

DEFINIZIONI

Per quanto concerne le definizioni in tale sede, prima di affrontare uno studio di argomenti dell'elettromagnetismo nell'ambito dell'esposizione lavorativa e di competenza proporzionata alle esigenze di questa pubblicazione è di indubbia utilità affrontare un approccio molto più concettuale nello studio della fisica classica dei *campi elettromagnetici* (CEM) al fine di rendere più agevole la lettura e la comprensione di argomenti che si discostano dalla classica visione della scienza medica. La discussione proseguirà in prima istanza con un'analisi leggermente più dettagliata di argomenti di fisica classica e quantistica nell'ambito dell'elettromagnetismo.

MAGNETISMO

I FENOMENI MAGNETICI FONDAMENTALI

I MAGNETI NATURALI E ARTIFICIALI

Solitamente i magneti naturali sono specificamente denominati come magnetite che è un minerale del ferro. La sua peculiare struttura molecolare dona a tale sostanza la caratteristica di attrarre piccole schegge di ferro.

Come a tutti noto esistono le cosiddette calamite (o magneti artificiali) che possiedono la proprietà di attrarre o respingere altri magneti artificiale. L'attrazione o la repulsione dipende fondamentalmente da come vengono tra loro disposte e quindi messe vicendevolmente in contatto le due calamite. Si noterà infatti, che le due calamite si attraggono vicendevolmente solamente nel momento in cui il loro contatto fisico è specifico in una posizione. Di conseguenza la repulsione si ottiene unicamente nelle condizioni opposte. Tutte le

sostanze che sono in grado di assumere le proprietà di attrarsi e respingersi sono chiamate materiali ferromagnetiche: ferro, nichel, cobalto, e l'acciaio. Queste semplici esperienze indicano che sia la magnetite che le calamite generano nello spazio circostante un campo di forza che viene denominato *campo magnetico*. L'esperienza prima citata permette quindi di suddividere una calamita (a seconda della zona di attrazione o di repulsione) in due poli: *polo nord* e *polo sud*.

Un accorgimento pratico che ci aiuta a comprendere primariamente il peculiare comportamento di una calamita e quindi del campo magnetico è il seguente. Se una calamita, ad esempio di una lunghezza 20 cm e uno spessore di 2 cm venisse suddivisa in due pezzi il polo sud ed il polo nord non verrebbero a loro volta suddivisi in altrettante parti ma le due calamite di "nuova genesi" avrebbero a loro volta un polo nord ed un polo sud e dotate ancora una volta di un campo magnetico proprio. La medesima situazione si verificherebbe nuovamente nel caso in cui le due calamite subissero una nuova suddivisione e così via per le successive: *non è possibile ottenere un polo magnetico isolato*.

Trattandosi di un campo di forza anche il campo magnetico, come tutti gli altri campi di forza (ad es. campo elettrico e campi gravitazionale) possiede un'intensità, un verso, una direzione, e delle linee di forza (curvilinee o rette) al fine di poter essere documentato graficamente. L'intensità del campo magnetico è notoriamente calcolata secondo opportune formule matematiche (v. di seguito), il verso dipende da alcune caratteristiche intrinseche del campo mentre la sua direzione si mantiene uniforme: dal polo sud al polo nord.

DIFFERENZE FONDAMENTALI TRA FENOMENI MAGNETICI ED ELETTRICI

Il fatto che le calamite sono in grado di attrarsi tra di loro potrebbe portare alla conclusione che il campo elettrico e quello magnetico siano sostanzialmente la medesima entità fisica. Ma così non è visto che tra di loro esistono tre fondamentali differenze che li rendono totalmente diversi fra loro.

1. La prima differenza si ricollega direttamente con l'esempio della suddivisione delle calamite fatto in precedenza. Infatti, come si è detto in una calamita non è assolutamente possibile separare il polo nord dal polo sud. Per quanto concerne il campo elettrico esso fonda la sua ragion d'essere sulla presenza di due cariche isolate negative e positive che perentoriamente si attraggono tra di loro.
2. La seconda basilare differenza riguarda il fatto che un campo elettrico agisce costantemente su un'entità fisica unitaria, la carica elettrica, che può essere schematicamente considerata come unitaria. Il campo magnetico invece agisce unicamente e costantemente su una coppia di forze: il polo nord ed il polo sud.
3. La terza fondamentale differenza riguarda le linee di forza dei due campi. Le linee di forza del campo elettrico si generano dalla carica negativa e terminano in corrispondenza della carica positiva. Le linee di forza del campo magnetico non hanno né un'origine e né una fine: attraversano lo spessore della calamita indipendentemente dalla presenza fisica e materiale della stessa.

