



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FERRARA
Scuola Di Specializzazione Per L'insegnamento Secondario

CLASSE DI SPECIALIZZAZIONE A049-A059

Tema:

***Campo Elettrostatico e Campo Magnetostatico.
Circuiti Elettrici in Corrente Continua.***

Docenti.:

Prof. Fabiano Minni

Prof. Davide Neri

Prof. Luigi Tomasi

Specializzanda:

Serena Bezzan

VIII° Ciclo - Anno Accademico 2006-2007
Data di Esposizione: 29 Febbraio 2008

Destinatari

Il percorso didattico è rivolto agli allievi che frequentano il quinto anno di un Liceo Scientifico indirizzo PNI; le ore settimanali previste sono tre (con valutazione scritta e orale).

Il tema è stato suddiviso in tre unità didattiche:

- Campo elettrostatico
- Campo magnetostatico
- Circuiti elettrici in corrente continua

Programmi PNI

Il tema che mi è assegnato è localizzato nel *Tema 1 – Forze e Campi* e presenta i seguenti contenuti:

- forze e momenti
- massa inerziale e momento di inerzia
- concetto di campo e linee di campo
- campo gravitazionale e campo elettrostatico
- potenziale ed energia potenziale: campi conservativi
- moto di masse in un campo gravitazionale
- moto di cariche in un campo elettrostatico
- campo magnetico generato da corrente elettrica
- moto di cariche in un campo magnetico
- conduzione elettrica
- induzione elettromagnetica
- campo elettromagnetico
- circuiti elettrici

Il tema si propone di formalizzare e completare le conoscenze acquisite nel corso del biennio e non sufficientemente approfondite: Inoltre *“lo svolgimento in parallelo degli argomenti campo gravitazionale e campo elettrostatico permetterà di trattare subito analogie e differenze tra di essi. Il successivo studio del campo magnetico – qualora il livello della classe lo consenta- permetterà un discorso più ampio sui concetti di campo e di interazione.”*

Obiettivi generali

- Acquisire le conoscenze, competenze e capacità previste dall'unità didattica.
- Comprendere le finalità e acquisire il metodo scientifico delle scienze sperimentali.
- Acquisire padronanza con il metodo logico deduttivo.
- Acquisire conoscenza e padronanza anche del metodo induttivo.
- Condurre gli studenti ad essere in grado di affrontare e risolvere un problema fisico.

- Contribuire a sviluppare e soddisfare l'interesse degli studenti per gli aspetti storico-epistemologici della fisica e condurli ad inquadrare storicamente l'argomento affrontato.
- Riconoscere il contributo dato dalla fisica allo sviluppo delle scienze sperimentali.
- Condurre ad un appropriato utilizzo del lessico specifico della fisica.
- Imparare ad operare con il simbolismo della fisica, a sviluppare la capacità di utilizzare metodi, strumenti e modelli fisici in situazioni diverse.

Obiettivi trasversali

- Sviluppare attitudine alla comunicazione e ai rapporti interpersonali favorendo lo scambio di opinioni tra docente e allievo e tra gli allievi.
- Proseguire ed ampliare il processo di preparazione scientifica e culturale degli studenti.
- Contribuire a sviluppare lo spirito critico e l'attitudine a riesaminare criticamente ed a sistemare logicamente le conoscenze acquisite.
- Contribuire a sviluppare capacità logiche ed argomentative.

Metodologia didattica

Per affrontare gli argomenti di queste Unità Didattiche, si farà uso di lezioni che comprendono una componente frontale, per introdurre i nuovi argomenti e concetti, ed una componente dialogica per verificare in itinere l'acquisizione dei contenuti; si avrà cura di fare diversi esempi ogni volta che sarà introdotto un nuovo concetto. Sono inoltre programmate attività di laboratorio durante le quali i ragazzi avranno la possibilità di intuire o verificare sperimentalmente le conclusioni teoriche.

Per ogni argomento trattato, si cercherà di presentare un buon numero di esercizi, risolvendoli insieme in classe, in modo da proporre più metodologie adatte per la risoluzione.

A casa, verranno assegnati esercizi in modo che gli alunni possano acquisire una maggiore familiarità con l'argomento.

In classe, la discussione permetterà di chiarire eventuali dubbi.

Materiali e strumenti utilizzati

- Lavagna e gessi;
- Libri di testo;
- Calcolatrice scientifica;
- Laboratorio di fisica.

Controllo dell'apprendimento

L'andamento e l'efficacia delle metodologie didattiche utilizzate per ogni unità didattica, vengono controllate attraverso **verifiche formative in itinere**, costituite da discussioni in classe, svolgimento di esercizi in classe o a casa e attraverso **verifiche sommative**.

Strumenti di valutazione

La misurazione si attua attraverso:

- prove orali individuali;
- verifica sommativa.

Griglia per la valutazione

Per determinare gli esiti della verifica sommativa, attribuiamo ad ogni esercizio un punteggio. La diversità di punteggio tra i vari esercizi, rispecchia i livelli diversi di difficoltà in termini di conoscenze, competenze e capacità per svolgerli.

Nell'attribuire il punteggio completo, nullo o frazione intermedia, teniamo conto dei seguenti indicatori (suggeriti dal Ministero dell'istruzione per la correzione della prova scritta di matematica):

- conoscenze specifiche,
- abilità nell'applicare le procedure e i concetti acquisiti,
- abilità logiche ed organizzative,
- completezza della risoluzione,
- correttezza della risoluzione e dell'esposizione.

UNITA' DIDATTICA

CAMPO ELETTROSTATICO

Prerequisiti

- Operazioni sui vettori
- Concetto di Forza e accelerazione, in particolare forza e accelerazione di gravità
- Le tre leggi della dinamica
- Concetto di portata nella dinamica dei fluidi

Accertamento dei prerequisiti

Per la comprensione della seguente unità didattica, è indispensabile la conoscenza dei prerequisiti sopra elencati, il cui accertamento avverrà mediante **semplici test a risposta multipla e al dialogo con gli studenti**. Se necessario, si provvederà quindi, al recupero dei prerequisiti mancanti. **Si cercherà, in ogni caso, di richiamare concetti e proprietà ogni volta che questi verranno utilizzati.**

Obiettivi specifici

Conoscenze

- Conoscere il problema delle forze come azione a distanza
- Conoscere la definizione di campo elettrostatico
- Conoscere la rappresentazione grafica di diverse distribuzioni di carica
- Conoscere il campo elettrico di una carica puntiforme
- Conoscere la rappresentazione del campo elettrostatico
- Conoscere il principio di sovrapposizione
- Conoscere la definizione di flusso del campo elettrico
- Conoscere il teorema di Gauss e le sue applicazioni
- Conoscere il concetto di lavoro del campo elettrico, di energia potenziale, di circuitazione del campo elettrico, di potenziale elettrico, di differenza di potenziale
- Conoscere la conservazione dell'energia del campo elettrico

Abilità

- Saper rappresentare graficamente le linee di forza di un campo elettrico

- Saper calcolare l'intensità del campo elettrico di diverse distribuzioni di carica
- Saper dare la definizione di flusso del campo elettrico
- Saper enunciare correttamente il teorema di Gauss con rispettiva dimostrazione
- Saper applicare il teorema di Gauss a casi particolari
- Saper applicare il concetto di lavoro del campo elettrico, di energia potenziale, di circuitazione del campo elettrico, di potenziale elettrico, di differenza di potenziale e di conservazione dell'energia del campo elettrico
- Saper applicare il concetto di lavori di carica del campo elettrico e di energia del campo elettrico
- Saper svolgere individualmente facili esperimenti di laboratorio
- Saper svolgere esercizi numerici sugli argomenti trattati

Contenuti

- Corpi elettrizzati e loro interazioni
- Conduttori ed isolanti
- L'induzione elettrostatica
- La polarizzazione dei dielettrici
- La legge di Coulomb
- L'interazione elettrica a confronto con l'interazione gravitazione
- Introduzione al campo elettrostatico
- L'azione a distanza
- Campo elettrico di una carica puntiforme
- Rappresentazione del campo
- Campo elettrico generato da più cariche puntiformi
- Flusso del campo e Teorema di Gauss
- Applicazioni del Teorema di Gauss
- Energia potenziale elettrica
- Potenziale elettrico e differenza di potenziale

Sviluppo dei contenuti

La maggior parte dei fenomeni che osserviamo nella vita di tutti i giorni sono spiegabili in termini di due forze soltanto: la forza gravitazionale e la forza elettromagnetica. Ora apprenderemo i concetti fondamentali dell'elettrostatica e delle prove sperimentali che rivelano l'esistenza della carica elettrica sui corpi.

Osservazione:

I fenomeni elettrici non sono per il ragazzo oggetti misteriosi, a cominciare dal fulmine e dal primo esperimento di elettrostatica che, forse, da bambino ha fatto, cioè l'elettrizzazione per strofinio degli oggetti.

Elettrizzazione per strofinio:

L'elettricità è un fenomeno che possiamo spesso osservare: può capitare ad esempio che in una giornata secca pettinandoci i capelli asciutti oppure sfilandoci un maglione di lana indossato con una maglietta in tessuto sintetico avvertiamo un leggero crepitio; oppure può capitare di sentire una leggera scossa quando scendiamo dall'auto e tocchiamo con una mano la maniglia esterna dell'automobile. Questi piccoli esempi quotidiani sono una conseguenza dell'elettrizzazione che si produce nei corpi durante uno sfregamento; nei nostri casi particolari si tratta dello sfregamento tra i capelli e il pettine, tra il maglione di lana e la maglietta sintetica, tra l'aria e la carrozzeria dell'automobile. Inoltre, tutti i corpi elettrizzati hanno la capacità di attirare a sé corpi leggeri, come ad esempio un pezzo di carta, oppure un po' di paglia.

Questo fenomeno sono sempre esistiti e fin dall'antichità si è cercato di osservarli e di dare loro una spiegazione. I Greci, più di duemila anni fa, avevano scoperto che oggetti di ambra, (una resina fossile prodotta da alcuni alberi e induritasi nel tempo) strofinati con un panno di lana, acquistavano la proprietà di attirare oggetti leggeri come la paglia sminuzzata, piccoli semi, ecc., che si trovavano nelle loro immediate vicinanze. I Greci chiamavano *elektron* l'ambra e il termine elettricità, che usiamo per descrivere l'insieme dei fenomeni elettrici, deriva proprio dal nome greco di ambra.

Anche altre sostanze (per esempio, il vetro, la plastica, la ceramica, l'ebanite) hanno la stessa proprietà dell'ambra. Tutti questi materiali acquistano, per strofinio, la capacità di attirare piccoli oggetti. In tale condizione, diciamo che il materiale è stato elettrizzato.

Possiamo perciò ripetere l'esperimento dei Greci, usando oggetti di plastica e di vetro: strofiniamo il cappuccio di una penna a sfera, con un panno di lana, e l'avviciniamo ad un mucchietto di pezzi di carta. Osserveremo che i pezzettini sono attratti dall'oggetto di plastica. Ripetendo l'esperimento con una bacchetta di vetro noteremo lo stesso effetto.

Tali evidenze sperimentali ci fanno supporre che i materiali abbiano una speciale proprietà chiamata **carica elettrica**.

Osservazione 1:

E' importante far notare agli studenti che il termine **carica** è stato introdotto come nome per la proprietà acquistata dagli oggetti interagenti. La carica è un concetto astratto e non una sostanza e che esso è stato introdotto come **nome di una proprietà** che si deduce dalle interazioni osservate e che noi non sapremo mai che cosa *sia* la carica né come *operi*.

Osservazione 2:

Nel fare l'osservazione dell'attrazione di pezzetti di carta da parte di una bacchetta di plastica (o di vetro, o di gomma..) **dobbiamo condurre gli studenti a pensare alla gravità, riconoscendo che:**

L'interazione che stiamo studiando è diversa dall'interazione gravitazionale in quanto:

- 1) la gravità non ha niente a che vedere con lo strofinamento di oggetti;
- 2) essa persiste invariata, indipendentemente dagli effetti dello strofinamento;
- 3) l'interazione elettrica è enormemente più forte di quella gravitazionale; infatti i pezzettini di carta acquistano un'accelerazione verso l'alto nonostante siano attratti verso il basso dalla terra.

Tutte queste differenze sono sufficienti per giustificare un nuovo nome per l'interazione e può essere introdotto il termine *interazione elettrica*.

Lo strofinio ha determinato la formazione di cariche elettriche sulla plastica e sulla bacchetta di vetro. Ma cosa significa tutto questo? L'immagine mentale che siamo in grado di proporre è la seguente:

Inizialmente la plastica e il panno erano neutri, cioè con carica zero.

Poi, lo strofinio ha tolto qualcosa da un oggetto e lo ha ceduto all'altro oggetto. In altre parole, gli atomi che compongono sia la plastica sia il panno, devono avere alcune parti positive e altre negative. **Prima dello strofinio, c'era perfetto equilibrio fra le parti.**

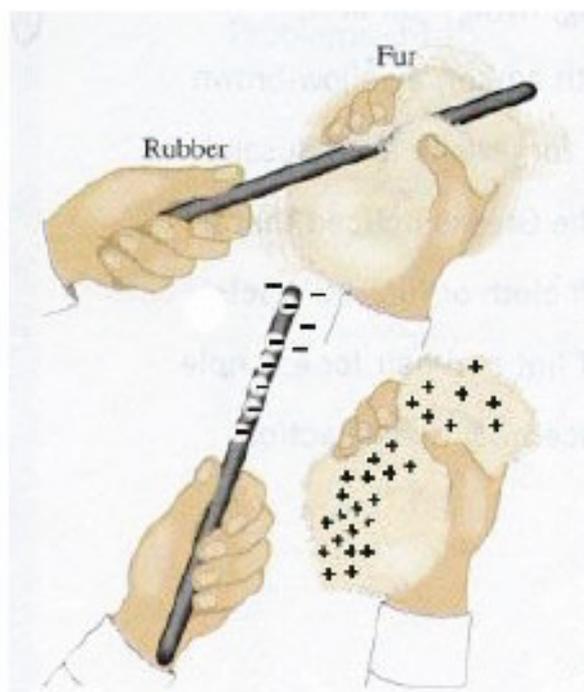


Figura 1

Tutto ciò ci suggerisce che esistono almeno due tipi di carica (o due stati di carica).

Osservazione:

Ora vogliamo fare due cose:

1. Far capire al studente che due bacchette di vetro o di plastica, strofinate con un panno di lana, sempre si respingono a vicenda, e allo stesso modo, che oggetti identici caricati in modo identico per strofinamento con lo stesso materiale, sempre si respingono a vicenda. Tutto ciò dà una prima parte di definizione operativa di *cariche simili*.
2. Far capire al studente che tutti i corpi elettrizzati che sono respinti dalla bacchetta di plastica sono attratti da quella di vetro, e viceversa, che tutti quelli che sono respinti dal vetro sono attratti dalla plastica strofinata, cioè **non si è mai verificato che un oggetto carico attragga o respinga nello stesso tempo una bacchetta di plastica e di vetro**; cosicché arriviamo a stabilire che vi siano **solo due stati di carica** e accettiamo l'asserzione solo perché non è mai stata osservata una violazione. Inoltre essendo limitati a due stati di carica elettrica si possono introdurre logicamente i termini positivo e negativo.

Consideriamo perciò due bacchette di vetro (o allo stesso modo di plastica) e sospendiamo una per il suo centro ad un sottile filo di nylon. Strofiniamo poi con un panno di lana un'estremità della bacchetta sospesa e l'estremità libera della bacchetta che teniamo in mano. Osserviamo che (fig. 2):

- (1) se le due bacchette sono entrambe di vetro o entrambe di plastica, gli estremi elettrizzati si respingono, cioè fra di esse agisce una forza repulsiva (e questo vale per due bacchette qualsiasi, purché dello stesso materiale);
- (2) se una bacchetta è di vetro e l'altra è di plastica, gli estremi elettrizzati si attraggono, cioè fra di esse agisce una forza attrattiva;
- (3) tutti i corpi elettrizzati che sono respinti dalla bacchetta di plastica sono attratti da quella di vetro e, viceversa, tutti quelli che sono respinti dal vetro sono attratti dalla plastica strofinata; non esistono altri comportamenti.

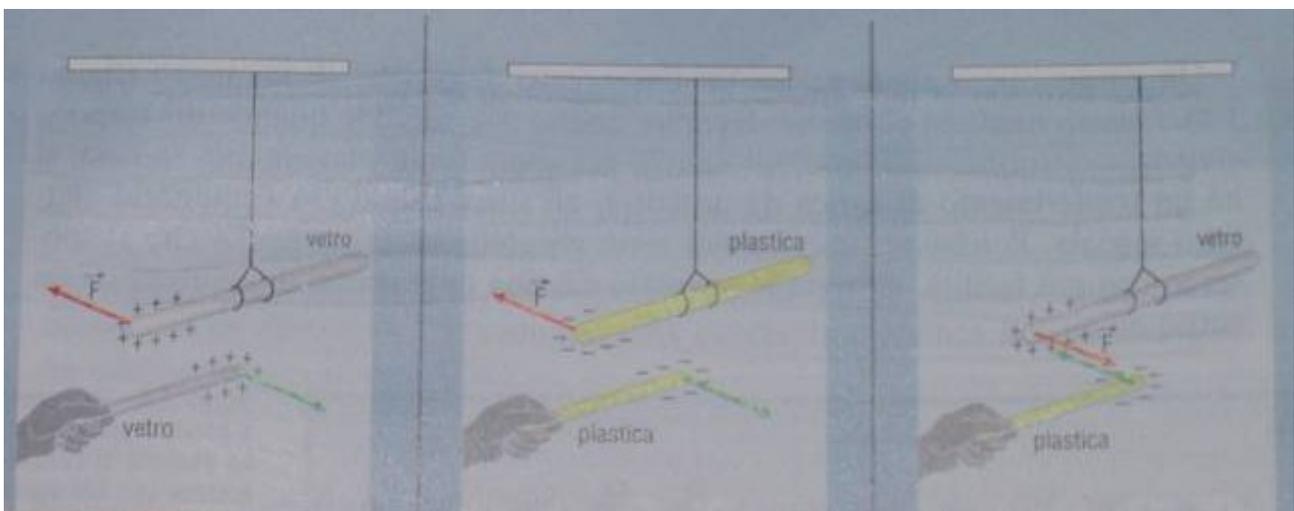


Figura 2

L'esperimento descritto dimostra che esistono due tipi diversi di elettricità: quella acquistata dal vetro strofinato e da tutti i corpi che si comportano come il vetro e quella acquistata dalla plastica e da tutti quei corpi che si comportano come la plastica. Secondo una consuetudine che risale a **Benjamin Franklin** (1706-1790), diciamo che i primi possiedono **carica elettrica positiva** e i secondi **carica elettrica negativa**. Accade sempre che due cariche elettriche dello stesso segno, siano esse positive o negative si respingono, mentre due cariche elettriche di segno opposto si attraggono. Esistono dunque due tipi diversi di interazione elettrica, che si esplicano con una forza repulsiva e una attrattiva; queste due distinte interazioni sono legate all'esistenza di due tipi diversi di carica elettrica. Il fatto fisicamente importante è proprio questo, e aver chiamato le due cariche "positiva" e "negativa" è solo una convenzione, come è una convenzione considerare positiva la carica acquistata dal vetro elettrizzato e negativa quella acquistata dalla plastica elettrizzata; si sarebbe potuta seguire la convenzione opposta.

La teoria dell'Elettricità e il Principio di conservazione della carica elettrica:

Tutti gli oggetti, grandi o piccolissimi sono costituiti da una serie di cariche positive e negative. La carica complessiva di un oggetto può essere positiva, negativa oppure nulla. L'oggetto ha carica elettrica complessiva uguale a zero quando le cariche positive sono bilanciate da altrettante cariche negative. Gli oggetti che ritroviamo nella nostra vita quotidiana hanno, in genere, una carica complessiva uguale a zero, cioè sono elettricamente neutri. L'idea moderna di elettricità si basa sulla teoria elettronica della materia, secondo la quale i materiali, a livello microscopico, sono formati da molecole e queste a loro volta sono formate da atomi. Insieme con i neutroni (privi di carica elettrica), i protoni (che hanno carica positiva) formano i nuclei atomici; gli elettroni (che hanno carica negativa) sono in movimento intorno al nucleo e completano la struttura di ciascun atomo. Un atomo ha un uguale numero di protoni positivi e di elettroni negativi (quindi un uguale numero di carica positiva e di carica negativa). Possiamo quindi affermare che l'atomo è neutro.

