita dall'elettrone sarebbe non più circolare ma elicoidale.

Infatti in questo caso esisterebbe una **componente** della velocità v **parallela** al campo che si manterebbe costante in modulo, direzione e verso in quanto non soggetta ad alcuna forza: questa componente si sommerebbe vettorialmente a quella perpendicolare, che come sappiamo dà origine a un moto circolare, e dunque dalla combinazione di questi due moti si otterebbe un **moto complessivo di tipo elicoidale** (spirale) attorno alle linee di campo magnetico.



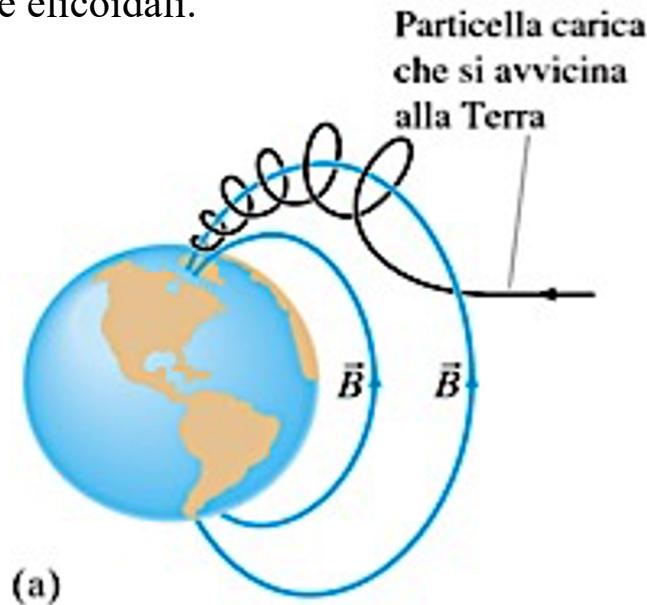
Esercizio

Un elettrone si muove con velocità $2.0 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ in un piano perpendicolare a un campo magnetico uniforme di intensità $B=0.010 \text{ T}$. **Descrivere in modo quantitativo la traiettoria percorsa dall'elettrone e determinarne il raggio di curvatura.**

Come sappiamo, l'elettrone si muoverà lungo una **traiettoria circolare** con **velocità v** di modulo costante e **accelerazione centripeta $a = v^2/r$** . Per determinare il raggio di curvatura r usiamo la **seconda legge della dinamica** di Newton sapendo che (essendo $\theta=90^\circ$) la forza che agisce sulla particella è quella di Lorentz, $F = qvB$:

$$F = ma \rightarrow qvB = \frac{mv^2}{r} \rightarrow r = \frac{mv}{qB} = \frac{(9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})(2.0 \cdot 10^7 \text{ m/s})}{(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})(0.010 \text{ T})} = 1.1 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 1.1 \text{ cm}$$

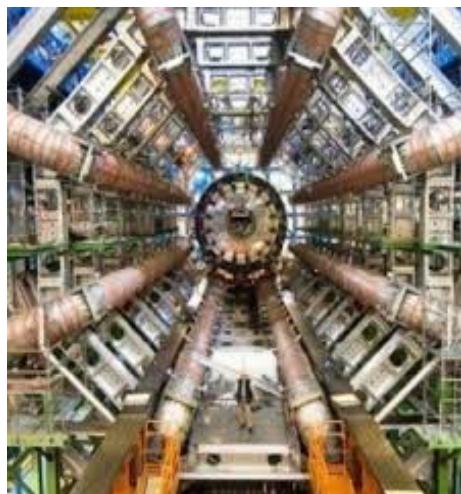
Questo meccanismo è alla base del fenomeno dell'**aurora boreale (o australe)**, dovuta alle particelle cariche del vento solare che ionizzano l'aria in prossimità dei poli muovendosi appunto lungo traiettorie elicoidali.



Esercizio

Un elettrone si muove con velocità $2.0 \times 10^7 \text{ m/s}$ in un piano perpendicolare a un campo magnetico uniforme di intensità $B=0.010 \text{ T}$. **Descrivere in modo quantitativo la traiettoria percorsa dall'elettrone e determinarne il raggio di curvatura.**

Un meccanismo analogo consente alle **particelle elementari** prodotte dagli **acceleratori** (come ad esempio quello del Cern di Ginevra, dove si è riusciti a identificare il famoso «Bosone di Higgs») di percorrere rapidissimamente grandi percorsi circolari ed eventualmente collidere tra loro per produrre altre particelle!

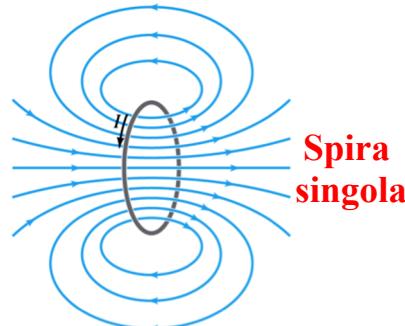
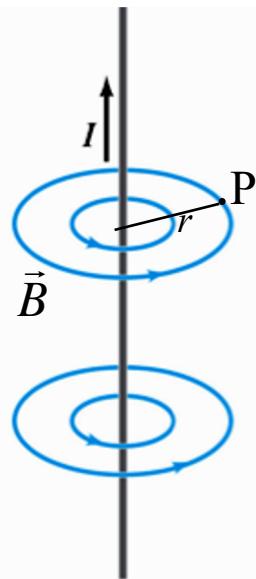