INFLUENZE RECIPROCHE TRA CORRENTI ELETTRICHE E FENOMENI MAGNETICI

Se si prende una calamita aghiforme e la si pone nelle immediate vicinanze di un cavo, ad esempio in rame collegato ad un circuito aperto (non attraversato da corrente elettrica), l'ago magnetico si assumerà una posizione parallela alle linee di forza del campo magnetico terrestre. Nel momento in cui si chiude il circuito elettrico l'ago magnetico si dispone in una posizione opposta a quella assunta in precedenza: si dispone ortogonalmente rispetto alla lunghezza del cavo in rame. Questa evidenza sperimentale può essere eseguita anche tra due cavi tra loro paralleli e posti ad una certa distanza. Se nei due cavi sono attraversati da una corrente aven-

te in entrambi lo stesso verso in tal caso i due cavi si respingono. Nel caso in cui la corrente che in essi circola ha in ognuno di essi verso opposto i due cavi si attraggono. Nell'insieme queste forze vengono definite *forze elettromagnetiche*. Nel caso in cui il filo metallico ha una forma spirale avvolto su sé stesso (*il solenoide*) il campo magnetico ha delle caratteristiche che verranno analizzate di seguito. Questa semplice esperienza dimostra che il campo elettrico generato dal passaggio della corrente nel cavo influenza alcuni parametri del campo magnetico generato dall'ago e nel contempo il campo elettrico generato dalla corrente elettrica che circola in un cavo influenza quello del secondo filo. Questa situazione nel complesso dimostra che in questi casi è più lecito parlare di *campo elettromagnetico (CEM)* e non di un campo magnetico e di un campo elettrico tra loro totalmente indipendenti.

ORIGINE DEL CAMPO MAGNETICO

Un utile indizio al fine di comprendere l'origine del campo magnetico può derivare dall'esperienza del generatore elettrostatico di Van der Graf. Quest'ultimo, infatti, genera nello spazio circostante un campo magnetico unicamente nel momento in cui le cariche elettriche su di esso presenti sono in movimento. In definitiva, la medesima situazione si crea nel momento in cui un circuito elettrico e attraversato da una corrente elettrica. Tutto ciò sta ad indicare che per la generazione di un campo magnetico è necessario un movimento di cariche elettriche che nel caso del generatore di Van der Graf circolano al suo interno, mentre nel caso del cavo in rame le stesse lo attraversano in tutta la sua lunghezza. *Da ciò si evince che il campo magnetico è generato da cariche elettriche in movimento.* Per quanto concerne la visione a livello microscopico di una calamita o della magnetite ciò che in essi genera un campo magnetico sono gli elettroni che con il loro perenne movimento intorno al nucleo (il cosiddetto *spin*) generano il campo magnetico.

Ma, come è noto, l'esistenza dello spin non è una caratteristica peculiare delle calamite o della magnetite ma di tutti gli elettroni degli atomi della tabella periodica degli elementi. Ciò che conferisce alle cosiddette sostanze paramagnetiche la caratteristica di generare un campo magnetico dipende u-

nicamente dalla polarizzazione degli spin degli elettroni. Infatti, nella magnetite e nelle calamite gli spin degli elettroni ruotano tutti nella stessa direzione (momento angolare non nullo) mentre in tutte le altre sostanze gli spin degli elettroni ruotano nelle più disparate direzioni dando un momento angolare nullo e per tale motivo non generano nello spazio circostante un campo magnetico.

IL CAMPO MAGNETICO

IL CAMPO MAGNETICO DI UN SOLENOIDE

Come detto in precedenza il campo magnetico possiede un'intensità, un verso ed una direzione. Ogni campo di forza che abbia queste caratteristiche viene definito come campo di forza vettoriale. In questa direzione quindi il campo magnetico può essere anch'esso considerato *un campo di forza vettoriale*. Per definire in modo dettagliato le caratteristiche di un campo di forza e quindi del campo magnetico si consideri un campo magnetico generato da un cavo conduttore avvolto su sé stesso come una spira: il cosiddetto *solenoid*. La principale caratteristica del campo magnetico generato dal solenoide consiste nel fatto che nel suo interno il campo magnetico H è uniforme: le sue linee di forza sono tra loro parallele. Per quanto riguarda il verso esso per convenzione segue la regola della vite che viene avvitata (in senso orario) seguendo il verso della corrente di cariche elettriche. La direzione del campo magnetico è parallela alle sue linee forza passanti nella parte centrale del solenoide. Facendo passare nel solenoide correnti di diverse intensità si trova la seguente relazione:

$$H = h \frac{in}{l} \quad (1)$$

$$h = \frac{4\pi}{c} c \quad (c = \text{velocità della luce})$$

i = intensità della corrente,

n = numero di spire,

l = lunghezza del solenoide.

Da questa formula si ricava l'intensità del campo magnetico H che nel sistema internazionale M.K.S. si misura in *amperspira al metro* mentre nel sistema G.C.S l'unità di misura del campo magnetico è l'oersted.