Qualsiasi fenomeno di elettrizzazione va interpretato come un'alterazione dell'equilibrio fra il numero delle cariche positive e quello delle cariche negative.

Più precisamente, l'elettrizzazione è una conseguenza dello spostamento da un corpo ad un altro di un certo numero di elettroni. Quando si elettrizza una bacchetta di vetro strofinandola con un panno di seta, alcuni elettroni vengono strappati al vetro dalla seta. Sul vetro rimane un eccesso di carica positiva non neutralizzata, mentre sulla seta si forma un uguale eccesso di carica negativa. Analogamente, quando si elettrizza per strofinio una bacchetta di plastica con un panno di lana, un certo numero di elettroni vengono strappati al panno dalla plastica e la quantità di carica (negativa) acquistata dalla bacchetta è uguale ed opposta in segno alla quantità di carica (positiva) prodotta dal panno.

La carica elettrica positiva e la carica elettrica negativa, possono essere trattate come grandezze algebriche. In tal caso, durante i processi di elettrizzazione che abbiamo descritto, il cambiamento totale della quantità di carica risulta nullo.

Questo è un esempio di un principio di conservazione di carattere generale, enunciato da Franklin nel 1750:

Principio di conservazione della carica elettrica

La somma algebrica delle cariche elettriche di un sistema chiuso si mantiene costante nel tempo, qualunque siano i fenomeni che in esso hanno luogo.

Se la carica di un certo sistema subisce una variazione, deve esserci da qualche altra parte un altro sistema la cui carica subisce una variazione opposta, in modo che la variazione totale sia nulla e di conseguenza la carica totale si mantenga costante. Perciò il principio di conservazione della carica elettrica vieta il verificarsi di qualsiasi fenomeno che comporti una variazione della carica totale. Finora non è mai stata osservata alcuna violazione di questo principio, né a livello macroscopico né microscopico.

CONDUTTORI ED ISOLANTI

Se noi classifichiamo i diversi materiali dal punto di vista del comportamento elettrico, dobbiamo dividerli in due classi: **conduttori** o **isolanti**.

Per capire al meglio le loro diverse proprietà possiamo organizzare un'attività di laboratorio:

Prendiamo un pendolino elettrico, formato da una pallina di materiale leggero (come ad esempio midollo di sambuco) rivestita con un foglio di stagnola e sospesa ad un filo di seta. Prendiamo una bacchetta metallica e poniamola a contatto con la pallina del pendolino elettrico. Portando a contatto della bacchetta metallica un secondo corpo metallico elettrizzato, si può osservare che la pallina del pendolino viene respinta.

Durante il contatto, la carica elettrica del corpo elettrizzato è in parte trasmessa alla bacchetta metallica e si propaga attraverso essa fino alla pallina del pendolino. Questa viene poi respinta dalla forza repulsiva esercitata dalla bacchetta. Se noi ripetiamo l'esperimento con una bacchetta di plastica, la pallina del pendolino rimane ferma.

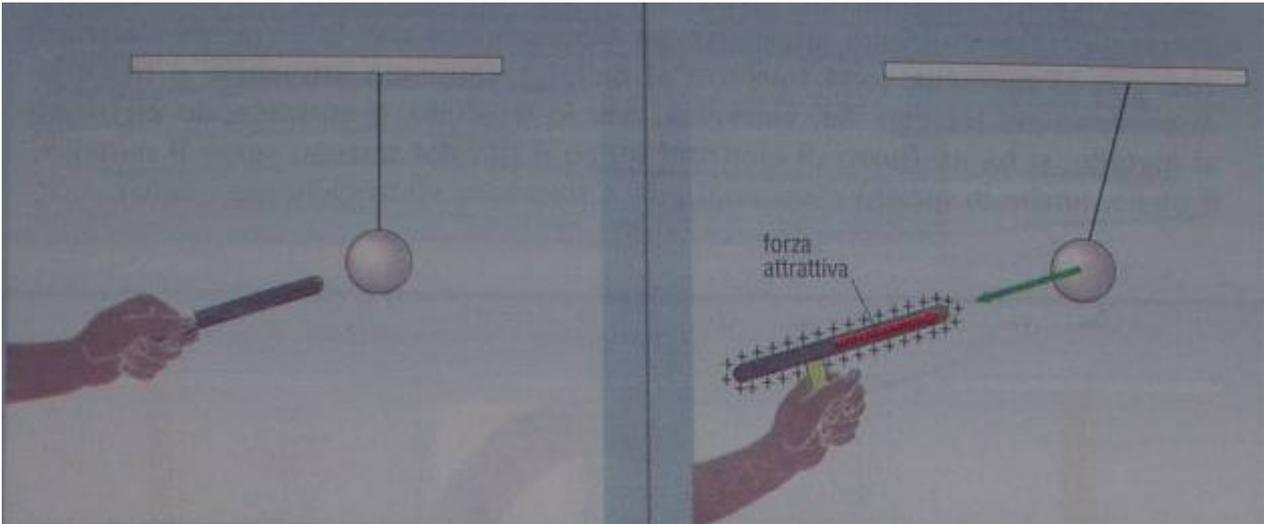


Figura 3

I metalli e la plastica hanno quindi un comportamento diverso. Un eccesso di carica elettrica generato in un punto di un corpo metallico si propaga su tutto il corpo, mentre nella plastica l'elettrizzazione rimane localizzata nel punto in cui è prodotta. Tutti i corpi che si comportano come i metalli sono detti **conduttori** mentre quelli che si comportano come la plastica (o il vetro, ecc...) nei quali l'elettrizzazione rimane localizzata nel punto in cui essa è prodotta sono chiamati **isolanti o dielettrici**. Si sottolinea che il diverso comportamento degli isolanti e dei conduttori si interpreta dal punto di vista microscopico con il fatto che negli isolanti gli elettroni sono molto legati ai nuclei degli atomi e difficilmente se ne allontanano, mentre nei conduttori alcuni di essi hanno una certa libertà di movimento, nel senso che, soggetti ad una forza elettrica, essi si spostano liberamente all'interno della struttura cristallina del metallo. Questi elettroni sono detti *elettroni di conduzione*.

In realtà **questa distinzione non è rigorosa**, nel senso che esistono sostanze più o meno conduttrici, come esistono corpi più o meno isolanti. Esistono corpi, cioè che presentano proprietà intermedie. Essi sono detti **semiconduttori**. Questi posseggono cariche mobili solo in certe condizioni di composizione e di temperatura, come il **germanio o il silicio** dei circuiti elettronici.

Osservazione:

Quindi anche per i termini come conduttore e isolante bisogna dare una definizione operativa esplicita legata al concetto di mobilità e trasferibilità di carica.

L'elettrizzazione per contatto:

Abbiamo già visto che si può elettrizzare un corpo strofinandolo. Ma se si tratta di un conduttore, lo si può elettrizzare mettendolo semplicemente a contatto con un corpo carico e in questo caso si parla di *elettrizzazione per contatto*.

Esempio:

Teniamo sospesa una bacchetta di metallo elettricamente neutra mediante un supporto rigido isolante. Poi tocchiamola con un'altra bacchetta di metallo, che

impugniamo attraverso un manico isolante e che abbiamo precedentemente elettrizzata per strofinio. Si osserva che anche la prima bacchetta si elettrizza: la carica elettrica posseduta inizialmente dalla seconda si è ripartita tra le due bacchette conduttrici (vedi fig. 4).

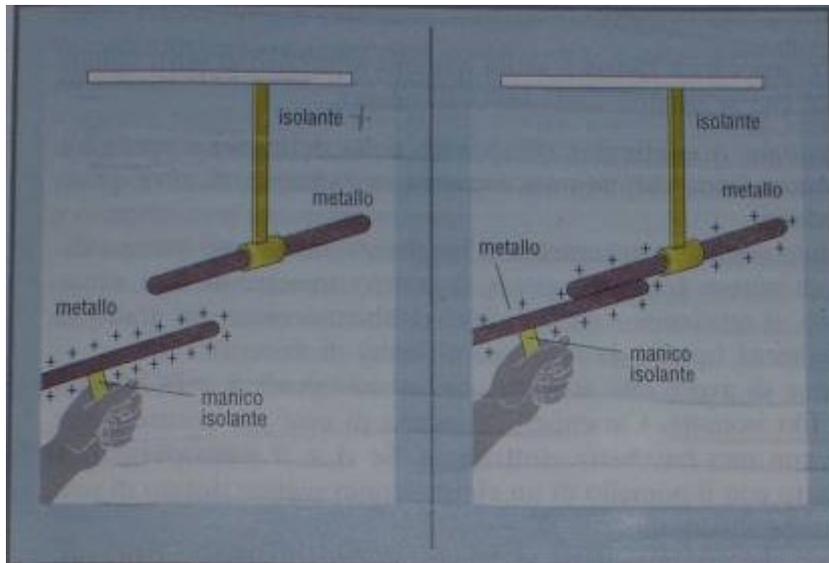


Figura 4

Si può riconoscere se un corpo è elettrizzato, mettendolo a contatto con un **elettroscopio a foglie**. (fig. 5) Si tratta di uno strumento costituito da un'asta metallica verticale che porta alla sua estremità inferiore due sottilissime foglioline metalliche, normalmente di alluminio. La parte superiore dell'asta termina con una piccola sfera metallica, mentre la parte inferiore e le foglioline sono racchiuse per protezione in un recipiente di vetro, che serve anche da sostegno. Se il conduttore, formato dall'asta metallica e dalle due foglie, non è carico di elettricità, queste ultime, sotto l'azione del loro peso, si dispongono verticalmente, l'una accanto all'altra. Ma se si tocca la sferetta superiore con un corpo dotato di una carica elettrica (ad esempio positiva come in fig. 5), una parte di questa si diffonde in tutto il conduttore. Le due foglie, essendo ora cariche di elettricità dello stesso segno, si respingono e si divaricano tanto più quanto maggiore è la loro carica elettrica.

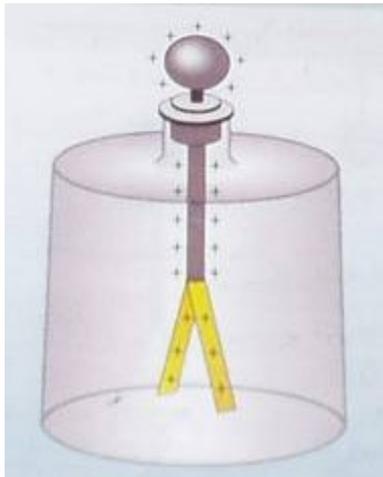


Figura 5

L'elettroscopio è importante anche perché permette di determinare se un corpo è un buon conduttore o un buon isolante. Carichiamo l'elettroscopio e mettiamo a contatto della sua sfera metallica uno dopo l'altro i diversi corpi (scarichi). Se dopo il contatto le foglie continuano a restare divaricate, il corpo in esame è un isolante. Se invece le foglie si chiudono rapidamente, si tratta di un conduttore.

Dopo aver visto che un corpo conduttore si può elettrizzare anche per contatto possiamo definire in maniera operativa la grandezza fisica **carica elettrica** stabilendo una serie di operazioni che consentono di misurarla. Per far ciò è necessario:

- (1) essere in grado di stabilire se due cariche elettriche sono uguali o se una è maggiore dell'altra;
- (2) saper suddividere una carica elettrica in un numero arbitrario di parti uguali;
- (3) fissare una carica che si assume come unità di misura.

- (1) Supponiamo dunque di avere **due sferette conduttrici uguali A, B** , che teniamo appese ad un filo isolante. Carichiamo ciascuna di esse per contatto, per esempio toccandole con una bacchetta elettrizzata. Se A, B , sono poste successivamente a contatto con il pomello di un **elettroscopio** scarico dotato di scala graduata, le foglioline divergono. Siano a, b , i numeri che rappresentano le deviazioni delle foglioline dalla posizione verticale, quando l'elettroscopio è posto a contatto rispettivamente con la sfera A e con la sfera B . **Si dice che la carica posseduta dalla sfera A è maggiore, uguale o minore della carica della sfera B a seconda che a sia maggiore, uguale o minore di b .**
- (2) **Per suddividere una carica elettrica in parti uguali, si mette a contatto una sfera conduttrice carica con una, o due, o tre, ... altre sfere identiche, ma scariche.** La carica si ripartisce per contatto tra il gruppo di sfere. Dopo averle

divise su ciascuna sfera si trova una carica uguale a metà, o a un terzo,, della carica iniziale.

(3) Ora ci manca solo di scegliere l'unità di misura della carica elettrica. Si potrebbe pensare di adottare come unità di misura la carica dell'elettrone ma è una quantità così piccola che risulterebbe molto scomoda per la maggior parte dei problemi fisici.

Il Coulomb

Nel Sistema Internazionale l'unità di misura della carica elettrica è il **coulomb** (dal nome dello scienziato francese Charles Augustin Coulomb (1736-1806)), che si indica con il simbolo **C**. Come si vedrà più avanti la quantità di carica elettrica è una **grandezza derivata**; infatti il coulomb si definisce mediante l'ampere che è l'unità di misura dell'intensità di corrente elettrica.

Osservazione:

Ancora una volta è bene sottolineare agli studenti che il termine carica è un nome introdotto per indicare la proprietà acquistata dagli oggetti interagenti; è una proprietà che sembra disperdersi, che può essere ripristinata per strofinamento, che è trasferibile da un oggetto all'altro per contatto ed è altamente mobile su oggetti metallici.

L'INDUZIONE ELETTROSTATICA

Il fenomeno dell'**induzione elettrostatica** si produce ogni volta che un conduttore è posto vicino ad un corpo carico. Come illustrato in figura 6, preso un qualsiasi conduttore **C** e posto in prossimità di un corpo elettrizzato **A**, esso assume una carica di segno opposto a quella di **A** nella parte più vicina e una carica dello stesso segno nella parte più lontana.

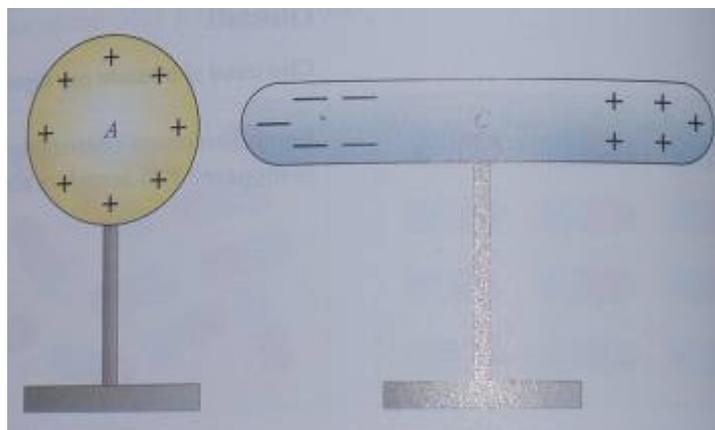


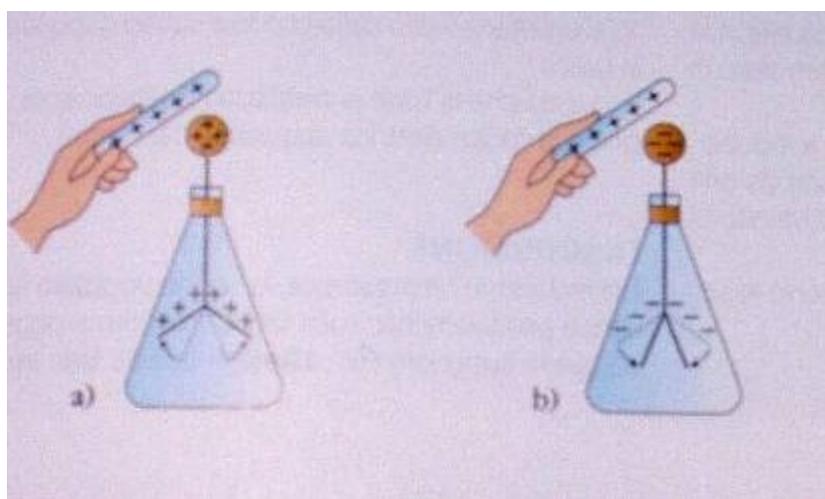
Figura 6

Con l'allontanamento del corpo carico *A* il conduttore *C* ritorna allo stato neutro. Perciò l'induzione elettrostatica è un fenomeno nel quale si ha una *ridistribuzione della carica all'interno di un conduttore*, causata dalla vicinanza di un corpo carico.

Osservazione:

Deve essere perciò chiaro agli studenti che l'intero sistema, oggetto più corpo in contatto, diventa polarizzato (per polarizzazione si intende uno spostamento di carica che è indotta nel corpo neutro) in presenza dell'oggetto carico che causa l'induzione.

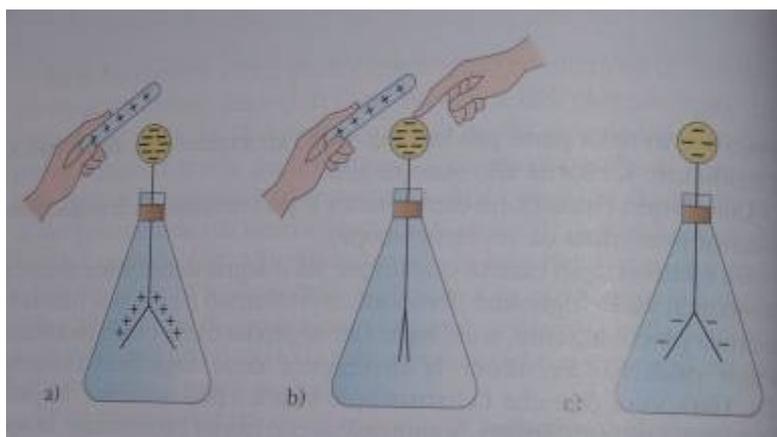
- Utilizzando l'induzione elettrostatica si può riconoscere il segno della carica elettrica posseduta da un elettroscopio. Infatti un elettroscopio carico, qualunque sia il segno della carica elettrica posseduta, ha le foglioline divaricate.



Avvicinando ad esso una bacchetta carica positivamente, sulle foglioline si produce una carica indotta di segno positivo. Se allora la divergenza delle foglioline aumenta, vuol dire che l'elettroscopio è carico positivamente. La carica positiva indotta, infatti sommandosi con quella preesistente, fa aumentare l'elettrizzazione delle foglioline e quindi la loro divergenza. Se invece la divergenza diminuisce, la carica posseduta dall'elettroscopio è negativa. La carica positiva indotta fa diminuire l'elettrizzazione complessiva delle foglioline, che quindi tendono a riavvicinarsi.

- Ricorrendo all'induzione elettrostatica è possibile anche caricare un conduttore, per esempio un elettroscopio.

Se ad esempio avviciniamo all'elettroscopio una bacchetta carica, per esempio positivamente, il pomello per induzione si carica negativamente, mentre sulle foglioline è indotta una carica positiva.



Se tocchiamo con un dito il pomello, la carica positiva delle foglioline si disperde a terra (perché il nostro corpo funge da collegamento elettrico con la terra) e allontanando il dito e subito dopo la bacchetta carica positivamente, l'elettroscopio rimane carico negativamente.

Osservazione:

Per aiutare gli studenti nell'apprendere il concetto di elettrizzazione, possiamo costruire una tabella in cui elenchiamo tutti i modi di elettrizzazione di un corpo:

Modalità di elettrizzazione di un corpo			
Metodo	Descrizione	Meccanismo	Materiali
Per Strofinio	Si ottiene strofinando tra loro due corpi	Gli elettroni che si trovano sulla superficie di uno dei due corpi sono "strappati" da esso (per questo risulterà carico positivamente) e portati sull'altro corpo che si caricherà negativamente.	Tutti i materiali si possono elettrizzare per strofinio. Sia isolanti che conduttori.
Per Contatto	Si ottiene mettendo a contatto un corpo elettricamente neutro con uno caricato in precedenza	Vi è un passaggio di cariche dal corpo carico al corpo elettricamente neutro che così si carica.	Tale modalità avviene in maniera molto efficace fra corpi conduttori.
	Si pone un corpo carico in prossimità di un conduttore scarico costruito in	Per il fenomeno dell'induzione elettrostatica le cariche libere di muoversi che si trovano nel corpo neutro si spostano. Quelle dello stesso	Conduttori di forma qualsiasi.