Relazioni tra fenomeni elettrici e magnetici

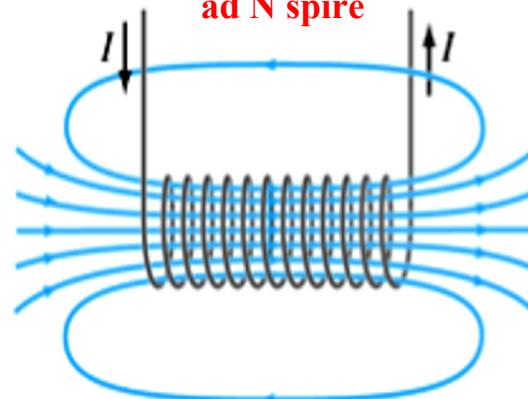
Abbiamo mostrato dunque che i **fenomeni elettrici e quelli magnetici sono in stretta relazione gli uni con gli altri**. In particolare, ricapitolando ancora, abbiamo visto che:

(1) le correnti elettriche producono campi magnetici:

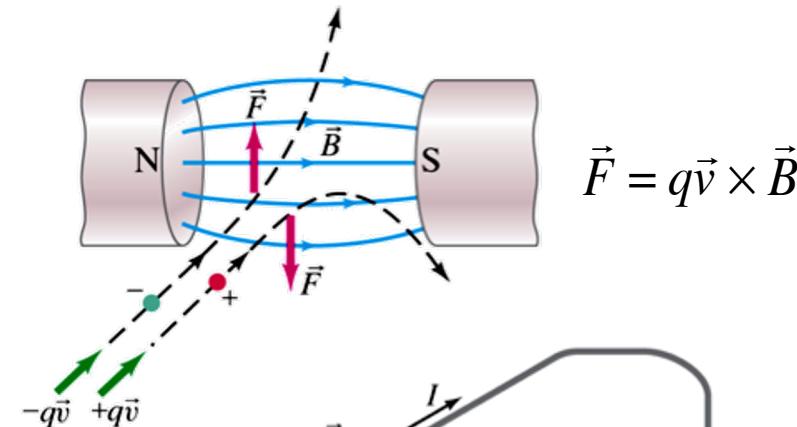
Filo elettrico
rettilineo infinito



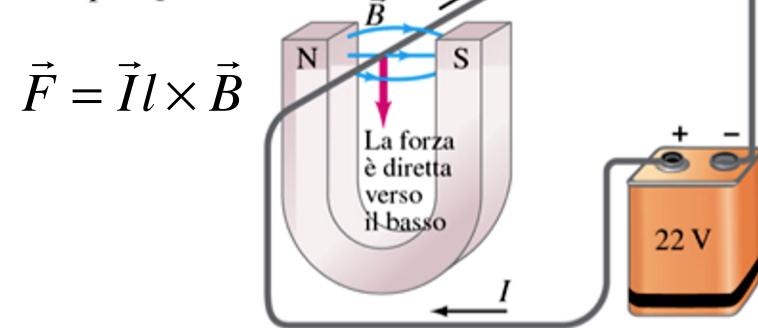
Solenoid o Bobina
ad N spire



(2) i campi magnetici esercitano una forza sulle cariche elettriche in moto o sui conduttori percorsi da corrente:



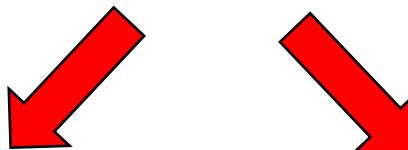
$$\vec{F} = \vec{I}l \times \vec{B}$$



Relazioni tra fenomeni elettrici e magnetici

Abbiamo mostrato dunque che i **fenomeni elettrici e quelli magnetici sono in stretta relazione gli uni con gli altri**. In particolare, ricapitolando ancora, abbiamo visto che:

(1) le correnti elettriche producono campi magnetici:



(2) i campi magnetici esercitano una forza sulle cariche elettriche in moto o sui conduttori percorsi da corrente:



Sorge dunque spontanea la domanda: non sarà mica che i campi magnetici sono anche in grado di produrre correnti elettriche?

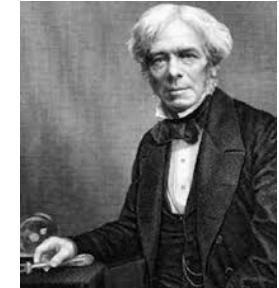
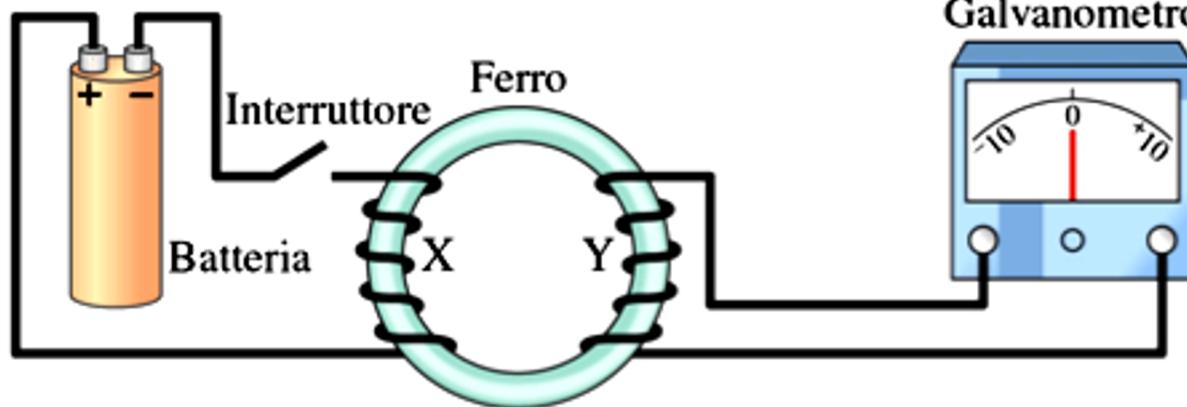
Henry contro Faraday