Per induzione	modo da suddividersi in due parti. Poi si allontanano tra loro le due parti del conduttore indotto.	segno della carica inducente si allontanano, quelle di segno opposto si avvicinano. In tal modo le due parti del conduttore indotto si elettrizzano con quantità di carica uguali ma di segno opposto.	
----------------------	---	--	--

Osservazione:

Quindi ancora una volta si sottolineerà agli studenti che contatto, carica per strofinamento e carica per induzione indicano mobilità di carica elettrica, a diversi gradi, in vari materiali.

LA POLARIZZAZIONE DEI DIELETTRICI

Un corpo elettrizzato riesce ad attrarre non soltanto un conduttore, ma anche un isolante neutro. Il fenomeno anche se a prima vista assomiglia all'induzione elettrostatica dei conduttori, ha una causa del tutto differente.

In condizioni normali un materiale isolante è costituito da atomi neutri e pertanto è globalmente scarico. Ciò non toglie che localmente ci possano essere degli sbilanciamenti fra le cariche elettriche positive dei nuclei atomici e negative degli elettroni. In assenza di forze elettriche esterne, in ciascun atomo gli elettroni sono disposti in maniera simmetrica rispetto al nucleo e ogni atomo produce al suo esterno una forza elettrica nulla. Se, invece, nelle vicinanze del dielettrico è presente un corpo carico, quest'ultimo esercita sugli elettroni e sul nucleo di ciascun atomo del dielettrico delle forze di verso opposto. Per effetto di queste forze gli atomi si deformano e assumono una polarizzazione elettrica, nel senso che, pur rimanendo complessivamente scarico, ad un'estremità presenta un eccesso di carica positiva e all'altra estremità un eccesso di carica negativa. Una tale distribuzione di cariche elettriche con queste caratteristiche è detta **dipolo elettrico**.

Quanto descritto rappresenta un fenomeno comune a tutti i dielettrici, qualunque sia la loro natura, chiamato **polarizzazione dei dielettrici**. Se avviciniamo ad un dielettrico un corpo elettrizzato, per esempio una bacchetta carica positivamente (come in fig. 7), nel dielettrico si stabilisce una distribuzione di cariche negative nell'estremità più vicina alla bacchetta mentre una distribuzione di cariche positive nell'estremità più lontana.

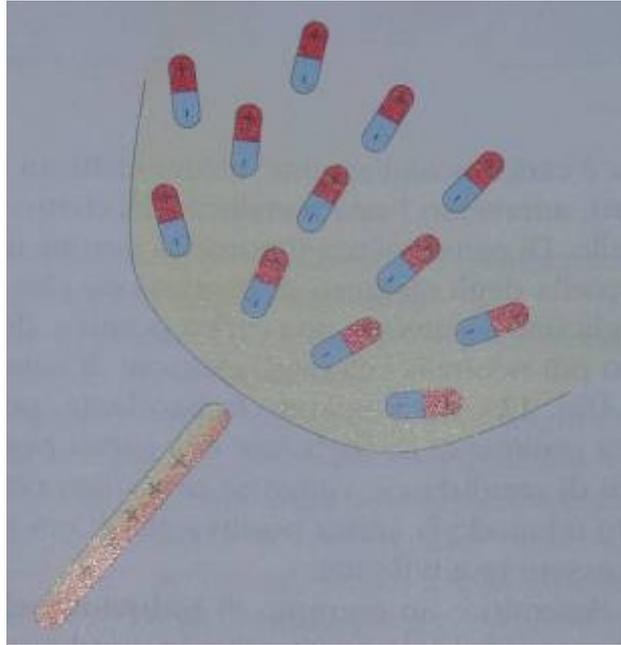


Figura 7

In altre parole, le cariche negative dei dipoli sono più vicine alla bacchetta, per cui la forza con la quale esse sono attratte supera in intensità la forza con cui invece, sono respinte le cariche positive. Per questo motivo, la bacchetta esercita sull'isolante una forza risultante attrattiva.

Osservazione:

Perciò gli studenti devono aver chiaro che:

- Negli **isolanti**, poiché la carica è visualizzata non mobile, il modello appropriato è quello dell'**induzione dei dipoli elettrici**
- Nei **conduttori**, poiché la carica è visualizzata mobile, la polarizzazione può essere descritta in termini di **spostamento effettivo o separazione di carica**. In quest'ultimo caso è importante condurre alla consapevolezza che il modello rende conto dell'attrazione da parte di un corpo carico indipendentemente dal fatto che si immaginino mobili le cariche positive o negative o entrambe.

LA LEGGE DI COULOMB

Fu **Charles Augustin Coulomb** il primo, nel 1785, servendosi di una *bilancia a torsione*, a determinare sperimentalmente come le forze di attrazione o di repulsione che si esercitano tra due corpi elettricamente carichi dipendono dalla distanza fra i due corpi.

Cerchiamo ora di **descrivere brevemente la bilancia a torsione** che serve appunto per misurare la forza che agisce tra due sferette A e B conduttrici e cariche.

Nella bilancia a torsione, la sfera B è fissa e sorretta da un supporto isolante. La sfera A può ruotare, essendo attaccata all'estremità di un manubrio isolante mediante un filo di quarzo .

Quando le due sfere sono cariche, la forza che B esercita su A fa ruotare il manubrio di un angolo che può essere letto sulla scala. È proprio la misura di questo angolo che consente di determinare l'intensità della forza.

Grazie a questo strumento Coulomb vide che prendendo due sferette di carica determinata e ponendole a distanze r che stavano come 4 : 2 : 1, le forze erano nei rapporti 1: 4: 16, ossia erano in proporzione inversa al quadrato. Se noi indichiamo con F l'intensità della forza, si ha che

$$F \propto \frac{1}{r^2}.$$

Per trovare poi in che modo la forza di interazione elettrica fra due cariche poste a distanza r fissata varia con la quantità di carica elettrica, è necessario determinare un criterio in base al quale si possa stabilire quando un corpo ha una carica elettrica pari alla metà, a un terzo, a un quarto ecc.. rispetto alla carica di un altro corpo.

Per fare questo, Coulomb esaminò l'interazione fra sfere conduttrici cariche a separazione fissata al variare dello stato di carica, alterato in modo sistematico. La situazione iniziale era quella in cui le sfere cariche, poste a distanza fissata, sulla bilancia di torsione si respingevano l'una con l'altra. Egli pose a contatto una sfera identica non carica con una delle sfere interagenti e osservò che la forza tra le sfere cariche era metà di quanto era inizialmente. Portando poi una sfera non carica in contatto con la seconda delle sfere cariche, egli osservò che la forza di interazione era un quarto di quella iniziale. Dalla simmetria (cioè sfere identiche avrebbero dovuto avere una distribuzione di carica identica se la carica fosse stata una quantità sistematicamente misurabile) egli suppose che la quantità di carica su ciascuna sfera in interazione fosse successivamente ridotta della metà secondo la procedura illustrata sopra. Dal momento che la forza era ridotta della metà ad ogni passo, egli concluse che esisteva una proporzionalità diretta tra la forza osservabile e il prodotto delle due quantità di carica interagenti.

Indicando allora con q_1, q_2 le cariche interagenti, possiamo scrivere:

$$F \propto q_1 q_2$$

E sintetizzando le due precedenti relazioni di proporzionalità, otteniamo la seguente equazione:

$$F = k_0 \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1)$$

ove k_0 è una **costante di proporzionalità** il cui valore dipende dalle unità di misura usate per le varie grandezze interessate.

Questa equazione descrive correttamente la forza di interazione tra due oggetti carichi di dimensioni piccole rispetto alla loro distanza. Spesso per esprimere questa condizione si parla di **cariche puntiformi**.

Osservazione:

Si deve sottolineare agli studenti che se nell'esperienza di Coulomb si usano due corpi carichi di forma non sferica, la legge $\frac{1}{r^2}$ vale solo approssimativamente e l'approssimazione risulta essere tanto maggiore quanto più la distanza fra i due corpi è molto grande rispetto alle loro dimensioni.

Dunque l'equazione (1), nota come **legge di Coulomb**, fornisce l'intensità della forza che ciascuna carica puntiforme esercita sull'altra; tale forza agisce lungo la direzione della congiungente fra le due cariche. Concordemente con il terzo principio della dinamica, le due forze rappresentano un'azione e una reazione.

Abbiamo già introdotto in precedenza l'unità di misura della carica elettrica, il Coulomb, e abbiamo già detto che si assume come grandezza elettrica fondamentale l'intensità di corrente, misurata in ampere; perciò la quantità di carica elettrica è una grandezza derivata. Possiamo affermare che **1C** è la quantità di carica che attira o respinge (a seconda dei segni) la stessa quantità di carica, posta ad 1 m di distanza nel vuoto, con la forza di $8,988 \cdot 10^9 N$.

Nei fenomeni di elettrostatica abbiamo a che fare con cariche di diversi ordini di grandezza inferiori al coulomb. Per esempio, la carica di un elettrone è:

$$-e = -1,602 \cdot 10^{-19} C$$

Per cui per ottenere la carica di 1C sono necessari $6,242 \cdot 10^{18}$ elettroni.

Dopo queste premesse, possiamo finalmente enunciare la

Legge di Coulomb:

La forza d'interazione F (attrattiva o repulsiva) fra due cariche puntiformi q_1 , q_2 poste nel vuoto, è direttamente proporzionale al prodotto delle due quantità di carica e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza r . Ossia

$$F = k_0 \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

La legge di Coulomb indica anche se la forza che si esercita tra le due cariche è attrattiva o repulsiva. Essa sarà repulsiva se le due cariche hanno lo stesso segno, attrattiva se le cariche hanno segno opposto.

La costante di proporzionalità k_0 si determina misurando la forza che si esercita tra due cariche note poste ad una determinata distanza r nel vuoto. Infatti si ha che:

$$k_0 = F \frac{r^2}{q_1 q_2}$$

In particolare ricordando la definizione che abbiamo dato per l'unità di carica elettrica si ottiene che $k_0 = 8,988 \cdot 10^9 Nm^2 / C^2$.

Ora per semplificare alcune formule che incontreremo in seguito, conviene introdurre una nuova costante, detta **costante dielettrica del vuoto**, o **permittività** e indicata con ε_0 legata a k_0 dalla seguente relazione:

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.$$

Il valore numerico di ε_0 si ricava dalla precedente espressione ed è:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k_0} = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$$

Perciò possiamo scrivere la legge di Coulomb nella sua forma più usuale:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Osservazione:

Ancora una volta è importante sottolineare che la legge di Coulomb non è derivata matematicamente né provata fisicamente, ma è una legge sperimentale; accettare la legge e credere nella sua validità risiedono nel fatto che è stata provata su una vasta varietà di situazioni e applicazioni e non è mai stata violata.

Esempio: (Applicazione del principio di Sovrapposizione)

Consideriamo una carica puntiforme q_A posta in un punto A dello spazio e altre due cariche puntiformi q_B e q_C , rispettivamente nei punti B e C . Indicate con r_{BA} ed r_{CA} le distanze che separano il punto A rispettivamente dai punti B e C , calcolare la forza \vec{F} agente sulla carica q_A (fig. 10).

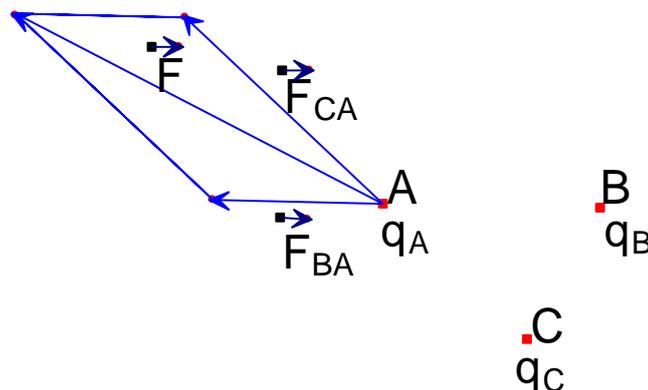


Figura 8

In questo problema abbiamo a che fare con un sistema di cariche interagenti. Quindi è importante applicare correttamente il principio di sovrapposizione:

la forza risultante su ciascuna carica è la somma vettoriale delle forze esercitate singolarmente dalle rimanenti cariche.

Perciò la forza \vec{F} agente su q_A posta in A, è la somma vettoriale delle forze \vec{F}_{BA} e \vec{F}_{CA} che le cariche q_B e q_C , poste rispettivamente nei punti B e C esercitano singolarmente su q_A . In particolare:

$$F_{BA} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_A q_B}{r_{BA}^2} \quad \text{e} \quad F_{CA} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_A q_C}{r_{CA}^2}$$

Da cui la forza risultante su q_A è la somma vettoriale delle due forze:

$$\vec{F} = \vec{F}_{BA} + \vec{F}_{CA} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_A (q_B + q_C)}{(r_{BA}^2 + r_{CA}^2)}$$

Forza fra due cariche in un dielettrico

Finora abbiamo considerato cariche elettriche interagenti nel vuoto, stabilendo la legge di Coulomb espressa dalla formula $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$. Ci chiediamo:

come si modifica la forza di interazione fra due cariche elettriche q_1 e q_2 poste a distanza r , se queste si trovano in un mezzo isolante?

Abbiamo visto in precedenza che un dielettrico in presenza di cariche elettriche subisce delle alterazioni cioè si polarizza. Supponiamo che le cariche q_1 e q_2 depositate in due punti distinti del dielettrico siano entrambe positive: nel dielettrico si formeranno, nelle immediate vicinanze di questi due punti, delle cariche di polarizzazione negative, che hanno l'effetto di neutralizzare in parte, le cariche depositate. Perciò a parità di distanza, due cariche q_1 e q_2 immerse in un isolante, come acqua, aria, ecc., risentono di una forza F minore della forza F_0 agente nel vuoto. Il rapporto F_0/F non dipende né dal valore delle cariche interagenti né dalla loro distanza, ma esprime una proprietà caratteristica del mezzo considerato, nel senso che cambia solo da un dielettrico all'altro. Questo rapporto si indica generalmente con ϵ_r e si chiama **costante dielettrica relativa** del mezzo. Posto perciò:

$$\epsilon_r = \frac{F_0}{F} \quad \text{si ha che} \quad F = \frac{F_0}{\epsilon_r}$$

ove con F_0 indichiamo la forza di Coulomb nel vuoto.

Pertanto la legge di Coulomb in un dielettrico si scrive nella forma:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

ove $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$, che ha le stesse dimensioni di ϵ_0 , prende il nome di **costante dielettrica assoluta**.

Mezzo	Costante dielettrica relativa ϵ_r
aria (1 atm)	1,00059
idrogeno (1 atm)	1,00026
alcool	25
acqua	≈ 80
petrolio	2,1
glicerina	42,5
bachelite	5,50
mica	8
ebanite	2
vetro	5-10
plexiglas	3,40
paraffina	2,1

Figura 9

Osservazione:

Si deve far osservare agli studenti che, a differenza della costante dielettrica ϵ_0 del vuoto, la costante dielettrica relativa ϵ_r , essendo il rapporto fra due grandezze omogenee (due forze), è un numero puro, cioè privo di dimensioni.

L'INTERAZIONE ELETTRICA A CONFRONTO CON L'INTERAZIONE GRAVITAZIONALE

Osservazione:

E' importante che gli studenti acquistino la consapevolezza delle differenze quando osservano i fenomeni elettrici a confronto con quelli gravitazionali.

La legge di Coulomb $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$ permette dunque di calcolare la forza che si esercita tra due corpi puntiformi, dotati di cariche elettriche q_1, q_2 e posti a distanza r l'uno dall'altro. Tale forza elettrica ha alcune proprietà simili a quelle della forza gravitazionale, che si esercita fra due corpi di massa m_1, m_2 posti a distanza r . La forza gravitazionale è data dalla legge di Newton o di gravitazione universale:

$$F = G \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Le formule precedenti sono molto simili, ma le forze corrispondenti presentano diversità sostanziali.

Le proprietà comuni alle due forze:

1) Sia la forza elettrica che la forza gravitazionale sono forze che agiscono tra corpi posti a distanza l'uno dall'altro. Sono forze cioè che interagiscono a distanza e sono entrambe grandezze vettoriali con una formulazione simile.

2) Entrambe decrescono in proporzione inversa al quadrato della distanza.

Le differenze fra le due forze:

Malgrado le due proprietà comuni le due forze sono profondamente diverse.

1) La forza gravitazionale interessa le masse dei corpi mentre la forza elettrica interessa le cariche elettriche positive e negative dei corpi.

2) Mentre la forza gravitazionale è solo attrattiva, quella elettrica può essere sia attrattiva che repulsiva a seconda del segno delle cariche. Questa caratteristica fa sì che in ambito elettrico vi siano comportamenti che non hanno un parallelo nei fenomeni gravitazionali.

3) Le due forze hanno anche origini del tutto diverse. La forza gravitazionale si esercita tra qualsiasi coppia di corpi, come conseguenza del fatto che hanno una massa, mentre la forza coulombiana agisce soltanto fra corpi dotati di carica elettrica e scompare se essi vengono privati di questa carica.

4) Le due forze hanno valori di intensità molto diversi. La forza elettrica è miliardi e miliardi di volte più possente della forza gravitazionale.

INTRODUZIONE AL CAMPO ELETTROSTATICO

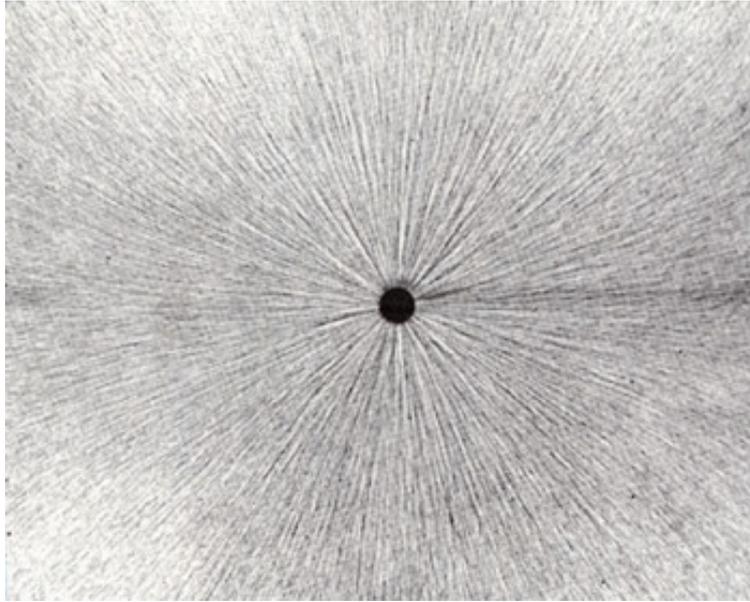
Introduciamo ora il concetto di campo elettrostatico.

Da un punto di vista didattico il concetto di campo elettrostatico (e quindi anche di campo elettrico) può generare difficoltà di comprensione perché richiede agli studenti una certa capacità di astrazione e di immaginazione.

Si propone quindi introdurre il campo elettrostatico con esperienze di laboratorio che hanno lo scopo di riprendere nuovamente e approfondire la nozione di campo vettoriale, e poi di visualizzare e concretizzare tale concetto teorico.

Esperimento 1: campo generato da una carica

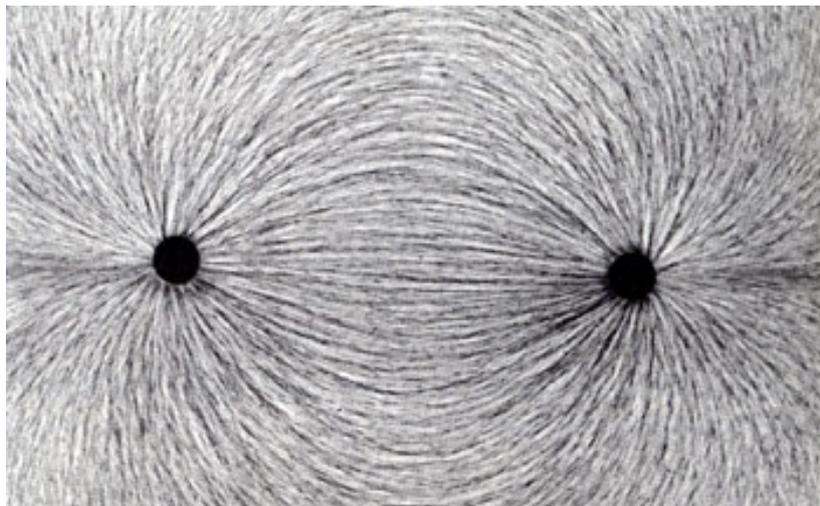
Si distribuiscono uniformemente in un recipiente pieno di olio dei granelli di semolino, oppure frammenti di fibre sintetiche, e si immerge nell'olio un corpo sferico carico. Le fibre subiscono l'azione delle forze elettriche, diventano dei dipoli elettrici che si distribuiscono in modo radiale rispetto al corpo carico.



Le fibre sono più dense in prossimità della carica e si diradano man mano che ci si allontana dalla carica

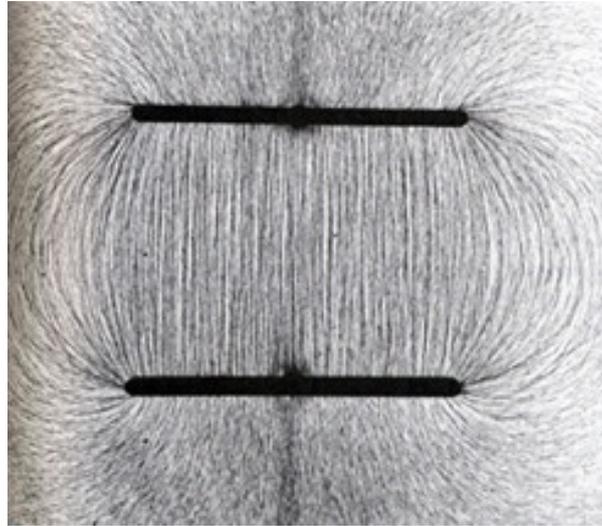
Esperimento 2: campo generato da due cariche

Se due cariche opposte sono messe vicine, i frammenti di fibre sintetiche si dispongono secondo una modalità simile a quella di seguito rappresentata:



Esperimento 3: campo generato da un condensatore

Disponiamo ora i frammenti di fibre sintetiche tra due armature con cariche opposte. La nuova disposizione delle fibre sarà la seguente:



Le fibre si dispongono secondo linee parallele nella regione di spazio compresa tra le due armature, mentre formano delle curve nella regione di spazio ad esse esterna.

L'AZIONE A DISTANZA

Dalle esperienze di laboratorio si comprende come una carica modifichi la regione di spazio circostante: ogni frammento di fibra, in qualunque punto del recipiente si trovi, è soggetto ad una forza generata dalla presenza del corpo carico.

A questo punto, prima di dare la definizione operativa del campo elettrico, cerchiamo di chiarire le eventuali perplessità degli studenti sull'interazione senza contatto tra due oggetti, anche facendo alcuni cenni di storia della fisica.

Nel 1700, la forza gravitazionale e quella elettrica erano giustificate da "un'azione a distanza" agente istantaneamente da un oggetto ad un altro. A tale concezione può però essere fatta un'obiezione: se ad esempio due cariche elettriche fossero a qualche anno luce di distanza l'annullamento di una carica richiederebbe l'annullamento istantaneo della forza agente sull'altra carica, ossia una trasmissione di azione a velocità infinita. Ma questo non sarebbe possibile essendo la velocità della luce un limite invalicabile.

Per superare questi ostacoli concettuali, dopo il 1800 cominciò a farsi strada il concetto di campo, che si affermò poi definitivamente con Maxwell: come una massa agisce su una seconda massa per mezzo del campo gravitazionale da esso generato, così una carica elettrica agisce su un'altra carica elettrica mediante un campo elettrico, inteso come una modificazione dello spazio prodotta dalla carica, indipendentemente dalla presenza della seconda. La teoria dei campi riesce a spiegare correttamente i fenomeni che si osservano quando alcune cariche elettriche sono in

movimento. Tuttavia, se ci si limitasse a considerare le interazioni fra cariche reciprocamente ferme, anche ragionare in termini di azioni a distanza non porterebbe ad alcuna contraddizione con i risultati sperimentali.

Il campo elettrico generato da cariche elettriche ferme è propriamente chiamato campo elettrostatico.

Costruiamo ora operativamente le proprietà di uno spazio utilizzando una carica q come sonda esploratrice.

Consideriamo una carica di prova q , positiva, e poniamola in un punto P dello spazio del quale se ne vogliono esplorare le proprietà. Se la carica subisce una forza \vec{F}_P allora in quel punto si definisce il vettore \vec{E}_P come il rapporto tra la forza elettrica che subisce la carica di prova q e la carica stessa:

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

La stessa operazione può essere ripetuta per ogni punto dello spazio in esame, e cioè ad ogni punto dello spazio è associato un vettore del **campo elettrico** \vec{E} .

Il campo elettrico è dunque un vettore avente come direzione e verso in un determinato punto la *direzione e il verso della forza* \vec{F} con cui esso agisce sulla carica esploratrice q .

In **analogia al campo gravitazionale** osserviamo che, come l'accelerazione di gravità \vec{g} è indipendente dalla massa m con la quale si esplora il campo gravitazionale, mentre dipende dalla massa della Terra e dalla distanza, così **il campo elettrico è indipendente dal valore della carica esploratrice q e varia solo al variare delle cariche che lo generano e della distanza.**

Infatti, in un fissato punto in cui si calcola il campo, l'intensità della forza F agente sulla carica di prova q è direttamente proporzionale a q per la legge di Coulomb, per cui il rapporto F/q , cioè l'intensità del campo elettrico, è indipendente da q .

L'equazione dimensionale del campo elettrico nel sistema SI è

$$[E] = [1 \text{ m t}^{-2} \text{ q}^{-1}]$$

e, nel sistema SI, l'unità di misura del campo elettrostatico è il **newton/coulomb (N/C)**.

Osservazione: Nella definizione del campo elettrico il segno = può essere sostituito con il segno più appropriato \equiv , così da ribadire che ciò che sta a sinistra

dell'equazione è solo un nome per definire una misura intrinseca del campo di forza e che dunque sia indipendente dalle proprietà numeriche dell'apparato di misura.

Gli studenti devono essere in grado di sintetizzare e descrivere esplicitamente le OPERAZIONI che sottostanno alla definizione di campo elettrico, vale a dire devono essere in grado di descrivere i passi che conducono a quanto denotato con **E**: una forza deve essere misurata in un PUNTO dello SPAZIO e una forza elettrica non può essere misurata senza porre una particella carica in tale punto. Tale carica deve, in principio, essere così piccola da non disturbare o ridistribuire le cariche che creano il campo che si considera.

CAMPO ELETTRICO DI UNA CARICA PUNTIFORME

L'esempio più semplice di campo elettrico è quello generato nel vuoto da una carica puntiforme Q . In base alla legge di Coulomb, la forza agente su una carica di prova q

risulta $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2}$, e dunque il modulo del campo elettrico è:

$$E = \frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2}}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

Se la carica Q , anziché nel vuoto, come abbiamo finora supposto, si trovasse immersa in un dielettrico di costante dielettrica ϵ_r , si avrebbe:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q}{r^2}$$

La direzione del campo elettrico è quella della retta individuata dal punto in cui si trova la carica Q che genera il campo e dal punto in cui si effettua il calcolo, mentre il verso è rivolto da Q a P , oppure in senso opposto, a seconda che la carica Q sia positiva o negativa.

RAPPRESENTAZIONE DEL CAMPO

Un campo elettrico può essere graficamente rappresentato con le frecce che indicano i vettori del campo elettrico in alcuni punti; tuttavia questo modo è piuttosto scomodo per l'impossibilità di disegnare il campo in ogni punto. Un metodo più efficace è quello di utilizzare le linee di campo.

Le linee di campo sono curve orientate tracciate sul campo vettoriale, le tangenti alle quali in un punto forniscono direzione e verso del vettore del campo in quel punto.

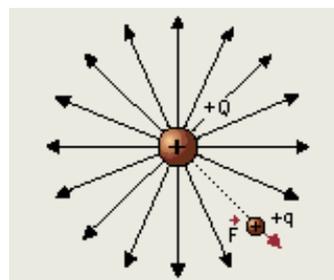
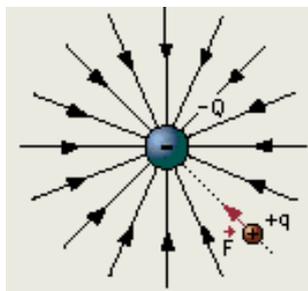
Nel nostro caso, le linee di forza del campo elettrico sono quelle linee la cui tangente in ogni punto ha la stessa direzione del campo in quel punto; alle linee di forza si attribuisce il verso del campo.

Più in generale, per tratteggiare le linee di campo possiamo seguire il criterio di Faraday: si rappresenta il campo tracciando, per ogni superficie unitaria, disposta *perpendicolarmente al campo*, un numero di linee di forza proporzionale alla grandezza del campo elettrico.

Abbiamo dunque delle regole pratiche per tracciare tali linee di forza, che si possono così riassumere:

- Il numero di linee che escono da una carica positiva o entrano in una carica negativa è direttamente proporzionale alla carica.
- Le linee di campo in ogni punto hanno la direzione del vettore campo elettrico in quel punto.
- Le linee di campo si originano da cariche positive o giungono dall'infinito.
- Le linee di campo terminano sulle cariche negative o proseguono all'infinito.

La densità delle linee (= numero di linee riferito all'unità di area della superficie perpendicolare alle linee) è direttamente proporzionale all'intensità del campo.



CAMPO ELETTRICO GENERATO DA PIÙ CARICHE PUNTIFORMI

Se in uno spazio sono definiti due campi vettoriali, il campo vettoriale risultante sarà tale che, in ogni punto, il suo vettore è la somma vettoriale dei due vettori definiti in partenza.

Tale *principio di sovrapposizione* vale dunque anche per i campi elettrici: il campo elettrico di una distribuzione di cariche è uguale alla somma vettoriale dei campi elettrici che le singole cariche genererebbero se agissero da sole.

Per n cariche puntiformi, se E_1, E_2, \dots, E_n sono i campi generati da ciascuna carica, il campo elettrico risultante è:

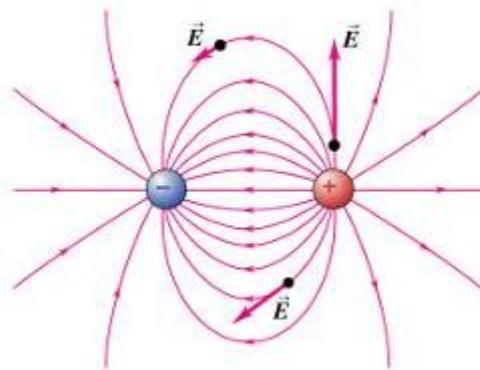
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \dots + \vec{E}_n$$

Nota didattica: Il concetto di sovrapposizione non è così immediato e può presentare delle difficoltà concettuali.

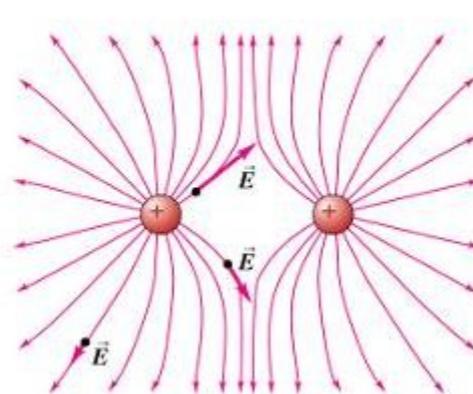
Gli studenti devono essere guidati a:

1. assorbire l'idea sottile *che l'inserzione di un insieme di cariche in una regione dove sono già presenti cariche mobili (specialmente quelle sui conduttori), in generale porta ad una distribuzione nuova di carica e che il principio di sovrapposizione si applica solo allo stato finale (ridistribuzione).*

2. vedere che cosa accade *quando la situazione che si considera implica la presenza di oggetti fisici piuttosto che distribuzioni di carica smaterializzati; può essere difficile credere di poter trattare il sistema (delle sfere conduttrici cariche, p.e.) come se gli oggetti stessi fossero assenti.*



ATTRAZIONE



REPULSIONE

FLUSSO DEL CAMPO ELETTRICO E TEOREMA DI GAUSS

Anche in questo caso il flusso del campo elettrico costituisce un caso particolare di flusso di un campo vettoriale.

Richiamo: flusso di un campo vettoriale

Si consideri una **superficie piana S** situata in una regione di spazio che è anche sede di un **campo vettoriale \vec{C}** ; allora si può immaginare che la superficie sia in ogni punto attraversata dai vettori del campo vettoriale.

Si consideri ora **\hat{n} il versore ortogonale alla superficie S** in un verso scelto a piacere. Formalmente si è definita una *superficie orientata* e si indica con $\vec{S} = S \hat{n}$. Una grandezza utile per quantificare l'“attraversamento del campo vettoriale attraverso la superficie S” è il seguente **prodotto scalare**:

$$\Phi(\vec{C}) = \vec{C} \cdot \vec{S}$$

denominato flusso.

Per visualizzare meglio questo concetto si immagini un fluido che scorra in un tubo e quindi attraversi una sezione S del tubo. In questo caso il flusso è:

$$\Phi(\vec{v}) = \vec{v} \cdot \vec{S}$$

e si chiama **portata**.

Osserviamo che se il vettore superficie e il vettore del campo vettoriale sono paralleli, il flusso è semplicemente CS. Se invece i due vettori non sono paralleli e formano un angolo θ , allora il flusso è $C \cdot S \cdot \cos \theta$.

La definizione precedente può essere naturalmente essere estesa anche al campo elettrostatico.

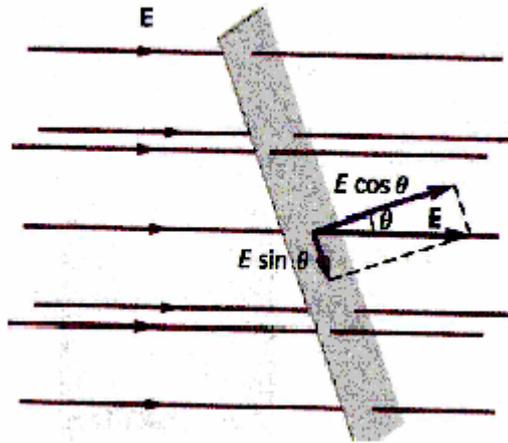
Definizione: Il **flusso di un campo elettrico uniforme \vec{E} attraverso una superficie \vec{S}** è dato dall'espressione:

$$\Phi(\vec{E}) = \vec{E} \cdot \vec{S}$$

Se ϑ è l'angolo che il vettore \vec{E} forma con il vettore \vec{S} , l'espressione precedente è equivalente a

$$\Phi = E \cdot S \cdot \cos \theta$$

L'unità di misura di nel sistema SI è il **N/C .m²**.



Se la **superficie** su cui si è calcolato il flusso è **chiusa**, il segno del flusso è il seguente:

- positivo per le linee del campo elettrico che lasciano il volume chiuso dalla superficie
- negativo per le linee del campo elettrico che entrano nel volume chiuso dalla superficie

Nel caso più generale in cui il vettore \vec{E} varia da punto a punto e la superficie S è curva, **il flusso è la somma dei flussi parziali attraverso gli elementi ΔS di superficie, sufficientemente piccoli da poterli supporre piani** e in modo che il vettore \vec{E} possa considerarsi **costante nei punti di ogni elemento di superficie**; così facendo i flussi parziali possono essere calcolati con la relazione precedentemente scritta.

Esempio: Caso di un campo elettrico generato da una carica puntiforme e di una superficie sferica avente il centro coincidente con la carica.

Come semplice esempio di calcolo di un flusso del campo elettrico, consideriamo una carica puntiforme ed una superficie sferica di raggio r centrata su questa carica. In ogni punto della superficie sferica il campo elettrico è costante ed è perpendicolare alla superficie stessa.

Inoltre, considerato un elemento ΔS_1 di superficie, il vettore campo elettrico è diretto secondo la perpendicolare a tale elemento di superficie, cioè come il raggio passante per lo stesso punto. **Orientando la perpendicolare a ΔS_1 positivamente verso l'esterno**, risulta $\vartheta = 0$ e quindi $\cos \vartheta = 1$. Il **flusso parziale attraverso la superficie ΔS_1** è dato da

$$\Delta\Phi_1 = E\Delta S_1$$

Analogamente per gli altri flussi parziali: $\Delta\Phi_2 = E\Delta S_2$, $\Delta\Phi_3 = E\Delta S_3, \dots$

Di conseguenza il flusso totale è:

$$\Delta\Phi = (E\Delta S_1 + E\Delta S_2 + \dots)$$

Poichè la somma degli elementi di superficie è la superficie totale della sfera, sostituendo l'espressione della superficie sferica e della grandezza del campo elettrico precedentemente vista, si ottiene:

$$\Phi = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \right) \cdot 4\pi r^2$$

Semplificando:

$$\Phi = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Il flusso del campo elettrico attraverso una superficie sferica contenente una carica Q , è direttamente proporzionale alla carica Q e non dipende dal raggio della sfera.

Si può anche dimostrare che *il flusso ha lo stesso valore per qualsiasi superficie chiusa contenente nel suo interno la carica Q .*

Tale risultato rappresenta un caso particolare del teorema più generale :

Teorema di Gauss: *Il flusso del campo elettrico, generato da un sistema di cariche, uscente da una superficie chiusa S , è*

$$\Phi = \frac{\sum Q_i}{\epsilon_0}$$

in cui la sommatoria delle cariche rappresenta la somma delle cariche contenute nell'interno della superficie S .

È importante tenere presente che **le cariche esterne alla superficie S non danno alcun contributo al flusso**, anche se contribuiscono come le cariche interne al campo elettrico.

Tracciando le linee di campo secondo la convenzione di Faraday e quindi le regole pratiche viste, **il flusso del campo elettrico attraverso una superficie è direttamente proporzionale al numero di linee di forza che attraversano la superficie considerata.**

Distinguiamo tra linee di campo **uscanti** e linee di campo **entranti**. Così, per esempio, riprendendo il caso del campo elettrico generato da una carica puntiforme, mentre le linee di campo attraverso la superficie chiusa S_1 sono tutte uscenti, le linee di campo attraverso la superficie chiusa S_2 sono in ugual misura entranti e uscenti.

Il flusso del campo elettrico attraverso S_1 è diverso da zero per il teorema di Gauss, mentre il flusso attraverso S_2 è zero.

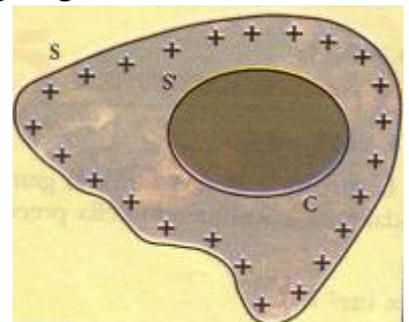
APPLICAZIONI DEL TEOREMA DI GAUSS

Il Teorema di Gauss è utile per il calcolo del campo elettrico generato da alcune particolari distribuzioni della carica come dimostrano i casi che seguono. Tuttavia, queste applicazioni possono essere piuttosto noiose e di difficile comprensione soprattutto se vengono affrontate mediante un approccio esclusivamente frontale quindi è necessario trattarle con un **approccio dialogico**, considerarle delle esercitazioni da svolgere collettivamente con i giusti input dati dall'insegnante.

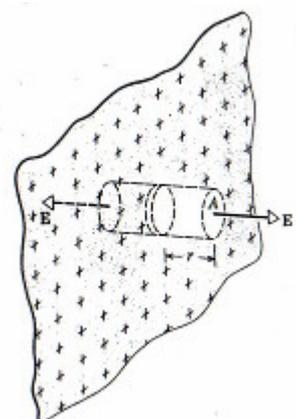
1) Distribuzione delle cariche sulla superficie di un conduttore in equilibrio elettrostatico

Il campo elettrico di un conduttore carico in equilibrio elettrostatico, è nullo all'interno del conduttore, perché se fosse diverso da zero, eserciterebbe una forza sugli elettroni di conduzione, i quali si muoverebbero e il conduttore non sarebbe più in equilibrio elettrostatico. In realtà, durante il processo di carica gli elettroni di conduzione si muovono, ma al termine della carica raggiungono uno stato di equilibrio disponendosi in modo tale che il campo elettrico sia nullo nell'interno del conduttore. Ne segue che anche il flusso del campo elettrico attraverso una qualsiasi superficie chiusa S' , pensata tracciata all'interno del conduttore, è nullo.