Una volta appurato che le correnti elettriche producono campi magnetici e che i campi magnetici esercitano una forza sulle cariche in moto, ai fisici della prima metà dell'800 venne spontaneo chiedersi se i campi magnetici fossero anche in grado di produrre correnti elettriche. Fu così che, indipendentemente tra loro, lo statunitense **Joseph Henry** e il già citato scienziato inglese **Michael Faraday** scoprirono che anche questo fenomeno si realizza nei fatti e le applicazioni derivanti da questa scoperta (come ad esempio i generatori di corrente) cambiarono il corso della storia dell'umanità.

Gli esperimenti di Faraday facevano uso di **due distinti circuiti elettrici**, uno (X) collegato ad una batteria e l'altro (Y) ad un **galvanometro**, uno strumento in grado di misurare anche minimi passaggi di corrente. I fili di entrambi i circuiti erano poi avvolti attorno al medesimo **nucleo di ferro**: l'idea era quella di generare un **campo magnetico** per mezzo della corrente prodotta nel circuito collegato alla batteria, amplificarlo per mezzo del nucleo di ferro (materiale **ferromagnetico** in grado di allineare i momenti magnetici di spin dei suoi atomi), e verificare se tale campo era in grado di **indurre una corrente** nel secondo circuito. Come era accaduto in precedenza, quando si era cercato inutilmente di produrre campi magnetici utilizzando cariche elettriche statiche, anche in questo caso i primi esperimenti di Faraday, che facevano uso di **correnti continue**, non ebbero alcun successo...



Joseph Henry
(1797-1878)



Michael Faraday
(1791-1867)

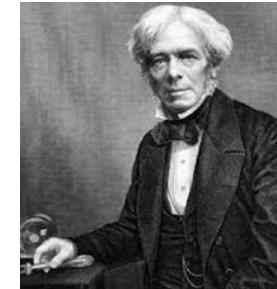
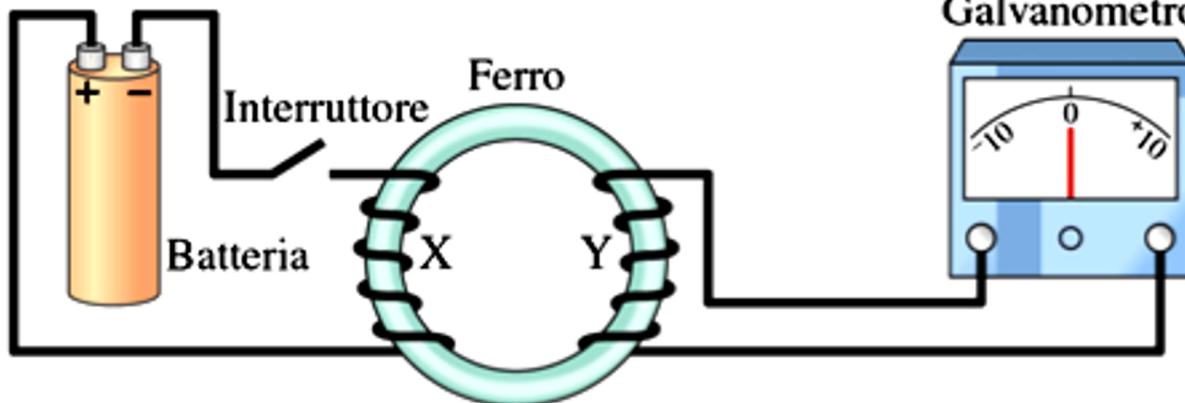
La Forza Elettromotrice Indotta

Analogamente alla scoperta fortuita di Oersted, che si accorse dello spostamento dell'ago di una bussola che si trovava **per caso** accanto a un circuito percorso da corrente, anche stavolta il successo di Faraday fu legato ad un **evento casuale**: egli si accorse che l'ago del galvanometro subiva uno spostamento brusco in un senso **nell'istante di chiusura** del circuito X e nel senso opposto **nell'istante di apertura** del medesimo circuito. Questo significava che in quei due istanti il circuito Y doveva essere percorso da una corrente, ma questa corrente non era evidentemente indotta dal campo magnetico costante prodotto dalla corrente continua che fluiva a regime nel circuito X bensì **dal campo magnetico variabile** generato a sua volta dalla repentina variazione di corrente che si produceva solo nei momenti di chiusura e apertura del circuito X!

Faraday interpretò questi risultati sperimentali concludendo che solo i campi magnetici variabili sono in grado di indurre una corrente in un conduttore e chiamò tale corrente, appunto, **corrente indotta**. Quando il campo magnetico cui è esposto il circuito Y varia, si osserva dunque un passaggio di corrente in Y come se questo circuito fosse collegato a una sorgente di **“forza elettromotrice”** (termine che non indica una forza ma una *differenza di potenziale o tensione*). Faraday sintetizzò questo fenomeno affermando che **“una variazione del campo magnetico induce una forza elettromotrice f.e.m.”**.



Joseph Henry
(1797-1878)



Michael Faraday
(1791-1867)

Le Equazioni di Maxwell

Nella seconda metà dell'800 il fisico e matematico scozzese **James Clerk Maxwell** decise di mettersi al lavoro per sintetizzare le scoperte e le leggi ricavate nell'ambito dei fenomeni elettrici e magnetici da Faraday, Gauss e Ampère nei decenni precedenti, allo scopo di mostrare definitivamente che **tutti questi fenomeni potevano essere descritti in termini di campi elettrici e magnetici interagenti**.



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

Le Equazioni di Maxwell

Nella seconda metà dell'800 il fisico e matematico scozzese **James Clerk Maxwell** decise di mettersi al lavoro per sintetizzare le scoperte e le leggi ricavate nell'ambito dei fenomeni elettrici e magnetici da Faraday, Gauss e Ampère nei decenni precedenti, allo scopo di mostrare definitivamente che **tutti questi fenomeni potevano essere descritti in termini di campi elettrici e magnetici interagenti**.

Leggi di Gauss

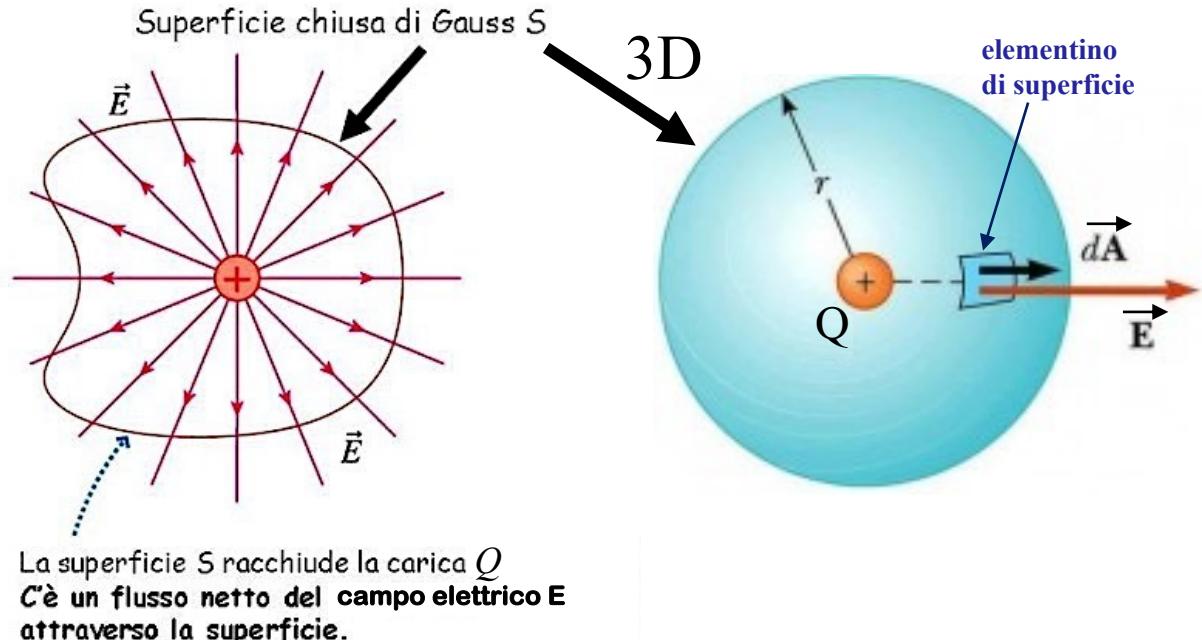
1) Legge di Gauss per il Flusso Elettrico

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

integrale su una superficie chiusa Flusso del campo elettrico Φ_E



J.F.C. Gauss
(1777-1855)



Le Equazioni di Maxwell

Nella seconda metà dell'800 il fisico e matematico scozzese **James Clerk Maxwell** decise di mettersi al lavoro per sintetizzare le scoperte e le leggi ricavate nell'ambito dei fenomeni elettrici e magnetici da Faraday, Gauss e Ampère nei decenni precedenti, allo scopo di mostrare definitivamente che **tutti questi fenomeni potevano essere descritti in termini di campi elettrici e magnetici interagenti**.

Leggi di Gauss

1) Legge di Gauss per il Flusso Elettrico

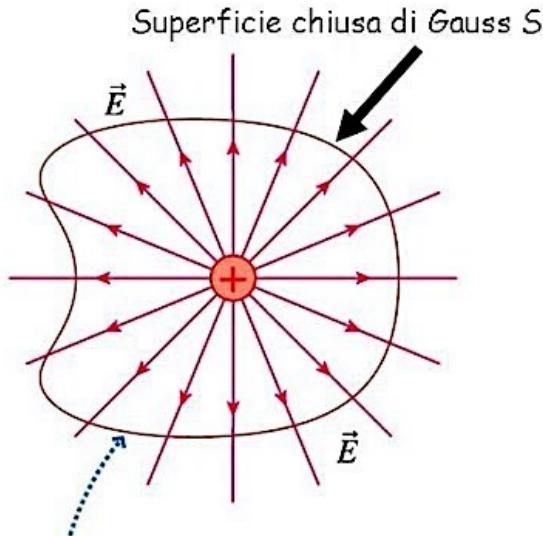
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Flusso del campo elettrico Φ_E