Poiché, d'altra parte, il flusso del campo elettrico attraverso una superficie chiusa è, per il teorema di Gauss, proporzionale alla somma delle cariche interne, deduciamo che nell'interno della superficie S' la somma delle cariche è nulla cioè il conduttore è elettricamente neutro. Le considerazioni fatte si possono estendere a qualsiasi superficie S' contenuta nell'interno del conduttore. Pertanto, **se il conduttore è stato caricato, le cariche sono distribuite sulla superficie esterna S da cui il conduttore è delimitato.**



2) Campo elettrico generato da una lastra carica infinitamente estesa



Si consideri una lastra sulla quale sia distribuita una quantità Q di carica; per il calcolo del campo elettrico in prossimità della superficie della lastra, consideriamo una superficie gaussiana di forma cilindrica avente come area di base A e altezza h , con le due basi parallele e da parti opposte rispetto alla lastra.

Il flusso del campo elettrico generato dalla lastra attraverso le basi della superficie cilindrica è: $\Phi = 2AE$ mentre il flusso attraverso la superficie laterale è nullo, in quanto il campo elettrico è parallelo alla superficie cilindrica. Per il teorema di Gauss,

si ha $\Phi = 2AE = \frac{Q}{\epsilon_0}$ da cui $E = \frac{Q}{2\epsilon_0 A}$; introducendo al densità superficiale di carica

della lastra $\sigma = \frac{Q}{A}$, il campo elettrico può essere espresso dalla relazione $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$.

Osservazione:

il valore del campo elettrico è costante, indipendente dal punto in cui viene calcolato; quindi diremo che **il campo elettrico di una lastra carica, è un campo uniforme d'intensità proporzionale alla densità superficiale di carica.**

3) Campo elettrico generato da una sfera carica uniformemente

Si consideri una carica Q uniformemente distribuita all'interno di uno spazio sferico di raggio R ; per il calcolo del campo elettrico esternamente alla sfera, consideriamo una superficie gaussiana anch'essa sferica, concentrica alla sfera data ed avente $r > R$.

Poiché si è supposto che la carica sia distribuita uniformemente all'interno della sfera, il vettore campo elettrico sarà diretto radialmente e quindi perpendicolare ad ogni punto della superficie gaussiana ($\theta = 0 \rightarrow \cos \theta = 1$). In queste condizioni il teorema di Gauss si scrive:

$$\Phi = E \sum \Delta A_i = 4\pi r^2 E = \frac{Q}{\epsilon_0} \text{ da cui } E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

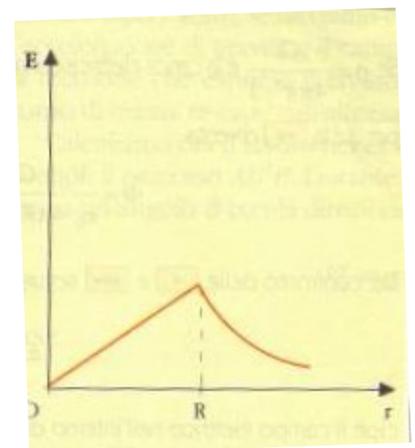
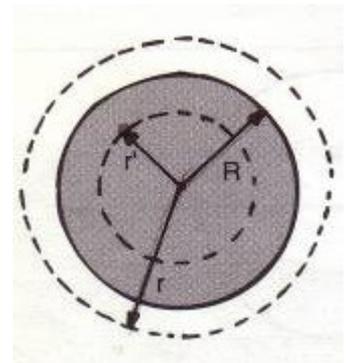
Per il calcolo del campo elettrico internamente alla sfera, si consideri nuovamente una superficie gaussiana sferica concentrica a quella data e avente $r' < R$.

Se $\rho = \frac{Q}{V}$ dove $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ è la densità volumetrica di carica che supponiamo costante, internamente alla gaussiana, sarà disposta una frazione q' della carica totale Q data da

$$q' = \rho V' = \rho \frac{4}{3}\pi r'^3 = \frac{Q}{\frac{4}{3}\pi R^3} \frac{4}{3}\pi r'^3 = \frac{Q r'^3}{R^3}.$$

Applicando ora il teorema di Gauss alla superficie di raggio r' si ottiene:

$$\Phi_E = 4\pi r'^2 E = \frac{q'}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0} \frac{r'^3}{R^3} \rightarrow E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q r'}{R^3}$$



Analizziamo le due soluzioni trovate e costruiamo il grafico cartesiano campo elettrico-raggio.

Si osserva che l'intensità del campo elettrico è raggiunge il valore massimo sulla superficie della sfera.

4) Campo elettrico di un filo carico infinitamente lungo

Applichiamo il teorema di Gauss ad una superficie cilindrica di altezza h e raggio r con l'asse coincidente col filo carico. In ogni punto della superficie laterale il campo elettrico è ortogonale alla superficie stessa e ha modulo costante E . Ne segue che il flusso attraverso la superficie laterale, se $\Delta S_1, \Delta S_2, \dots$ sono i vari elementi di superficie in cui essa può presentarsi decomposta, è:

$$\Phi = E \cdot \Delta S_1 + E \cdot \Delta S_2 + \dots = E(\Delta S_1 + \Delta S_2 + \dots)$$

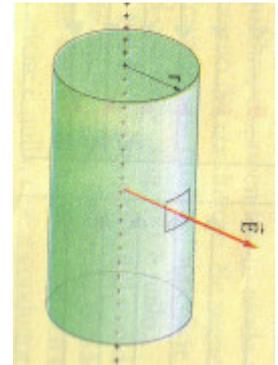
cioè

$$\Phi = E2\pi r h$$

Il flusso attraverso le basi del cilindro è nullo in quanto il campo è parallelo alle basi e quindi è ortogonale alla normale alle basi stesse; ne segue che il flusso del campo elettrico attraverso tutta la superficie del cilindro si riduce al flusso attraverso la superficie laterale. Osservando poi che la carica contenuta nell'interno della superficie cilindrica, se λ è la densità lineare di carica, è λh , applicando il teorema di Gauss, si ha: $E2\pi r h = \lambda h / \epsilon_0$

cioè

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}$$



Osservazione: perché il filo lo abbiamo considerato infinitamente lungo?

Se il filo non è infinitamente lungo non potremmo più utilizzare i motivi di simmetria che ci hanno permesso di affermare che il vettore E è in ogni punto ortogonale al filo e ha modulo dipendente solo dalla distanza dal filo. La relazione a cui siamo pervenuti non è pertanto più valida.

ENERGIA POTENZIALE ELETTRICA

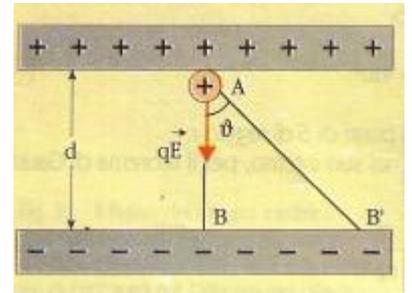
Se un corpo compie uno spostamento nel campo gravitazionale terrestre, la forza di gravità esegue un lavoro che dipende dalle posizioni iniziale e finale del corpo, ma non dal particolare cammino percorso. Questa proprietà ci permette di concludere che il campo gravitazionale è un campo conservativo e di introdurre l'energia potenziale gravitazionale. Per stabilire se il campo elettrico gode delle stesse proprietà, iniziamo con lo studio del lavoro elettrico.

LAVORO DEL CAMPO ELETTRICO

Consideriamo una carica di prova q positiva in un campo elettrico uniforme. Sotto l'azione della forza elettrica costante $q\vec{E}$, la carica si sposta dal punto A al punto B quindi la forza elettrica compie un lavoro L_{AB} , dato dal prodotto della forza per lo spostamento lungo la direzione del campo: $L_{AB} = F \cdot s$.

Poiché la forza elettrica è uguale al prodotto del campo per la carica cioè $F = q \cdot e$, si ha che il lavoro è:

$$L_{AB} = q \cdot E \cdot s$$



Osservazioni:

- ✓ se all'espressione scritta sopra facciamo corrispondere alla carica q la massa m e al modulo E del campo elettrico il modulo g dell'accelerazione di gravità, è formalmente identica a quella del lavoro compiuto dalla forza peso quando un corpo di massa m cade da un'altezza s (nell'approssimazione in cui, essendo s piccola rispetto al raggio terrestre, il campo gravitazionale può essere assunto costante). Così come si dimostra che il lavoro della forza peso è indipendente dal percorso descritto dal corpo, così si dimostra che il lavoro della forza elettrica che il campo esercita sulla carica q che si sposta dalla piastra positiva a quella negativa è indipendente dalla traiettoria seguita;
- ✓ il lavoro fatto dal campo è direttamente proporzionale alla carica q . Infatti, per spostare da A a B una carica $2q$ ci vuole un lavoro doppio, per spostare la carica $3q$ è necessario un lavoro il triplo e così via. Ne deriva che il rapporto fra il lavoro e la carica è costante:

$$\frac{L_{AB}}{q} = \frac{L_{AB}}{2q} = \frac{L_{AB}}{3q} = \text{costante} \quad \text{perciò il rapporto } \frac{L}{q} \text{ è indipendente da } q.$$

Il calcolo del lavoro si complica quando prendiamo in esame un campo elettrico non uniforme nello spazio, come quello generato da una carica puntiforme Q .

Se una carica di prova q si sposta da un punto A a distanza r_A da Q a un punto B a distanza r_B , posto sulla stessa linea di forza passante per A , la forza elettrica agente su q varia, in modulo, da

$$F_A = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r_A^2} \quad F_B = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r_B^2}.$$

Per trovare il lavoro, poiché la legge di Coulomb è formalmente analoga alla legge della gravitazione universale, possiamo seguire lo stesso procedimento applicato al campo gravitazionale terrestre, ponendo le cariche in luogo delle masse e la costante $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ in luogo della costante gravitazionale G . In questo modo otteniamo:

$L = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_A^2} - \frac{1}{r_B^2} \right)$ in cui le cariche elettriche devono essere assunte con il loro segno.

Se per esempio, Q e q hanno lo stesso segno il lavoro è positivo se $r_A < r_B$, mentre è negativo se $r_A > r_B$; infatti la forza elettrica è diretta come lo spostamento nel primo caso e in verso opposto allo spostamento nel secondo. L'ultima espressione scritta è valida anche se per spostarsi da A a B la carica di prova q segue un cammino diverso.

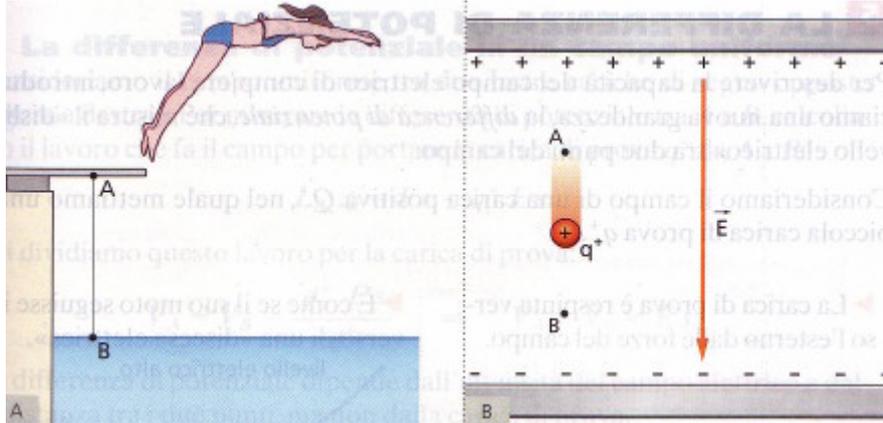
Abbiamo quindi visto che il campo elettrico uniforme e quello radiale di una carica puntiforme sono campi conservativi. Più in generale, poiché ogni distribuzione di carica è formata da un insieme di cariche elementari assimilabili a cariche puntiformi, ciascuna delle quali produce singolarmente un campo conservativo, grazie al principio di sovrapposizione possiamo affermare che il campo elettrico \vec{E} di una qualsiasi distribuzione di carica è un campo conservativo.

CALCOLO DELL'ENERGIA POTENZIALE ELETTRICA

Come accade per il caso gravitazionale anche per il campo elettrico si può definire un'energia potenziale elettrica.

Vediamo cosa accade nelle due situazioni riportate in figura: una persona sul trampolino, ha un'energia potenziale gravitazionale maggiore che nell'acqua. Questa energia si può trasformare in cinetica durante il tuffo.

Nel campo elettrico, la carica q quando è in A , ha un'energia potenziale elettrica maggiore che in B . Questa energia potenziale si può trasformare in cinetica.



Allora possiamo definire:

l'energia potenziale elettrica di una carica in un punto B, rispetto a un altro punto A, è uguale al lavoro compiuto contro le forze del campo elettrico per portare la carica da B ad A

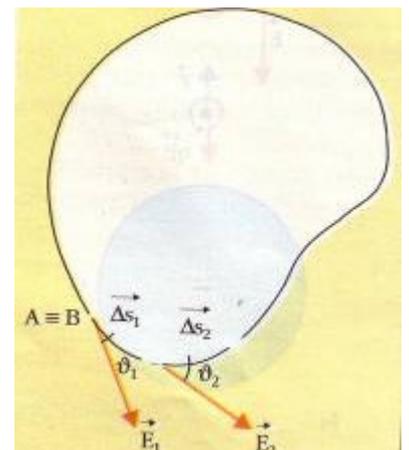
$$L = U_A - U_B \quad (1)$$

RIFLETTIAMO:

- ✓ **Quindi perché una lampadina si accende o gli elettrodomestici si riscaldano?**
È l'energia potenziale immagazzinata nel campo elettrico, cioè la capacità del campo elettrico di compiere lavoro. Questa energia potenziale elettrica si trasforma in energia luminosa e calore nelle lampadine, energia cinetica e calore nei motori elettrici.
- ✓ **La forza elettrica, come quella gravitazionale, è una forza conservativa** quindi all'aumento di energia cinetica corrisponde un'uguale diminuzione di energia potenziale elettrica
- ✓ Se consideriamo una carica q che si muove in un campo elettrico descrivendo una traiettoria chiusa, cioè la posizione iniziale A coincide con la posizione finale B, cosa succede al lavoro?
Poiché $U_A \equiv U_B$ ne consegue che $L = 0$ allora possiamo dire che **il lavoro compiuto dalla forza del campo elettrico agente su una carica di prova q che descrive una traiettoria chiusa è nullo.**

Come possiamo calcolare il lavoro della forza elettrica lungo una traiettoria chiusa nel caso di un campo elettrico generico e quindi variabile da punto a punto?

Il trucco consiste nel suddividere il percorso in tanti spostamenti sufficientemente piccoli in modo che in ciascuno di essi si possa ritenere il campo elettrico costante. Il lavoro sarà la somma dei lavori compiuti dalla forza elettrica in ciascuno degli spostamenti.



$$L = qE_1\Delta s_1 \cos\theta_1 + qE_2 \cos\theta_2 + \dots + qE_n\Delta s_n \cos\theta_n$$

Poiché il campo elettrico è conservativo e il lavoro è nullo si ha

$$E_1\Delta s_1 \cos\theta_1 + qE_2 \cos\theta_2 + \dots + qE_n\Delta s_n \cos\theta_n = 0 \rightarrow \sum E \cdot \Delta s \cdot \cos\theta = 0$$

L'espressione

$$\sum E \cdot \Delta s \cdot \cos\theta$$

si chiama **circuitazione del campo elettrico**, relativa alla traiettoria chiusa considerata.

Conclusioni: **la circuitazione del campo elettrico lungo qualsiasi cammino chiuso è nulla.**

Questo ci assicura che il campo elettrico è un campo vettoriale conservativo poiché sussiste la proprietà generale: **un campo vettoriale avente la circuitazione nulla è conservativo.**

CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA NEL CAMPO ELETTRICO

Consideriamo una particella i massa m e carica q in moto, in un campo elettrico.

Ricordiamo che il lavoro compiuto dalla risultante delle forze agenti su un punto materiale è uguale alla variazione di energia cinetica, possiamo esprimere il lavoro della forza elettrica del campo durante lo spostamento della particella da A a B, con la relazione: $L = E_{CB} - E_{CA}$ che confrontata con la (1) risulta $E_{CB} - E_{CA} = U_A - U_B$ da cui $E_{CB} + U_B = E_{CA} + U_A$ cioè **la somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale elettrica di una carica in moto in un campo elettrico si mantiene costante.**

In particolare risulta che $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r} = \text{costante}$ la quale esprime il **principio di conservazione dell'energia nel campo elettrico generato dalla carica puntiforme Q.**

POTENZIALE ELETTRICO E DIFFERENZA DI POTENZIALE

Per semplificare il calcolo dell'energia potenziale in un sistema di cariche che risulterebbe abbastanza complicato, definiamo una nuova grandezza scalare chiamata potenziale elettrico V in un punto P di un campo elettrico E , generato da una qualsiasi distribuzione di cariche in equilibrio, inteso come l'energia potenziale che una carica di prova avrebbe in quel punto.

In simboli, il potenziale elettrico in un punto A è : $V_A = \frac{U_A}{q}$

LA DIFFERENZA DI POTENZIALE

Poiché V risulta specificato, come l'energia potenziale U a meno di una costante additiva, la grandezza veramente significativa dal punto di vista fisico, è la **differenza di potenziale** fra due punti.

Consideriamo due punti qualsiasi A e B in un campo elettrico, indicando con V_A il potenziale in A e con V_B il potenziale in B ; abbiamo quindi

$$V_A - V_B = \frac{U_A - U_B}{q}.$$

Tenendo conto di quanto detto prima, e cioè che $L = U_A - U_B$ otteniamo:

Relazione fra potenziale elettrico e lavoro

La differenza di potenziale fra due punti A e B in un campo elettrico, è il rapporto fra il lavoro compiuto dalla forza del campo su una carica q quando questa si sposta da A a B e la carica q stessa:

$$V_A - V_B = \frac{L}{q}$$

la cui unità di misura nel SI è il **volt** (simbolo **V**) ed è definita dal rapporto $1V = \frac{1J}{1C}$

mentre l'equazione dimensionale di questa grandezza è $[V]=[I^2][m][t^{-2}][q^{-1}]$

Diremo quindi che tra due punti dello spazio, in presenza di un campo elettrico, esiste la differenza di potenziale (d.d.p.) di 1 volt se la forza elettrica del campo compie un lavoro di 1 joule per portare la carica di 1 coulomb da un punto all'altro.

In funzione del volt, possiamo definire una nuova unità di misura del lavoro, usata soprattutto nei problemi di fisica atomica, l'**elettronvolt** (simbolo **eV**): 1eV è in valore assoluto, il lavoro compiuto dalla forza del campo elettrico su un elettrone che si sposta da un punto A a un punto B fra i quali esista una d.d.p. di 1V. Indicando con $-e$ la carica negativa dell'elettrone, tale lavoro è espresso da:

$$L = -e(V_A - V_B) = e(V_B - V_A)$$

da cui si vede che il lavoro è positivo se è $V_A < V_B$, cioè se l'elettrone si sposta da un punto A a potenziale minore a un punto B a potenziale maggiore.

Ricordando ora l'equazione $L = qE_1\Delta s_1 + qE_2\Delta s_2 + \dots + qE_n\Delta s_n = \sum q\vec{E}\Delta s$, scriviamo ora il lavoro elettrico compiuto da una carica q che si sposta fra due punti A e B ; la sommatoria è calcolata lungo un cammino qualsiasi che congiunge A con B .

L'espressione $V_A - V_B = \frac{L}{q}$ può essere quindi scritta come segue

$$V_A - V_B = \frac{L}{q}.$$

Questa equazione mette in relazione il potenziale con il campo elettrico. Possiamo osservare che la d.d.p. fra i due punti A e B non dipende soltanto dalle proprietà del campo nei due punti considerati, cioè non basta conoscere il campo elettrico in A e in B; occorre conoscerlo invece, almeno in tutti i punti di una linea che congiunge A a B (è sufficiente una sola linea, perché il campo elettrico è conservativo).