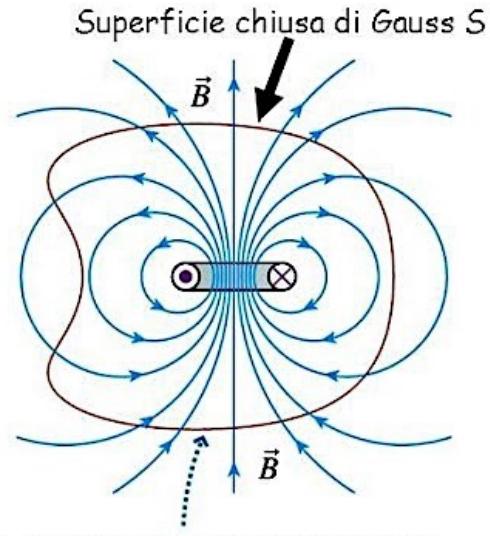
2) Legge di Gauss per il Flusso Magnetico

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Flusso del campo magnetico Φ_B



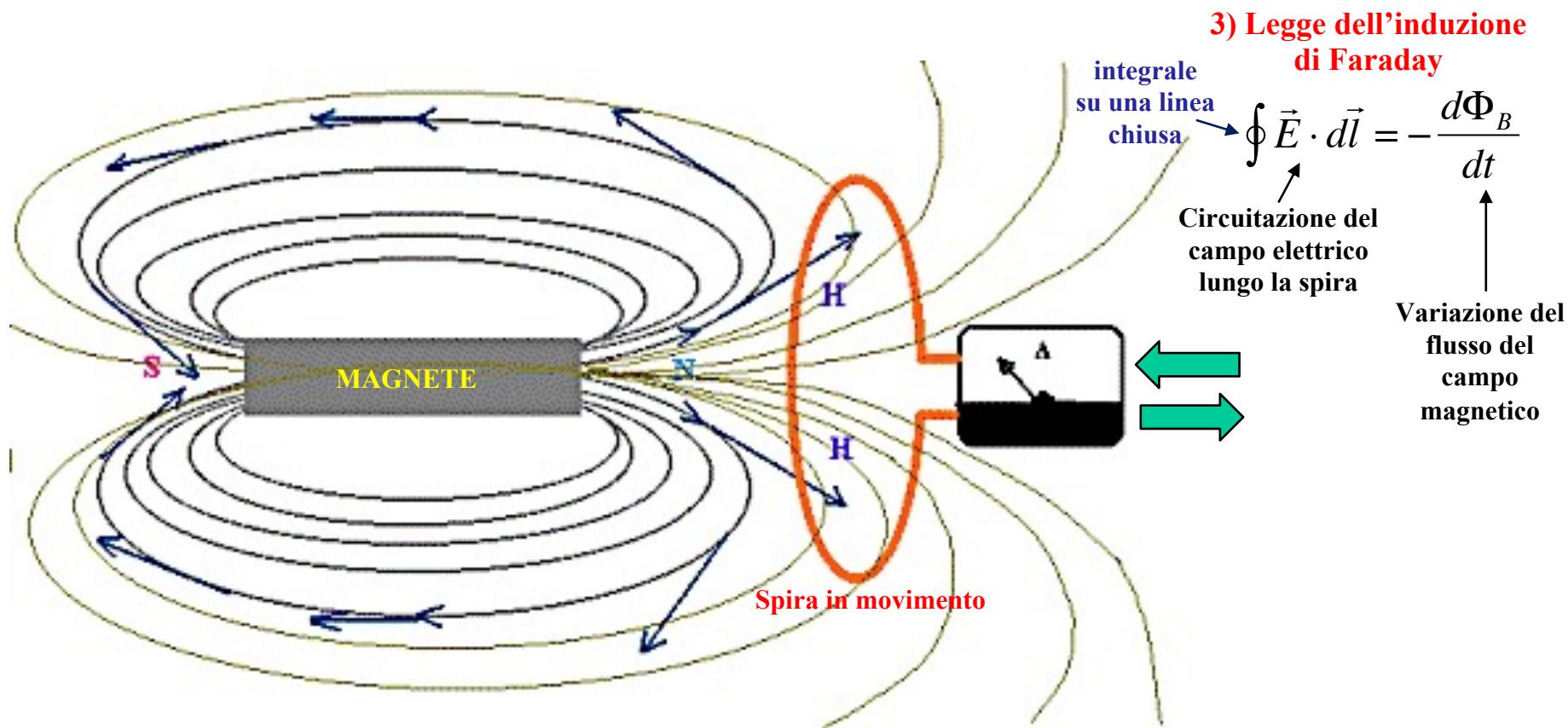
Superficie chiusa di Gauss S
La superficie S racchiude la carica Q .
C'è un flusso netto del campo elettrico E attraverso la superficie.



Superficie chiusa di Gauss S
La superficie S racchiude la spira percorsa da corrente.
NON c'è un flusso netto del campo magnetico B attraverso la superficie.

Le Equazioni di Maxwell

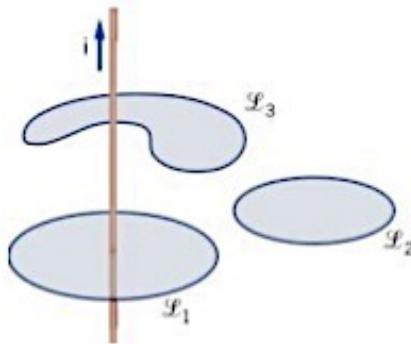
Nella seconda metà dell'800 il fisico e matematico scozzese **James Clerk Maxwell** decise di mettersi al lavoro per sintetizzare le scoperte e le leggi ricavate nell'ambito dei fenomeni elettrici e magnetici da Faraday, Gauss e Ampère nei decenni precedenti, allo scopo di mostrare definitivamente che **tutti questi fenomeni potevano essere descritti in termini di campi elettrici e magnetici interagenti**.



Le Equazioni di Maxwell

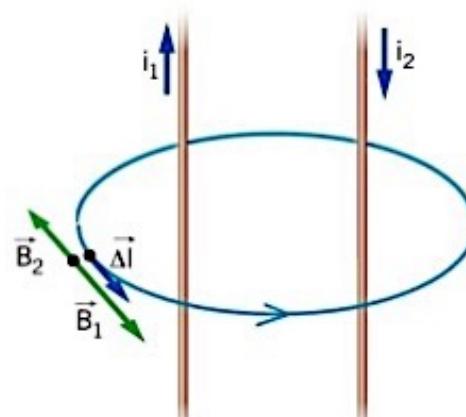
Nella seconda metà dell'800 il fisico e matematico scozzese **James Clerk Maxwell** decise di mettersi al lavoro per sintetizzare le scoperte e le leggi ricavate nell'ambito dei fenomeni elettrici e magnetici da Faraday, Gauss e Ampère nei decenni precedenti, allo scopo di mostrare definitivamente che **tutti questi fenomeni potevano essere descritti in termini di campi elettrici e magnetici interagenti**.

Il teorema di Ampère



La corrente i è concatenata al cammino L se attraversa una superficie che ha come contorno la linea L .

$$\Gamma_{\mathcal{L}}(\vec{B}) = \mu_0 \sum_k i_k$$



Il segno della corrente

4) Legge di Ampère

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$$

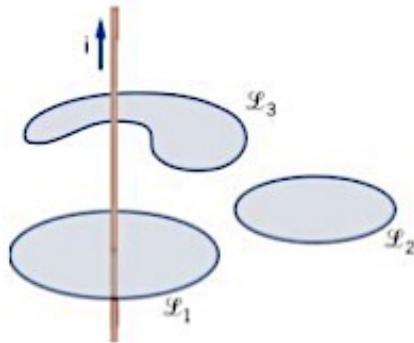
Circuitazione del campo magnetico lungo la linea L

Permeabilità magnetica del vuoto
 $\mu_0 = 1.2566 \cdot 10^{-6} \frac{N}{A^2}$

Le Equazioni di Maxwell

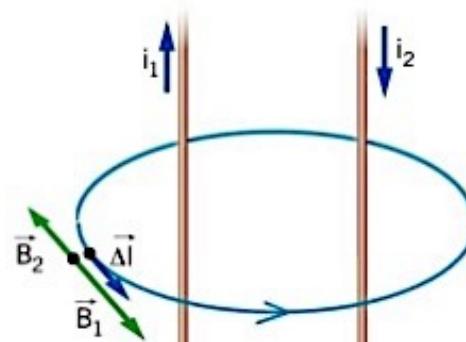
Nella seconda metà dell'800 il fisico e matematico scozzese **James Clerk Maxwell** decise di mettersi al lavoro per sintetizzare le scoperte e le leggi ricavate nell'ambito dei fenomeni elettrici e magnetici da Faraday, Gauss e Ampère nei decenni precedenti, allo scopo di mostrare definitivamente che **tutti questi fenomeni potevano essere descritti in termini di campi elettrici e magnetici interagenti**.

Il teorema di Ampère



La corrente i è concatenata al cammino L se attraversa una superficie che ha come contorno la linea L .

$$\Gamma_{\mathcal{L}}(\vec{B}) = \mu_0 \sum_k i_k$$

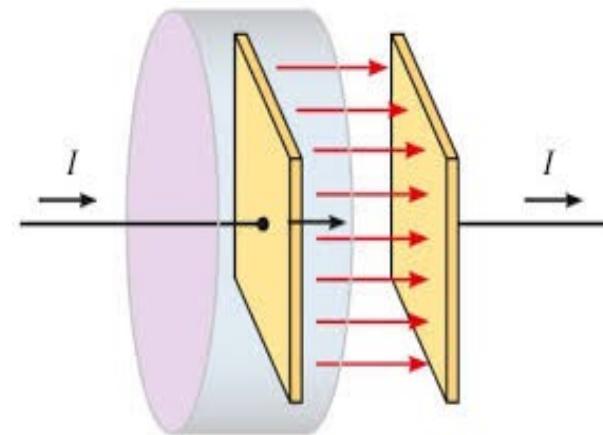


Il segno della corrente

4) Legge di Ampère generalizzata

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Variazione del flusso del campo elettrico



Le Equazioni di Maxwell

Nella seconda metà dell'800 il fisico e matematico scozzese **James Clerk Maxwell** decise di mettersi al lavoro per sintetizzare le scoperte e le leggi ricavate nell'ambito dei fenomeni elettrici e magnetici da Faraday, Gauss e Ampère nei decenni precedenti, allo scopo di mostrare definitivamente che **tutti questi fenomeni potevano essere descritti in termini di campi elettrici e magnetici interagenti**. Con questa idea in testa, Maxwell si rese subito conto che per raggiungere il suo obiettivo bastava prendere in considerazione solo queste **quattro equazioni!**