Vogliamo ora applicare questa equazione al caso semplice del campo uniforme di tra due lastre cariche di segno opposto. Se E è il modulo del campo e s la distanza fra le due piastre, indicando con A e con B due punti posti rispettivamente sulla piastra positiva e su quella negativa, otteniamo $V_A - V_B = Es$.

Vogliamo ora prendere in esame il campo di una carica puntiforme. Tenendo conto che l'energia potenziale di una carica di prova q in un punto a distanza r dalla carica Q che genera il campo è espressa da $U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r}$ nell'ipotesi di attribuire valore nullo al potenziale infinito. Da quest'ultima si vede che il potenziale ha lo stesso valore in tutti i punti equidistanti dalla carica Q , cioè su tutte le superfici sferiche aventi centro nel punto in cui è localizzata la carica.

Tali superfici sono dette **superfici equipotenziali** poiché su ciascuna di esse tutti i punti sono caratterizzati dallo stesso valore del potenziale elettrico. In questo caso, le linee di forza sono perpendicolari in ogni punto alla superficie equipotenziale passante per quel punto. Questa proprietà è valida in generale.

Le superfici equipotenziali possono essere definite per qualsiasi campo di forza conservativo. Per esempio, nel caso del campo gravitazionale terrestre, in analogia con il campo elettrico di una carica puntiforme, sono superfici sferiche aventi il centro coincidente con il centro della Terra.

Osservazione:

- ✓ La differenza di potenziale dipende dall'intensità del campo elettrico e dalla distanza tra i due punti ma non dalla carica di prova;
- ✓ In generale le cariche positive scendono lungo una differenza di potenziale, cioè si spostano da dove il potenziale è più alto verso punti in cui è più basso; le cariche negative salgono lungo una differenza di potenziale, cioè si spostano da dove il potenziale è basso verso punti in cui è più alto.

Verifica Sommativa: 1 ora

1. Qual è l'espressione del campo elettrico generato da una carica puntiforme positiva Q ? Supponendo che, nel vuoto, $Q=12 \text{ mC}$, e che tale campo in un certo punto dello spazio valga 300 N/C , a quale distanza si trova la carica esploratrice?
2. Un dipolo è formato da due cariche $Q_1=6,0 \text{ pC}$ e $Q_2=-6,0 \text{ pC}$, separate da una distanza $8,2\text{cm}$ e poste nel vuoto. Qual è il vettore campo elettrico nel punto medio M tra le due posizioni?
3. Un protone ed un elettrone sono posizionati sui due vertici di un triangolo equilatero in cui ciascun lato è lungo $3 \times 10^{-6} \text{ m}$. Calcolare il campo elettrico nel terzo vertice.
4. Enunciare e spiegare brevemente il Teorema di Gauss.
5. Calcolare il valore del potenziale del campo elettrico di una carica di 2×10^{-6} alla distanza di un metro nel vuoto. Quanto vale il lavoro compiuto contro le forze del campo per allontanare una carica di -10^{-6} C da un punto alla distanza di 1m dalla carica che genera il campo in un altro punto alla distanza di 2m ?

Tempi dell'intervento didattico

Proponiamo una descrizione del susseguirsi delle attività didattiche con i tempi necessari a ciascuna attività. La previsione è da intendersi elastica perché occorre tener conto delle necessità degli studenti.

Accertamento dei prerequisiti	1h
Attività di laboratorio	3h
Corpi elettrizzati e loro interazioni	1h
Conduttori ed isolanti	1h
La polarizzazione dei dielettrici	1h
La legge di Coulomb	1h
Confronto tra interazione elettrica e gravitazionale	1h
Definizione di campo elettrostatico	1h
Rappresentazione del campo	1h
Principio di sovrapposizione ed esempi	2h
Flusso del campo e teorema di Gauss (applicaz.)	2h
Potenziale elettrico	2h
Esercitazioni	2h
Verifica e correzione	2h

Per un totale di 21ore (7 settimane di lezione)

UNITA' DIDATTICA

CAMPO MAGNETOSTATICO

Prerequisiti

- Campi vettoriali
- Prodotto vettoriale
- Flusso del campo vettoriale
- Campi elettrici
- Intensità di corrente

Accertamento dei prerequisiti

Poiché i prerequisiti sono inclusi negli obiettivi delle varie unità didattiche che compongono la programmazione dell'anno scolastico d'interesse, risulta implicito il loro accertamento.

Obiettivi specifici

Conoscenze

- Conoscere la definizione di campo magnetico
- Conoscere il flusso dell'induzione magnetica
- Conoscere la legge di Biot-Savart
- Conoscere il teorema di Gauss
- Conoscere il concetto di corrente concatenata
- Conoscere il Teorema di Ampère
- Conoscere il momento torcente di un campo magnetico
- Conoscere cosa provoca il magnetismo nella materia

Abilità

- Saper rappresentare graficamente le linee di forza di un campo magnetico generato da un dipolo magnetico, da un filo rettilineo, da una spira circolare e da un solenoide...
- Saper applicare la legge di Biot-Savart e il Teorema di Ampère
- Saper svolgere esercizi numerici sugli argomenti trattati

Contenuti

- Introduzione al campo magnetico
- Flusso di induzione magnetica
- La circuitazione del campo di induzione magnetica
- Momento torcente di un campo magnetico su una spira percorsa da corrente
- Il magnetismo nella materia

Sviluppo dei contenuti

INTRODUZIONE AL CAMPO MAGNETICO

A differenza delle grandezze elettriche, le grandezze magnetiche non sono di uso quotidiano e quindi sono poco familiari; tuttavia i fenomeni magnetici sono più facili da esplorare grazie all'esistenza di magneti naturali, che offrono la possibilità di indagare direttamente le forze magnetiche e di scoprire che possono essere attrattive o repulsive e quindi che esistono due diverse polarità magnetiche, sempre presenti entrambe in ogni magnete.

La grandezza magnetica principale è il campo magnetico; tuttavia, per gli studenti, più che fare una misura diretta, è utile imparare a riconoscere il campo magnetico dai suoi effetti e dalle sue caratteristiche.

Cominciamo dunque quest'unità didattica con esperienze di laboratorio, che hanno lo scopo di descrivere il campo magnetico (magnetostatico) come proprietà acquisita da una regione di spazio in cui è presente un magnete.

Esperimento 1: Presenza di un campo

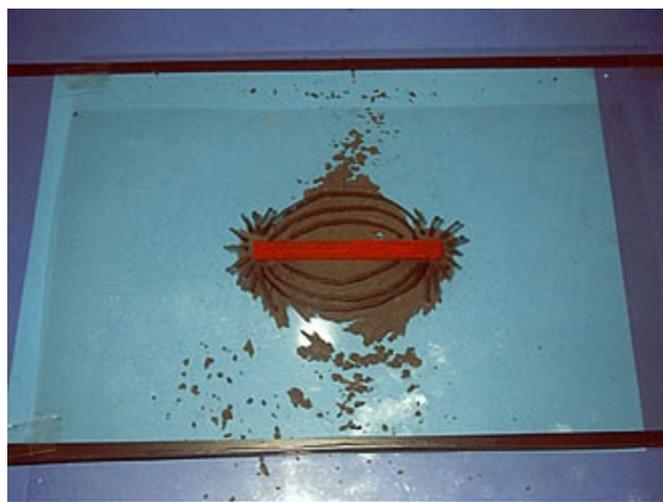


Della limatura di ferro è disposta disordinatamente su un supporto di plastica. Sotto il supporto si dispone un magnete. La limatura di ferro si aggrega formando dei

filamenti, disposti a raggiera intorno ai poli magnetici della calamita. Alcuni filamenti si dispongono sul piano d'appoggio, alcuni perpendicolarmente ad esso e altri obliquamente. Lo spazio in presenza di un magnete acquista una nuova proprietà: diventa sede di un'interazione magnetica, di un campo magnetico. Tale campo può essere evidenziato dalla disposizione della limatura di ferro. Se si dispongono magneti di varia forma sotto al supporto di plastica, la limatura di ferro si aggrega in modo diverso, evidenziando la diversa disposizione dei poli magnetici, uno rispetto all'altro. La struttura spaziale del campo magnetico dipende dalla forma geometrica del magnete che lo genera.

Esperimento 2: Rappresentazione del campo

Si appoggia sul supporto di plastica un foglio di acetato trasparente: con un pennarello si tracciano delle linee, che seguono gli andamenti dei filamenti di limatura di ferro.



L'ago di una piccola bussola, posta lungo una delle linee tracciate, si orienta disponendosi, in direzione tangente alla linea stessa. Se la bussola viene spostata l'ago si orienta sempre, punto per punto lungo la tangente alle linee tracciate. Le linee possono essere utilizzate per rappresentare la struttura spaziale del campo magnetico e prendono il nome di linee di campo. Con la bussola si può osservare che tutte le linee di campo sono linee chiuse.

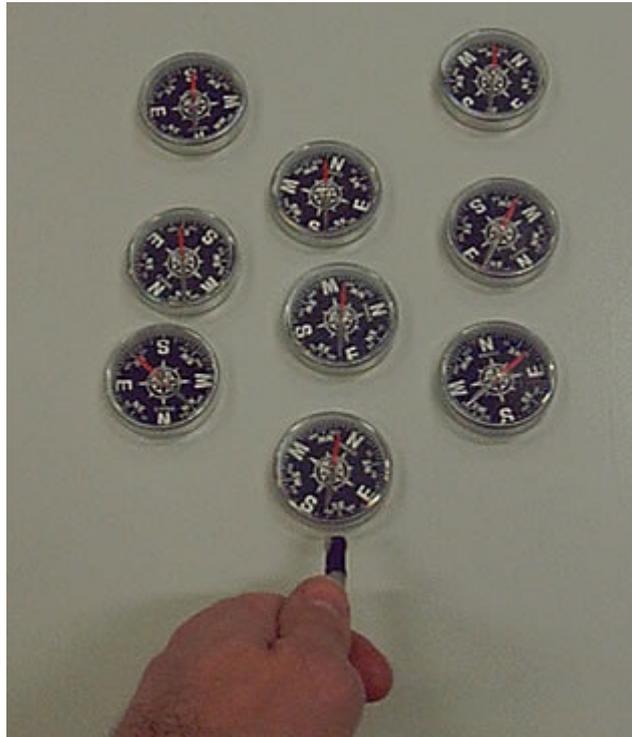


Esperimento 3: Presenza di un campo

Su un tavolo sono disposte alcune bussole. I loro aghi sono tutti paralleli fra loro.



Se si avvicina una calamita da diverse direzioni gli aghi si orientano diversamente a seconda di dove sono collocati rispetto al magnete.



Il campo magnetico è una proprietà dello spazio che dipende dalla posizione rispetto alla sorgente del campo stesso (il magnete).

Campo magnetico

Come evidenziano le esperienze introduttive, le interazioni tra due o più magneti possono essere interpretate come azione del campo magnetico generato da un magnete e agente sull'altro magnete. In generale, diciamo che in una regione dello spazio è presente un **campo magnetico** se un ago magnetico, posto in quella regione,

è soggetto ad un momento dovuto alle forze agenti sui suoi poli. In condizioni di indipendenza del tempo, il campo magnetico prende il nome di **campo magnetostatico**.

In laboratorio abbiamo osservato che un ago magnetico, libero di ruotare, assume in ogni punto del campo una ben determinata posizione di equilibrio, coincidente con quella il cui momento della coppia di forze agente sui poli è nullo. La direzione dell'ago magnetico è stata assunta come direzione del campo magnetico in quel punto, e dunque sono state individuate le **linee del campo** come quelle linee la cui tangente in ogni loro punto ha la stessa direzione del campo in quel punto. Per convenzione il verso assunto è quello Sud-Nord dell'ago magnetico.

In analogia con la trattazione del campo elettrico, vogliamo ora dare una definizione operativa di campo magnetico.

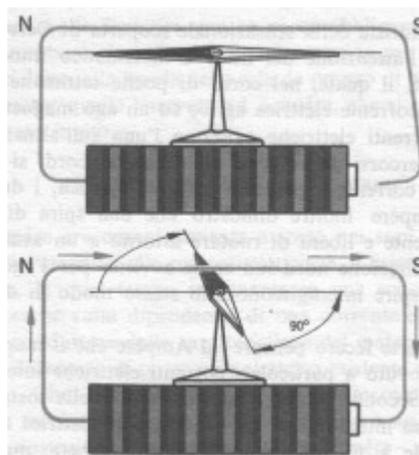
Ma quale strumento possiamo utilizzare come sonda esploratrice?

Mentre infatti, l'interazione tra due cariche elettriche può essere quantificata con la legge di Coulomb, non conosciamo ancora una legge sperimentale che quantifichi matematicamente l'interazione tra due magneti. Dobbiamo quindi ricercare altre vie, che ripercorrono del resto il cammino storico.

Esperienza di Oersted

Esistono dei legami tra elettricità e magnetismo? Le due scienze si svilupparono indipendentemente l'una dall'altra fino agli inizi del 1800, ma con la scoperta dell'effetto magnetizzante del fulmine i sospetti si rafforzarono. **La svolta negli studi in questi campi fu data dalla scoperta della pila di Volta**, la quale aveva permesso di avere correnti elettriche per una durata piuttosto lunga. Con questo mezzo gli sperimentatori cercarono dunque una forza che, al pari di quella elettrica e di quella gravitazionale, che agiscono lungo la congiungente le particelle, fosse diretta secondo la retta che unisce un elemento di corrente al polo magnetico.

Nel 1819 **C. Oersted** pubblica un lavoro descrivendo un esperimento in cui si osserva che una bussola si orienta perpendicolarmente a un conduttore quando in esso si instaura una corrente voltaica; la posizione dell'ago magnetico si inverte quando si inverte il verso della corrente nel conduttore.



L'importanza di questa osservazione è stata cruciale:

- per la prima volta si manifestava una relazione tra elettricità e magnetismo.
- l'interazione non avveniva lungo direzioni parallele ma perpendicolari.

Azione magnete-corrente

Poiché un circuito percorso da corrente esercita delle azioni meccaniche su un ago magnetico, per il terzo principio della dinamica un magnete deve esercitare delle forze su un circuito percorso da corrente.

Con il **quadro di Ampere** è possibile studiare l'azione meccanica di un magnete su una spira o su un solenoide percorsi da corrente

Definizione di campo magnetico

Si consideri quindi un filo conduttore attraversato da corrente elettrica e lo si disponga in un punto P dello spazio del quale se ne vogliono esplorare le proprietà. Se il filo subisce una certa forza $\vec{F}_m(P)$ allora in quel punto si dice che esiste il vettore $\vec{B}(P)$. Sperimentalmente si osserva che l'intensità della forza misurata è direttamente proporzionale alla lunghezza l del conduttore e all'intensità i di corrente, e dipende inoltre anche dall'orientazione del filo. Nella situazione in cui si ha la massima forza si dice che il vettore $\vec{B}(P)$ è ortogonale allo stesso vettore forza ed alla direzione della corrente elettrica attraverso un tratto rettilineo Δl del filo conduttore e con verso definito dalla regola della mano destra, utilizzata nel campo vettoriale.

Dai risultati sperimentali possiamo definire il modulo del vettore $\vec{B}(P)$ come il rapporto tra la forza magnetica che subisce il filo di prova ed il prodotto dell'intensità di corrente con la lunghezza l del tratto di filo e il seno di alfa:

$$B(P) = \frac{F_m(P)}{i \cdot l \cdot \sin \alpha}$$

La stessa operazione può essere ripetuta per ogni punto dello spazio in esame. In definitiva si ha che per ogni punto P_i dello spazio è associabile il vettore $\vec{B}(P_i)$, chiamato **induzione magnetica**, avente la direzione di un ago magnetico (libero di ruotare), nella posizione di equilibrio assunta in quel punto, verso coincidente con quello Sud-Nord dello stesso ago e per modulo la grandezza che compare nell'espressione precedente. Si ha così un campo che chiamiamo **campo magnetico** \vec{B} . **unità di misura**

Una volta definito il campo elettrico \vec{E} in una regione di spazio risulta che su qualunque altro filo conduttore attraversato da qualunque corrente i posizionato nella stessa regione di spazio si esercita la forza:

$$\vec{F}_m = i \cdot \vec{l} \wedge \vec{B}$$

Legge di Biot-Savart

I fisici francesi Jea Baptiste Biot e Felix Savart, il 30 ottobre e il 18 dicembre del 1820 comunicarono i risultati delle loro ricerche, iniziate subito dopo la scoperta di Oersted, sul campo magnetico generato da un filo rettilineo percorso da corrente.

Essi si servirono di un conduttore verticale disposto vicino a un ago magnetico libero di ruotare intorno ad un asse verticale. Inviando nel conduttore una corrente elettrica, l'ago magnetico oscillava sotto l'azione delle forze esercitate dal campo magnetico della corrente sui suoi poli. Dalle misure eseguite ricavarono che il modulo dell'induzione magnetica è inversamente proporzionale alla distanza del filo. Vogliamo ora dedurre questa legge dall'espressione della forza d'interazione fra due fili rettilinei paralleli percorsi da corrente. Applicando la regola della mano destra si trova facilmente che la forza \vec{F}_{12} che il primo filo, mediante il suo campo magnetico, esercita sul secondo è diretta come una forza attrattiva. Per la $F = B i l \sin\alpha$, il modulo di questa forza è $F_{12} = B_1 i_2 l$ se l è la lunghezza del conduttore. d'altra parte,

abbiamo che $F_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i_1 i_2 l}{d}$ dove d è la distanza fra i due conduttori. Dal confronto di queste ultime due relazioni segue che il modulo dell'induzione magnetica generata dal primo filo sul secondo è

$$B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i_1}{d}.$$

In modo analogo, considerando la forza agente sul filo percorso dalla corrente di intensità i_1 come l'azione del campo magnetico generato dalla corrente di intensità i_2 che scorre nel secondo filo, si trova che il modulo dell'induzione magnetica sul primo filo è

$$B_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i_2}{d}.$$

Generalizzando il risultato, possiamo enunciare la seguente legge:

Legge di Biot – Savart

Il modulo B dell'induzione magnetica generata da un filo rettilineo molto lungo percorso da una corrente di intensità i in un punto a distanza r del filo è:

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

direttamente proporzionale all'intensità di corrente e inversamente proporzionale alla distanza.

Per quanto riguarda invece il calcolo dell'induzione magnetica generata da una **spira circolare** percorsa da corrente è piuttosto complesso. Tuttavia, si tenterà di condurre i ragazzi al seguente risultato

L'induzione magnetica al centro di una spira è direttamente proporzionale all'intensità di corrente e inversamente proporzionale al raggio della spira ossia:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2 r}$$

FLUSSO DELL'INDUZIONE MAGNETICA

Naturalmente la definizione di flusso attraverso una superficie orientata può essere estesa anche al campo magnetico.

Definizione: Il flusso di un campo magnetico uniforme \vec{B} attraverso una superficie \vec{S} è dato dall'espressione:

$$\Phi(\vec{B}) = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

Se ϑ è l'angolo che il vettore \vec{B} forma con il vettore \vec{S} , l'espressione precedente è equivalente a

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \theta$$

L'unità di misura nel sistema SI è il **weber**.

Nel caso più generale in cui il vettore \vec{B} varia da punto a punto e la superficie S è curva, il flusso è la somma dei flussi parziali attraverso gli elementi ΔS di superficie, sufficientemente piccoli da poterli supporre piani e in modo che il vettore \vec{B} possa considerarsi costante nei punti di ogni elemento di superficie; così facendo i flussi parziali possono essere calcolati con la relazione precedentemente scritta.

Mentre le linee di forza del campo elettrico generato da cariche ferme iniziano sulle cariche positive e terminano sulle cariche negative, le linee di forza dell'induzione magnetica non hanno né inizio né fine, e quindi sono linee chiuse. Tale comportamento è dovuto al fatto che in natura non sono mai stati trovati dei monopoli magnetici. Di conseguenza, comunque si prenda una superficie chiusa, il numero delle linee di forza entranti è uguale al numero di linee di forza uscenti, per cui il flusso di \vec{B} attraverso la superficie è nullo.

Teorema di Gauss.

Il flusso dell'induzione magnetica uscente da una superficie chiusa è sempre nullo, qualunque sia il campo magnetico e per qualunque superficie.

LA CIRCUITAZIONE DEL CAMPO DI INDUZIONE MAGNETICA

Abbiamo già visto che un campo vettoriale è conservativo se e soltanto se, la sua circuitazione lungo qualsiasi cammino chiuso è nulla. Se allora riusciamo a individuare un percorso lungo il quale la circuitazione dell'induzione magnetica B è diversa da zero, possiamo concludere che il campo magnetico non è conservativo.

Calcoliamo dunque la circuitazione di \vec{B} lungo una linea di forza del campo magnetico prodotto da un filo rettilineo molto lungo percorso da corrente.

Il campo magnetico è diretto, in ciascun punto tangenzialmente alla linea di forza e ha lo stesso modulo su tutti i punti della linea. Percorriamo ora la linea nel verso del campo magnetico e suddividiamo il percorso in tanti spostamenti infinitesimali $\Delta\vec{s}_1, \Delta\vec{s}_2, \dots$. Si osserva che al limite, quando gli spostamenti sono sufficientemente piccoli, il campo è parallelo ed equiverso rispetto ad essi, la circuitazione dell'induzione magnetica è:

$$C(\vec{B}) = B(\Delta s_1 + \Delta s_2 + \dots)$$

avendo indicato con B il modulo dell'induzione magnetica lungo la linea di forza considerata e con $\Delta s_1, \Delta s_2 \dots$ i moduli dei singoli spostamenti.

La somma $\Delta s_1 + \Delta s_2 + \dots$ rappresenta la lunghezza $2\pi r$ della circonferenza, per cui possiamo scrivere:

$$C(\vec{B}) = B2\pi r$$

e indicando con i l'intensità della corrente che scorre nel filo e ricordando la legge di

Biot-Savart otteniamo $C(\vec{B}) = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} 2\pi r$ cioè

$$C(\vec{B}) = \mu_0 i.$$

La corrente che attraversa la superficie delimitata dalla linea chiusa lungo la quale si calcola la circuitazione di \vec{B} si dice **corrente concatenata**.

Poiché la circuitazione di un campo vettoriale lungo un certo cammino chiuso è una quantità scalare il cui segno dipende dal verso della percorrenza del cammino, per

generalizzare il risultato espresso nella legge precedente, occorre attribuire un segno alla corrente concatenata i . Fissato dunque un verso positivo di percorrenza della linea chiusa, facciamo la convenzione di assumere positiva la corrente nel caso in cui il suo verso coincida con quella del pollice della mano destra, tenuto in posizione perpendicolare alle altre dita, quando queste sono avvolte lungo la linea nel verso positivo; se invece il verso della corrente e quella del pollice sono opposti, attribuiamo alla corrente concatenata un segno negativo.

A questo punto, si propone ai ragazzi di calcolare la circuitazione del campo magnetico prodotto dalla corrente che scorre in un filo rettilineo lungo la linea chiusa.

Con alcuni semplici passaggi, si conclude che $C(\vec{B}) = 0$. Inoltre, i risultati trovati per il campo magnetico di un filo rettilineo percorso da corrente, possono essere generalizzati al campo prodotto dalla corrente che scorre in un circuito di forma qualsiasi. La circuitazione dell'induzione magnetica può essere inoltre calcolata lungo qualsiasi linea chiusa. Si possono anche considerare linee chiuse non piane: in ogni caso per corrente concatenata, si intende quella che attraversa una qualunque superficie avente come contorno la linea lungo la quale si calcola la circuitazione.

La circuitazione del campo di induzione magnetica dipende sempre dalla corrente totale concatenata con il percorso chiuso, data dalla somma algebrica di tutte le correnti concatenate, prese ciascuna con il proprio segno.

In qualsiasi caso (purché le correnti che generano il campo magnetico siano costanti nel tempo) il seguente teorema:

Teorema di Ampère

La circuitazione dell'induzione magnetica \vec{B} , calcolata lungo un percorso chiuso qualsiasi, è uguale al prodotto della permeabilità magnetica μ_0 per la corrente i_c concatenata al percorso:

$$C(\vec{B}) = \mu_0 i_c$$

Osservazione:

un'importante conseguenza di questo teorema, è che a differenza del campo elettrico generato da cariche elettriche ferme, la cui circuitazione è sempre nulla, il campo di induzione magnetica non è un campo conservativo.

MOMENTO TORCENTE DI UN CAMPO MAGNETICO SU UNA SPIRA PERCORSO DA CORRENTE

Se S è la superficie delimitata da una spira e i l'intensità della corrente che vi scorre, si definisce momento magnetico $\vec{\mu}$ della spira, il vettore di modulo $\mu = iS$, perpendicolare alla spira e orientato come il pollice della mano destra quando le altre

ditte sono avvolte nel verso della corrente. Un campo di induzione magnetica \vec{B} uniforme, esercita su una spira un **momento torcente** $\vec{M} = \vec{\mu} \times \vec{B}$.

Il momento torcente esercitato da un campo magnetico su una spira percorsa da corrente fa ruotare la spira intorno a un asse passante per il suo centro di massa. Questa proprietà è sfruttata in numerose applicazioni come ad esempio il *galvanometro a bobina mobile* e il *motore elettrico a corrente continua*. Molti motori elettrici sfruttano la rotazione di una bobina prodotta dall'azione di un campo magnetico. In un motore elettrico gli estremi della spira sono rigidamente fissati ad un collettore, costituito da due semianelli cilindrici che ruotano insieme alla spira. La corrente è portata nella spira per mezzo di due contatti, realizzati con due spazzole di carbone che strisciano sui semianelli del collettore e sono collegate, una, con il polo positivo di un generatore, e l'altra, con il polo negativo. Il collegamento cambia nell'istante in cui la spira supera la posizione di equilibrio; nello stesso istante cambia anche il verso della corrente. Di conseguenza il momento torcente ha sempre lo stesso verso e la spira ruota senza oscillare.

Nei motori a corrente continua il sistema ruotante è costituito, in realtà, da un insieme di bobine avvolte su un cilindro di ferro, chiamato *rotore*; ciò permette di ottenere un moto rotazionale uniforme e di trasmetterlo, mediante un asse collegato con il rotore, ad altre parti meccaniche.

IL MAGNETISMO NELLA MATERIA

Consideriamo un circuito percorso da corrente posto inizialmente nel vuoto e sia \vec{B}_0 l'induzione magnetica prodotta dal circuito in un punto dello spazio.

Se ora riempiamo lo spazio con un mezzo materiale, sperimentalmente si verifica che nel punto considerato, l'induzione \vec{B} differisce da \vec{B}_0 per un fattore che viene indicato μ_r : $\vec{B} = \mu_r \vec{B}_0$.

Se il mezzo è omogeneo e isotropo, cioè presenta le stesse proprietà chimico-fisiche in tutti i suoi punti e lungo tutte le direzioni, μ_r non dipende dalla direzione del campo magnetico. Per molte sostanze, inoltre, si verifica che questa costante è indipendente anche dall'intensità del campo. Pertanto la relazione appena vista è valida in tutti i punti in cui è presente il campo magnetico e μ_r assume sempre lo stesso valore, sia dove l'induzione magnetica è più intensa, sia dove è più debole.

La costante dimensionale μ_r è chiamata **permeabilità magnetica relativa** (al vuoto) del mezzo considerato ed esprime in che modo la presenza della materia modifica il campo magnetico rispetto al vuoto.

Materiali diversi sono caratterizzati da valori differenti di μ_r . Le proprietà magnetiche delle diverse sostanze sono dunque descritte dalla permeabilità magnetica, o equivalentemente, da un'altra grandezza dimensionale, detta **suscettibilità magnetica** e indicata con χ_m legata a μ_r dalla seguente relazione:

$$\chi_m = \mu_r - 1.$$

In base ai valori assunti da μ_r e consecutivamente dalla suscettibilità χ_m i materiali possono essere raggruppati in tre classi:

- **diamagnetiche** quando la permeabilità magnetica, indipendentemente dal campo magnetico e dalla temperatura, presenta un valore lievemente inferiore all'unità; (per esempio argento, rame, acqua, ...)
- **paramagnetiche** quando la permeabilità magnetica è ancora indipendente dal campo magnetico, ma funzione della temperatura. (per esempio platino, aria, alluminio, ...)
- **ferromagnetiche** quando la permeabilità magnetica dipende sia dalla temperatura sia dal campo magnetico. (per esempio ferro, nichel, cobalto...)

Effetti prodotti da un campo magnetico sulla materia

Quando una sostanza, di qualunque natura è posta in un campo magnetico, il moto degli elettroni intorno ai nuclei atomici viene perturbato e gli atomi acquistano un momento magnetico che si oppone, in verso, al campo magnetico applicato.

Questo processo di **polarizzazione magnetica**, per il quale negli atomi è indotto un momento magnetico antiparallelo al campo, produce conseguenze evidenti solo nelle sostanze **diamagnetiche**, i cui atomi non presentano un momento magnetico proprio. Consideriamo invece una sostanza **paramagnetica**: ogni atomo possiede un momento magnetico permanente orientato casualmente. Se poniamo la sostanza in un campo magnetico, i momenti atomici tendono a orientarsi nello stesso verso e nella stessa direzione del campo. Questo processo, la cui entità è tanto maggiore quanto più intenso è il campo magnetico applicato, prende il nome di **polarizzazione magnetica per orientamento**.

Il comportamento delle sostanze **ferromagnetiche** i cui atomi possiedono, come quelli delle sostanze paramagnetiche, un momento magnetico proprio è più complesso. Secondo una teoria proposta dal francese Pierre Weiss, un materiale ferromagnetico può essere suddiviso in tanti piccoli elementi, chiamati **domini ferromagnetici**. I momenti magnetici degli atomi di un dato dominio sono allineati: pertanto, sommandosi, fanno sì che il dominio presenti un momento magnetico totale molto elevato in confronto al momento di un singolo atomo. Quando il campione è sottoposto all'azione di un campo magnetico esterno, i domini aventi momento magnetico orientato come il campo si allargano a spese di altri domini, che finiscono con lo scomparire del tutto se il campo applicato è sufficientemente intenso. Il campione si presenta allora come un unico dominio, con momento magnetico orientato nella direzione e nel verso dell'induzione magnetica; in questa condizione si dice che il materiale ha raggiunto la **saturatione**.

Verifica Sommativa: 1 ora

1. Un conduttore percorso da corrente, immerso per un tratto di 25 cm in un campo magnetico uniforme di induzione $0,2 \text{ weber/m}^2$, è soggetto a una forza di 10 N. Sapendo che l'angolo formato dalla direzione del filo con le linee di campo è 30° , calcolare l'intensità di corrente che percorre il filo
2. Descrivere brevemente l'esperienza di Oersted e spiegare la sua importanza storica
3. Un solenoide è formato da 10^3 spire/m. Calcolare l'intensità di corrente che deve attraversarlo affinché l'induzione magnetica nel suo interno abbia il valore $12,42 \cdot 10^{-3} \text{ weber/m}^2$.
4. Determinare il raggio che deve avere una spira circolare percorsa da corrente affinché l'induzione magnetica prodotta dalla spira nel suo centro sia pari a quella generata da un filo rettilineo infinito percorso dalla stessa corrente, in un punto a distanza 40.0cm dal filo.
5. Parla degli effetti prodotti da un campo sulla materia (cosa succede nelle sostanze diamagnetiche? e in quelle paramagnetiche? e in quelle ferromagnetiche)

Tempi dell'intervento didattico

Proponiamo una descrizione del susseguirsi delle attività didattiche con i tempi necessari a ciascuna attività. La previsione è da intendersi elastica perché occorre tener conto delle necessità degli studenti.

Introduzione al campo magnetico	2h
Flusso di induzione magnetica	1h
La circuitazione del campo di induzione magnetica	2h
Momento torcente di un campo magnetico su una spira percorsa da corrente	1h
Il magnetismo nella materia	1h
Esercitazioni	1h
Laboratorio	2h
Verifica e correzione	2h

Per un totale di 12ore (4 settimane circa di lezione)

UNITA' DIDATTICA

CIRCUITI ELETTRICI IN CORRENTE CONTINUA

Prerequisiti

- Riconoscere i fenomeni elettrici e di elettrizzazione.
- Conoscere le proprietà del campo elettrico.
- Conoscere e saper definire le grandezze fisiche che caratterizzano i fenomeni elettrici.
- Saper applicare le leggi che regolano l'interazione tra corpi carichi.
- Conoscere i principi di conservazione in ambito elettrico.
- Saper classificare i materiali rispetto alla conduzione e la polarizzazione elettrica.
- Saper utilizzare il calcolo algebrico e trigonometrico.
- Conoscere gli elementi di calcolo vettoriale.

Accertamento dei prerequisiti

Poiché i prerequisiti sono inclusi negli obiettivi delle varie unità didattiche che compongono la programmazione dell'anno scolastico d'interesse, risulta implicito il loro accertamento.

Obiettivi specifici

Conoscenze

- Conoscere il concetto di corrente elettrica e le convenzioni associate.
- Conoscere la definizione di resistenza e delle grandezze fisiche ad essa collegate.
- Conoscere le leggi di Ohm.
- Conoscere le espressioni per l'energia e la potenza dissipata nei circuiti elettrici.
- Conoscere il concetto di f.e.m. e di generatore.
- Conoscere il significato di collegamenti in serie e in parallelo di elementi circuitali.

Abilità

- Saper schematizzare un circuito elettrico.
- Saper applicare le leggi di Ohm in semplici applicazioni circuitali.
- Saper applicare i principi di Kirchhoff per risolvere semplici circuiti in c.c.
- Saper descrivere collegamenti di resistenze tramite una resistenza equivalente.
- Saper utilizzare il concetto di potenziale elettrico per risolvere semplici problemi circuitali.

- Saper collegare opportunamente i dispositivi di misura all'interno di un circuito elettrico.

Contenuti

- Corrente elettrica.
- Resistenza elettrica e leggi di Ohm
- I circuiti elettrici in corrente continua
- Resistenze in serie e in parallelo

Sviluppo dei contenuti

CORRENTE ELETTRICA

Nei comuni apparecchi elettrici, come una torcia elettrica, una radio o un ferro da stiro, si riproduce sempre, sostanzialmente la stessa situazione: una sorgente di energia elettrica è collegata per mezzo di un circuito elettrico a un utilizzatore, che può essere una lampadina, un altoparlante, una resistenza elettrica ecc. In ogni caso attraverso il circuito si ha un moto di cariche elettriche.

Nei metalli, in particolare, i portatori di carica in movimento sono gli elettroni di conduzione.

Come le molecole di un gas, gli elettroni di conduzione si muovono in modo caotico, con una velocità media dell'ordine di 10^5 m/s. Tuttavia questo moto disordinato chiamato *moto di agitazione termica*, non costituisce una corrente, in quanto per ogni elettrone che si muove in un verso, ne esiste sempre un altro che si muove in verso opposto.

La situazione cambia se agli estremi del conduttore si applica una differenza di potenziale fornita da una sorgente elettrica. All'interno del conduttore, non più in condizioni di equilibrio elettrostatico, si stabilisce allora un campo elettrico e gli elettroni di conduzione assumono una velocità nella stessa direzione e in verso opposto rispetto al campo. Tale velocità, chiamata *velocità di deriva*, è dell'ordine di 10^{-4} m/s, di gran lunga più piccola della velocità di agitazione termica, ma sufficiente a far sì che il moto ordinato d'insieme dei portatori di carica manifesti concretamente i suoi effetti (lampadine che si accendono, altoparlanti che emettono suoni, resistenze che si scaldano, ecc.). In questo caso diciamo che il conduttore è percorso da **corrente elettrica**. Nonostante la lentezza del moto di deriva degli elettroni, il segnale elettrico si propaga pressoché istantaneamente: premendo un interruttore sulla Terra, in poco più di un secondo potremmo accendere, attraverso un ipotetico filo metallico teso fino alla Luna, una lampadina sul nostro satellite. In realtà il segnale non è trasportato dalle cariche, bensì dal campo elettrico, che nei conduttori metallici si propaga praticamente alla velocità della luce nel vuoto. Possiamo immaginare che un filo conduttore sia come un tubo pieno d'acqua, dal quale l'acqua incomincia ad uscire subito dopo l'apertura del rubinetto.

In generale chiamiamo corrente elettrica qualsiasi movimento ordinato di cariche elettriche.

Se nei conduttori metallici a spostarsi sono gli elettroni, cioè delle cariche negative, nelle soluzioni elettrolitiche e nei gas la corrente è prodotta dal movimento di ioni sia positivi (atomi che hanno perduto elettroni) sia negativi (atomi che hanno acquistato elettroni).

Agli inizi del XIX quando venne data la definizione di corrente elettrica, non erano ancora stati scoperti gli elettroni e si definì come *verso convenzionale* della corrente quello secondo cui si muovono le cariche positive, cioè il verso del campo elettrico. Come è consuetudine, manteniamo tale convenzione, per cui quando diciamo che un filo metallico è percorso da una corrente elettrica dall'estremo A all'estremo B, ciò vuol dire che nel filo esiste un flusso di elettroni in verso opposto, cioè da B ad A.

In pratica, applicando agli estremi di un filo conduttore una differenza di potenziale, gli elettroni di conduzione si muovono dall'estremità B dove il potenziale è minore verso l'estremità A dove il potenziale è maggiore, mentre la corrente è il verso opposto, coincidente con quello dei potenziali decrescenti.

La grandezza che caratterizza la corrente elettrica in un conduttore è l'intensità di corrente:

Si definisce intensità di corrente lungo un conduttore il rapporto

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

fra la quantità Δq di carica elettrica che attraversa una sezione qualsiasi del conduttore nell'intervallo di tempo Δt e l'intervallo di tempo stesso.

L'intensità di corrente nel SI si misura in **ampere (A)** $1\text{A} = \frac{1\text{C}}{1\text{s}}$. Diciamo che un

conduttore è percorso da 1° di corrente se attraverso una sua sezione qualsiasi passa una carica di 1C ogni secondo. L'intensità di corrente è assunta nel SI come grandezza fondamentale; la sua unità di misura viene in realtà definita considerando l'interazione elettromagnetica fra due fili percorsi da corrente. La definizione di ampere che abbiamo appena dato quindi, è provvisoria. Da essa comunque, tenuto conto che i è una grandezza fondamentale si ricavano le dimensioni fisiche della carica q : $[q]=[i][t]$.

Affinché una corrente scorra stabilmente lungo un conduttore, è necessario mantenere una differenza di potenziale fra gli estremi del conduttore.

Per mantenere costante nel tempo il flusso degli elettroni, è necessario perciò ripristinare in ogni istante la differenza di potenziale iniziale. Si raggiunge tale scopo con un *generatore di tensione*, per esempio una pila o un accumulatore.

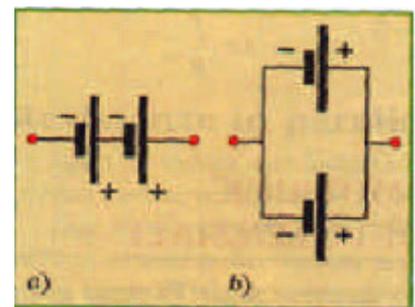
Ogni generatore di tensione è formato da due elettrodi, comunemente costituiti da due materiali conduttori diversi, immersi in una soluzione elettrolitica. Dei due elettrodi, in seguito, in seguito a reazione chimica, uno si carica positivamente e prende il nome di *polo positivo* (indicato con il segno +) mentre l'altro si carica negativamente e prende il nome di *polo negativo* (indicato con il segno -).

Il ruolo di un generatore è analogo a quello di una pompa in un circuito idraulico. Infatti il movimento di cariche elettriche fra le due estremità a diverso potenziale di un filo metallico può essere paragonato al flusso d'acqua fra due vasi comunicanti a diverso livello. Se vogliamo che il flusso continui, dobbiamo mantenere costante il dislivello, mediante una pompa che fa risalire il liquido nel recipiente dove raggiunge l'altezza maggiore. La pompa sposta il liquido verso l'alto, cioè in verso opposto a quello secondo cui si muoverebbe se fosse soggetto alla sola forza del campo gravitazionale.