**1) Legge di Gauss
per il Flusso Elettrico**

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

**2) Legge di Gauss
per il Flusso Magnetico**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

**3) Legge dell'induzione
di Faraday**

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

**4) Legge di Ampère
generalizzata**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Le Equazioni di Maxwell

Le **equazioni di Maxwell** appena viste sono valide anche **nel vuoto**, cioè in assenza di materiali dielettrici o magnetici. In ulteriore assenza di cariche (**$Q=0$**) e di correnti (**$I=0$**), queste equazioni finiscono per dipendere solo dalla presenza di campi elettrici e magnetici variabili ed assumono una **forma ancora più semplice e simmetrica**:

**1) Legge di Gauss
per il Flusso Elettrico**

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = 0$$

**2) Legge di Gauss
per il Flusso Magnetico**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

**3) Legge dell'induzione
di Faraday**

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

**4) Legge di Ampère
generalizzata**

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

Le Equazioni di Maxwell nel vuoto

Da queste leggi, lo stesso Maxwell arrivò presto a dedurre un **curioso fenomeno ricorsivo**: mettendo assieme la legge di Ampère-Maxwell con la legge di Faraday diventava infatti chiaro che un **flusso magnetico variabile** deve produrre un **campo elettrico variabile**, il quale a sua volta fa **variare il flusso elettrico**, che produce un **campo magnetico variabile**, che a sua volta produce un **flusso magnetico variabile**, che fa nuovamente **variare il campo elettrico**, e così via...

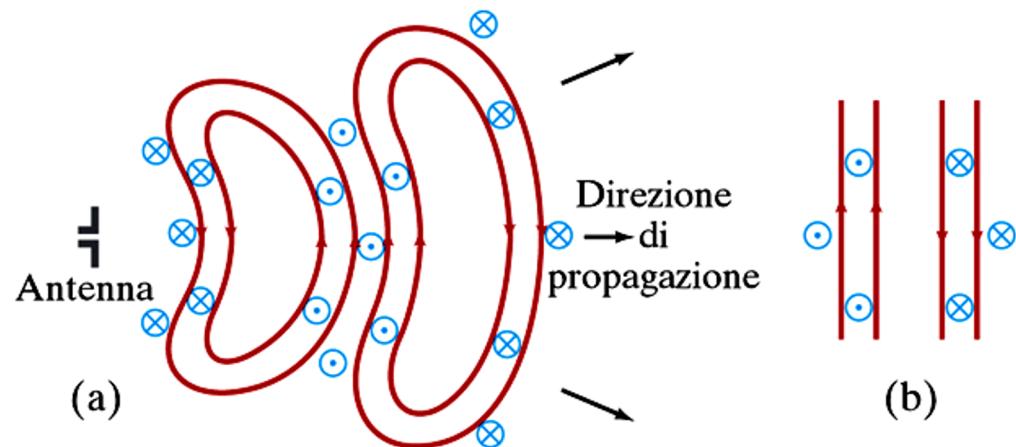
3) Legge di Faraday

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

4) Legge di Ampère-Maxwell

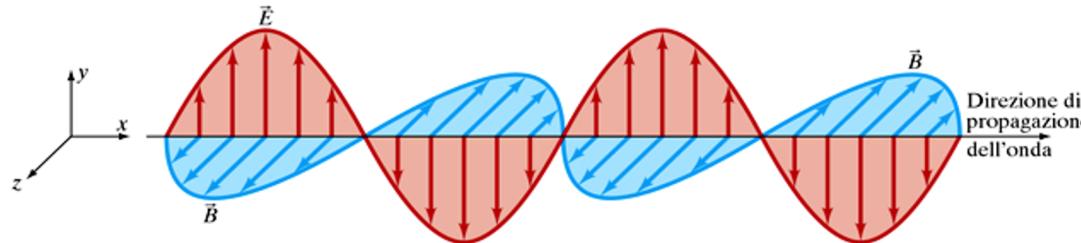
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Questo stupefacente effetto si traduceva matematicamente in una **equazione** molto familiare ad un fisico: si trattava infatti della **equazione generale che descrive un'onda piana unidimensionale**, che ad esempio si allontana da un'antenna (che contiene cariche oscillanti)...



Le Onde Elettromagnetiche

Per via puramente matematica Maxwell aveva dunque fatto la scoperta sorprendente che il risultato della interazione fra campi elettrici e magnetici variabili prevista dalle sue equazioni assumeva l'aspetto di **onde elettromagnetiche piane (EM) che si propagavano nello spazio!**



Si ricordi che, quando si è parlato della **trasmessione del calore per irraggiamento**, si è detto che questo era dovuto alla trasmissione di energia attraverso lo spazio vuoto, senza alcuna forma di scambio di materia: ma questo meccanismo lasciava aperto il problema di come ciò potesse accadere e di che cosa trasportasse effettivamente tale energia. Ebbene, a questo punto risulta chiaro che tale energia è trasportata da **onde elettromagnetiche** che si spostano nello spazio ad una certa velocità v . Ma è proprio qui che Maxwell fece un'altra **sensazionale scoperta**: confrontando l'equazione generale delle onde con quelle delle onde elettromagnetiche era immediato calcolare la velocità v delle onde EM, e il risultato fu il seguente:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 2.99792 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Ed ecco il **colpo di scena**: questa velocità trovata da Maxwell, che poteva essere riscritta così

$$2.99792 \cdot 10^8 \text{ m/s} \approx 3.00 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 300000 \text{ km/s}$$

corrispondeva ad una velocità già ai suoi tempi sperimentalmente ben nota....

la velocità della luce “c”!