Possiamo ora dire che ogni generatore è caratterizzato da una *forza elettromotrice (f.e.m.)*, definita come la differenza di potenziale fra i suoi poli a circuito aperto (se il circuito è chiuso, la d.d.p. fra i poli del generatore è minore della f.e.m.). Ricordando la definizione di d.d.p., la f.e.m. f di un generatore, che nel SI si misura in volt, è il rapporto fra il lavoro ΔL compiuto dal generatore per portare la carica positiva Δq dal polo negativo al polo positivo e la carica Δq , cioè:

$$f = \frac{\Delta L}{\Delta q}.$$

Nella figura a lato, sono rappresentati i due modi in cui due generatori possono essere collegati fra loro: in *serie* (figura a) e in *parallelo* (figura b). Nel collegamento in serie, detto anche *batteria*, il polo negativo di un generatore è connesso con polo positivo dell'altro, mentre nel collegamento in parallelo sono connessi fra loro i poli positivi e quelli negativi. È ovvio che la f.e.m. di un sistema di generatori in serie è uguale alla somma delle f.e.m. dei singoli generatori.



RESISTENZA ELETTRICA E LEGGE DI OHM

Se agli estremi di un filo conduttore applichiamo una d.d.p. ΔV , il filo è attraversato da una corrente elettrica la cui intensità dipende, oltre che da ΔV , dalle proprietà del conduttore. È maggiore, per esempio, se il filo è di rame, minore se, a parità di caratteristiche geometriche, costantina (lega composta di rame per il 60% e di nichel per il 40%).

Riguardo alla relazione fra la differenza di potenziale e intensità di corrente, nel 1826 il fisico tedesco *Georg Simon Ohm* trovò sperimentalmente la seguente legge:

Prima Legge di Ohm

A temperatura costante, la differenza di potenziale ΔV applicata a due estremità di un conduttore metallico è direttamente proporzionale all'intensità i della corrente che percorre il conduttore:

$$\Delta V = R i$$

Il coefficiente di proporzionalità R è chiamato **resistenza elettrica del conduttore**.

Il nome di “resistenza elettrica” dato dal rapporto $R = \Delta V / i$ è appropriato, in quanto, per una determinata differenza di potenziale, più grande è R , meno intensa è la corrente che scorre nel conduttore. Pertanto R è una misura della resistenza che il conduttore oppone al passaggio della corrente elettrica.

Nel SI le dimensioni fisiche della resistenza, come si ricava dalla Prima Legge di Ohm, tenendo conto delle dimensioni di ΔV espresse in termini delle grandezze fondamentali sono

$$[R]=[I^2][m][t^{-3}][i^{-2}]$$

e la sua unità di misura è l’ohm Ω :

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

Un conduttore ha una resistenza di 1Ω se, applicando ai suoi estremi la differenza di potenziale di 1V, l’intensità di corrente che lo attraversa è uguale a 1A.

Data la proporzionalità diretta fra ΔV e i , misurando l’intensità di corrente in un conduttore metallico al variare della d.d.p. applicata agli estremi e riportando il valore di queste due grandezze su un sistema di assi cartesiani., otteniamo una retta passante per l’origine; questa retta è la *curva caratteristica* del conduttore considerato. Tutti i conduttori la cui curva caratteristica è una retta si chiamano *conduttori ohmici*.

La Prima Legge di Ohm è valida, per un vasto intervallo di tensioni, non solo per i metalli, ma anche per altri materiali, come le soluzioni elettrolitiche. In ogni caso la proporzionalità diretta fra differenza di potenziale e intensità di corrente non è una legge generale e vale entro un campo limitato di condizioni. Nel caso in cui R sia ritenuta costante, $\Delta V = R i$ rappresenta l’espressione della Legge di Ohm; in generale questa equazione definisce la resistenza R , che per i conduttori non ohmici è variabile con la differenza di potenziale applicata.

Stabilito che ogni conduttore ha una propria resistenza elettrica, si pone il problema di determinare da quali parametri dipenda. Ancora a Ohm è dovuta la relazione che esprime la resistenza di un filo metallico in funzione della lunghezza della sezione:

Seconda Legge di Ohm

La resistenza di un filo conduttore è direttamente proporzionale alla lunghezza l e inversamente proporzionale alla sezione A , cioè:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

in cui ρ è una costante di proporzionalità, chiamata **resistività**, dipendente solo dalla natura fisica del conduttore.

L’unità di misura di è:

$$R = \rho \frac{l}{A} \Rightarrow \rho = R \frac{A}{l} \Rightarrow [\rho] = \frac{\Omega m^2}{m} = \Omega m \text{ cioè } \text{Ohm metro.}$$

Spesso è utile considerare l'inverso della resistività, nota come **conducibilità**: $\sigma = \frac{1}{\rho}$.

Poiché è noto che la temperatura influenza il movimento microscopico degli atomi e le vibrazioni di quest'ultimi intorno alle loro posizioni di equilibrio (agitazione termica), è logico pensare che aumentando la temperatura aumenti il moto interno degli ioni che costituiscono la struttura del conduttore che, quindi, offra un maggiore ostacolo al moto delle cariche elettriche (aumento della sezione d'urto), con conseguente incremento della resistenza (elettrica).

In effetti, sperimentalmente, nei metalli si verifica che: $\rho = \rho_{20}(1 + \alpha\Delta T)$ dove

ρ_{20} è la resistività di riferimento a 20°C;

α è il coefficiente di dilatazione termica

$\Delta T = T - 20^\circ$

Nelle figure seguenti sono riportati alcuni valori della resistività e del coefficiente di dilatazione termica.

La resistività può essere utilizzata anche per classificare i materiali in conduttori, semiconduttori ed isolanti.

MATERIALE	ρ (in $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
Conduttori:	
Argento	0,016
Rame	0,017
Oro	0,024
Alluminio	0,028
Tungsteno	0,055
Platino	0,10
Ferro	0,13
Acciaio	0,18
Piombo	0,22
Mercurio	0,95
Leghe:	
Manganese (Cu84, Mn12, Ni4)	0,44
Costantina (Cu60, Ni40)	0,49
Semiconduttori:	
Carbonio	35
Germanio	$60 \cdot 10^7$
Silicio	$2,3 \cdot 10^7$
Isolanti:	
Ambra	$5 \cdot 10^{10}$
Vetro	$10^{10} - 10^{14}$
Mica	$10^{11} - 10^{13}$
Quarzo (fuso)	$75 \cdot 10^{11}$
Zolfo	10^{11}
Legno	$10^{11} - 10^{13}$

MATERIALE	α (in $^\circ\text{C}^{-1}$)
Acciaio	$3 \cdot 10^{-2}$
Alluminio	$3,7 \cdot 10^{-2}$
Argento	$3,8 \cdot 10^{-2}$
Carbonio	$-0,5 \cdot 10^{-2}$
Costantina	$-0,005 \cdot 10^{-2}$
Ferro	$5 \cdot 10^{-2}$
Manganese	$0,0 \cdot 10^{-2}$
Mercurio	$0,88 \cdot 10^{-2}$
Ottone	$2,0 \cdot 10^{-2}$
Platino	$3,5 \cdot 10^{-2}$
Piombo	$4,3 \cdot 10^{-2}$
Rame	$1,0 \cdot 10^{-2}$
Tungsteno	$4,5 \cdot 10^{-2}$

I CIRCUITI ELETTRICI IN CORRENTE CONTINUA

Quando agli estremi di un conduttore si applica una differenza di potenziale costante, quale per esempio quella fornita da una comune pila a secco o da un accumulatore di un'automobile, nel conduttore scorre una *corrente continua*, una corrente cioè la cui intensità non varia nel tempo.

In un circuito elettrico ogni elemento che soddisfa la Prima Legge di Ohm, come per esempio un filo metallico oppure una lampadina a incandescenza, si chiama *resistore*; comunemente però si usa il termine *resistenza* non solo per indicare il rapporto fra la differenza di potenziale ai capi del resistore e la corrente che lo attraversa, ma anche per indicare il resistore stesso. Il simbolo per indicare una resistenza è il seguente:



La Prima Legge di Ohm applicata a un circuito chiuso

Finora abbiamo assunto che un generatore fornisca ad un circuito semplicemente una forza elettromotrice. In realtà aggiunge al circuito anche una resistenza. Infatti la corrente scorre anche all'interno del generatore, dove, per varie cause, il moto dei portatori di carica incontra degli ostacoli.

Questa resistenza è detta *resistenza interna* del generatore ed è indicata solitamente con r .

Supponiamo ora di conoscere la f.e.m. f e la resistenza interna r del generatore; vogliamo determinare l'intensità di corrente che scorre lungo il circuito.

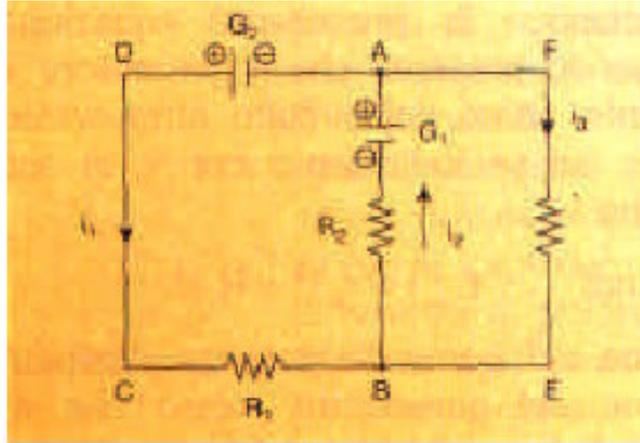
Per questo utilizziamo un teorema dovuto a *Gustav Robert Kirchhoff*, noto come *Seconda Legge di Kirchhoff* o *Teorema della Maglia*:

Teorema della Maglia

Sommando algebricamente al potenziale V_A in un punto A del circuito tutte le variazioni di potenziale che si incontrano in un giro completo lungo il circuito, si ottiene di nuovo V_A .

Per il calcolo è necessario tener presente che, spostandosi nel verso della corrente attraverso una resistenza R , il potenziale subisce, per la prima legge di Ohm, una diminuzione, detta *caduta di tensione*, uguale a $R i$. Se ci si muove invece entro il generatore nel verso della corrente interna, cioè dal polo negativo a quello positivo, il potenziale subisce un aumento f uguale alla f.e.m. del generatore, oltre a una diminuzione $r i$ dovuta alla resistenza interna del generatore.

Facciamo un esempio concreto:



Inizialmente identifichiamo gli elementi che compongono il circuito:

- resistenze $\rightarrow R_1 R_2 R_3$
- generatori di tensione $\rightarrow G_1 G_2$
- **nodi circuitali**: punti del circuito che sono connessi a più conduttori (A e B ad esempio nella figura)
- **maglie circuitali**: percorso continuo chiuso, che partendo da un nodo ritorna allo stesso senza percorrere più volte uno stesso ramo (es. ABCDA o EFABE nella figura).

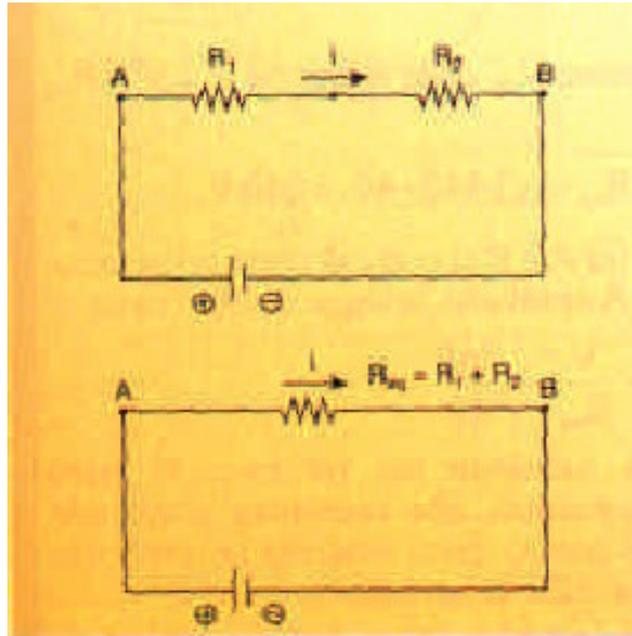
Se consideriamo una maglia, come ABCD, allora, partendo dal nodo A, posto ad tensione V_A e procedendo verso B si incontra il generatore G_1 che indurrà una variazione di tensione (decremento) e successivamente una ulteriore variazione dovuta alla resistenza R_2 pari a $R_2 i_2$, sulla base della legge di Ohm; quest'ultima variazione di tensione è positiva poiché il verso della corrente è opposta al verso di percorrenza del ramo.

Successivamente nel ramo BC avremo una variazione pari a $R_1 i_1$, anche questa volta positiva poiché il verso di i_1 è opposto al verso di percorrenza scelto per analizzare la maglia.

Nel ramo CD non vi è alcuna modifica al potenziale dato che le connessioni sono sempre considerate prive di resistenza.

RESISTENZA IN SERIE E IN PARALLELO

La maggior parte dei circuiti elettrici contiene numerose resistenze collegate in modo piuttosto complesso; in definitiva si tratta sempre, però, di combinazioni di resistenze collegate a due a due *in serie* o *in parallelo*.



Quando due resistori sono disposti in un circuito uno di seguito all'altro in modo da essere attraversati dalla stessa intensità di corrente, diciamo che essi, o le loro resistenze sono collegate in serie.

Se applichiamo il 2° principio di Kirchhoff alla maglia del circuito si ha:

$$\Delta V = R_1 i + R_2 i = i(R_1 + R_2) \Rightarrow i = \frac{\Delta V}{R_1 + R_2}$$

Si definisce, quindi, *resistenza equivalente* di un collegamento in serie di due resistenze *la somma delle stesse*: $R_{eq} = R_1 + R_2$ poiché la stessa provoca la stessa caduta di tensione delle due resistenze.

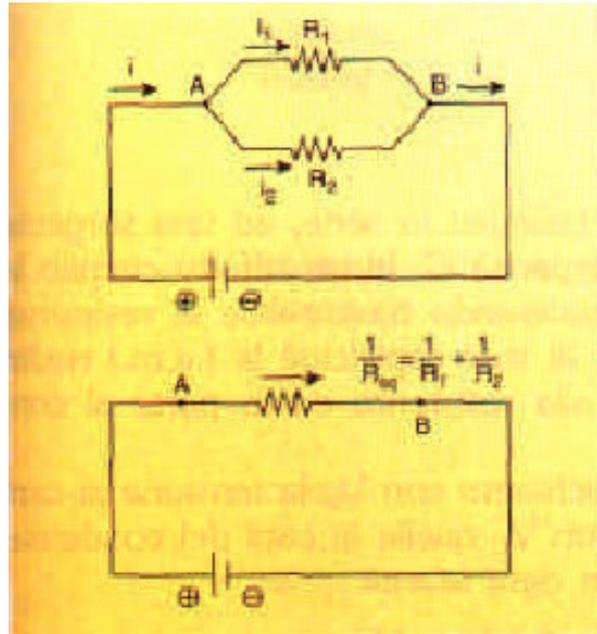
Generalizzando possiamo concludere:

Collegamento di resistori in serie

Due o più resistori collegati in serie sono equivalenti a un unico resistore di resistenza:

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

La d.d.p. agli estremi di tale resistore è uguale alla somma delle cadute di tensione su tutti i resistori e l'intensità di corrente i che lo attraversa è uguale a quella che scorre in ogni resistore.



Quando i due resistori sono collegati in parallelo invece, i resistori sono connessi direttamente con gli stessi punti del circuito (nodi); fra gli estremi c'è dunque la stessa d.d.p.. A questo punto è bene introdurre la

Prima Legge di Kirchhoff, o teorema dei nodi

La somma delle intensità delle correnti che giungono in un nodo di un circuito è uguale alla somma delle intensità delle correnti che se ne allontanano, oppure, attribuendo un segno alle correnti che arrivano e il segno opposto a quelle che escono dallo stesso nodo, la somma algebrica delle intensità di corrente in un nodo è uguale a zero.

Applicando ora il primo principio di Kirchhoff al nodo A:

$$i = i_1 + i_2 \quad \text{con} \quad i_1 = \frac{V_{AB}}{R_1} \quad \text{e} \quad i_2 = \frac{V_{AB}}{R_2}$$

la resistenza equivalente sarà quel valore che inserita nel circuito al posto del collegamento delle due resistenze fa circolare la stessa corrente i :

$$i = \frac{V_{AB}}{R_{eq}}$$

Ora sostituendo le espressioni delle correnti in $i = i_1 + i_2$ si ottiene:

$$\frac{V_{AB}}{R_{eq}} = \frac{V_{AB}}{R_1} + \frac{V_{AB}}{R_2} \Rightarrow \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Questa rappresenta la regola per le connessioni di resistenze in parallelo (il reciproco della resistenza equivalente è la somma dei reciproci delle singole resistenze). Generalizzando a più resistenze otteniamo

Collegamento di resistori in parallelo

Due o più resistori in parallelo sono equivalenti a un unico resistore avente una resistenza R_{eq} il cui reciproco è uguale alla somma dei reciproci della singole resistenze

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

La d.d.p. fra gli estremi di tale resistore è uguale a quella esistente fra gli estremi di ciascun resistore e la corrente che lo attraversa ha intensità $i = i_1 + i_2 + \dots$, pari alla somma delle intensità di corrente attraverso i singoli resistori.

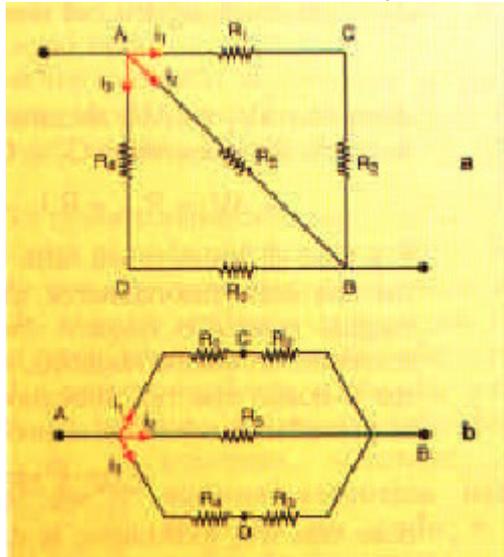
Osservazione:

Si provvederà a svolgere molti esercizi in classe con i ragazzi relativi ai circuiti elettrici con resistenze in serie e in parallelo.

Verifica Sommativi: 1 ora

(1) Nel circuito in figura la d.d.p. offerta dal generatore è 40 Volt e le resistenze valgono $R_1 = 15 \Omega$, $R_2 = 5 \Omega$ e $R_3 = 25 \Omega$.
Calcolare le correnti che attraversano le singole resistenze e le cadute di tensione ai capi delle stesse.

(2) Nel circuito in figura sono noti: $R_1 = R_3 = 80 \Omega$, $R_2 = R_4 = 160 \Omega$, $R_5 = 240 \Omega$.
Nell'ipotesi che la potenza totale assorbita nel circuito sia $P = 1.5 \text{ KW}$ si determini la tensione tra i punti A e B; la corrente in ogni ramo. Scambiando le resistenze R_1 R_2 come cambiano V_{AB} e V_{CD} ?



(3) Se l'intensità di corrente che percorre un conduttore è 3,0A, quando la differenza di potenziale ai suoi estremi è di 12V, la resistenza del conduttore è:

0,25 Ω

4,0 Ω

36 Ω

non calcolabile, in quanto non si conoscono la lunghezza e la sezione del conduttore

(4) Un filo conduttore è tagliato in parti uguali, successivamente collegate fra loro in parallelo. calcolare il numero di parti sapendo che la resistenza del filo è 150 Ω e che la resistenza equivalente del sistema ottenuto è 6 Ω .

(5) Per il montaggio di un circuito, alimentato da un generatore di forza elettromotrice costante, si hanno a disposizione due resistenze, una doppia dell'altra. per ottenere la massima intensità di corrente è necessario inserire nel circuito:

le due resistenze in parallelo

le due resistenze in serie

solo la resistenza maggiore

solo la resistenza minore.

Tempi dell'intervento didattico

Proponiamo una descrizione del susseguirsi delle attività didattiche con i tempi necessari a ciascuna attività. La previsione è da intendersi elastica perché occorre tener conto delle necessità degli studenti.

Corrente elettrica	1h
Resistenza elettrica e leggi di Ohm	2h
I circuiti elettrici in corrente continua	1h
Resistenze in serie e in parallelo	2h
Esercitazioni	2h
Verifica e correzione	2h

Per un totale di 10ore (3 settimane circa di lezione)

Bibliografia

- Ugo Amaldi – “La fisica per i licei scientifici” – Volume terzo - Quarta edizione – Zanichelli Bologna
- Antonio Caforio Aldo Ferilli – “Fisica 3” – Le Monnier Firenze

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.