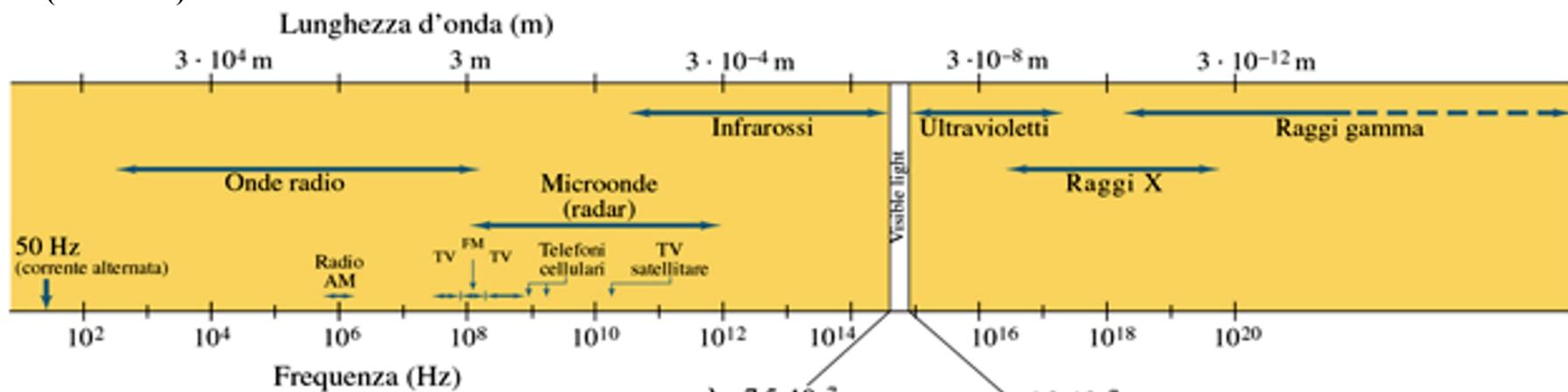
La Luce come Onda Elettromagnetica

Maxwell aveva dunque scoperto che **la luce visibile era nient'altro che un'onda elettromagnetica**, scoperta per quel tempo importantissima in quanto, se pure si era già stabilito che la luce si comportava come un'onda, nessuno era ancora riuscito a spiegare quale fosse la natura di quest'onda, cioè a capire cosa effettivamente oscillasse nelle onde luminose. Adesso Maxwell aveva trovato la risposta: **ad oscillare erano i campi elettrici e magnetici!**



Heinrich Hertz
(1857-1894)

Fu però solo 8 anni dopo la morte di Maxwell, cioè nel 1887, che lo scienziato tedesco **Heinrich Hertz** riuscì a produrre sperimentalmente le prime onde elettromagnetiche e ad osservarne gli effetti, che coincidevano perfettamente con tutti i comportamenti tipici della luce. Si capì anche che la luce visibile era solo un **particolare tipo** di onda elettromagnetica ed occupava solo una piccola porzione di uno **spettro molto più ampio**:



$$c = \lambda f \rightarrow f = \frac{c}{\lambda}$$

$$f = 4 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \quad 7.5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Luce visibile

La Luce come Onda Elettromagnetica

Maxwell aveva dunque scoperto che **la luce visibile era nient'altro che un'onda elettromagnetica**, scoperta per quel tempo importantissima in quanto, se pure si era già stabilito che la luce si comportava come un'onda, nessuno era ancora riuscito a spiegare quale fosse la natura di quest'onda, cioè a capire cosa effettivamente oscillasse nelle onde luminose. Adesso Maxwell aveva trovato la risposta: **ad oscillare erano i campi elettrici e magnetici!**



Heinrich Hertz
(1857-1894)

Fu però solo 8 anni dopo la morte di Maxwell, cioè nel 1887, che lo scienziato tedesco **Heinrich Hertz** riuscì a produrre sperimentalmente le prime onde elettromagnetiche e ad osservarne gli effetti, che coincidevano perfettamente con tutti i comportamenti tipici della luce. Si capì anche che la luce visibile era solo un **particolare tipo** di onda elettromagnetica ed occupava solo una piccola porzione di uno **spettro molto più ampio**:

Alcuni video per approfondire le leggi di Maxwell e le onde elettromagnetiche:

- La Legge di Gauss per E:** https://www.youtube.com/watch?v=XrxvoPPUeT4&list=PL-483KxqEzucy0_NybnZ8iac9j2U2pJKO&index=1
- La Legge di Gauss per B:** https://www.youtube.com/watch?v=3HP3B3v1-gU&list=PL-483KxqEzucy0_NybnZ8iac9j2U2pJKO&index=2
- La Legge di Ampere-Maxwell:** <https://www.youtube.com/watch?v=4JidV5JX378>
- La Legge di Faraday:** <https://www.youtube.com/watch?v=tKJ9VJEF0Bc>
- Onde elettromagnetiche:** <https://www.youtube.com/watch?v=fQddJTpRiq8>
- Spettro elettromagnetico:** <https://www.youtube.com/watch?v=b5LROOAPEzg>

The End