IL CAMPO MAGNETICO IN UN FILO RETTILINEO

Per quanto riguarda le caratteristiche del campo magnetico generato da un filo rettilineo, la sua direzione è perpendicolare al piano passante per il filo. Il verso rispetta sempre la regola della vite coincidente con la direzione dell'intensità della corrente di cariche elettriche. Infine, l'intensità del campo magnetico H è espressa dalla seguente regola:

$$H = \frac{h}{2\pi} \frac{i}{r} \quad (\text{legge di Biot e Savart}) \quad (2)$$

$$h = \frac{4\pi}{c} c \quad (c = \text{velocità della luce})$$

i = intensità della corrente,

r = distanza presente tra il filo ed il punto

P nello spazio nel quale si vuole misurare l'intensità di H .

PROPRIETÀ GENERALI DEL CAMPO MAGNETICO

Le tre proprietà fondamentali del campo magnetico sono le seguenti:

1. *in un dato punto P dello spazio del campo magnetico H generato da un circuito di forma qualsiasi è sempre proporzionale all'intensità i della corrente;*
2. *linee chiuse concatenate con il circuito (v. pag. 7) il cui verso è dato dalla regola della vite;*
3. *se lo spazio è pieno di un mezzo omogeneo e isotropo il vettore H ha in ogni punto lo stesso valore che avrebbe in quel punto se lo spazio fosse vuoto. Vale a dire che, se il mezzo è omogeneo ed isotropo, il campo magnetico H è indipendente dal mezzo.*

Queste tre proprietà possono essere riassunte in una sola relazione matematica che definisce le proprietà generali del campo magnetico: *la legge della circuitazione del vettore H (campo magnetico)*. Se si paragona un'unica linea di forza chiusa (senza un inizio e senza una fine) del campo magnetico H ad un *percorso s* chiuso cioè circolare la legge della circuitazione è definita dalla seguente formula:

$$C(H) = hin' \quad (3)$$

$$h = \frac{4\pi}{c} c \quad (c = \text{velocità della luce})$$

i = intensità della corrente.

n' = numero di spire del solenoide del circuito

elettrico concatenato con il percorso s

(linea di forza di un campo magnetico esterno).

Nel caso di un campo di forza la circuitazione corrisponde al lavoro fatto dal campo di forza in questione per passare da un punto iniziale ad un punto finale di quel *percorso s* chiuso (circolare). L'esperienza pratica dimostra che in questi casi visto che il percorso è chiuso, il lavoro fatto dal campo di forza è nullo. Quindi anche nel caso del campo magnetico (H) si otterrà la seguente uguaglianza:

$$C(H) = 0 \quad (4)$$

Tutti i campi di forza, come il campo elettrico e gravitazionale, che abbiamo un lavoro nullo nell'ambito di un *percorso chiuso s* sono definiti *campi conservativi*.

FORZA ESERCITATA DA UN CAMPO MAGNETICO SU UN FILO PERCORSO DA CORRENTE: IL VETTORE DI INDUZIONE MAGNETICA B

Un'esperienza pratica che ci permette di comprendere l'importanza del vettore induzione magnetica si basa sulla seguente osservazione macroscopica. Si tratta di un dispositivo molto simile ad una classica bilancia a due piatti. In questo caso però il piatto di sinistra è stato sostituito da un filo rettilineo collegato ad un circuito. Nel piatto di destra sono posti dei pesi per bilanciare la forza che di seguito verrà descritta.

Nell'area circostante il cavo rettilineo, posto nella parte sinistra, del dispositivo di misura sarà presente un campo magnetico generato da opportuni solenoidi ubicati al di sotto del filo *l*. Se dopo aver equilibrato la bilancia si fa passare corrente nel cavo posto dalla parte opposta alla bilancia si noterà che esso è soggetto ad una forza perpendicolare al filo che tende a spostarlo in alto. Per riequilibrare i due piatti sarà necessario togliere uno dei pesi posti nel piatto di destra. Questa forza di chiara origine magnetica viene chiamata *induzione magnetica* ed ha le seguenti caratteristiche vettoriali:

- direzione perpendicolare al piano individuato dal segmento della retta;
- anche in questo caso il verso segue la regola della vite nel momento in cui essa è avvitata partendo dalla direzione e verso della corrente di intensità *i* a quella della componente di H (del solenoide);

- l'intensità dell'induzione magnetica è proporzionale all'intensità della corrente *i* che circola nel filo *l*, all'intensità della componente H del solenoide posto sotto il filo *l* e a una costante di proporzionalità chiamata μ che dipende dal mezzo nel quale si trovano tutte le componenti del dispositivo sperimentale;

In definitiva l'intensità dell'induzione magnetica B può essere calcolata dalla seguente formula:

$$B = \mu H \quad (5)$$

Dove μ , come si è detto, è la costante di proporzionalità che dipende dal mezzo nel quale il circuito e quindi il sistema si trova: *permeabilità magnetica della materia* μ_r . Ovviamente se il sistema è ubicato nel vuoto in tal caso μ viene chiamata come *permeabilità magnetica nel vuoto* μ_0 che è pari ad uno e quindi la formula precedente diventa:

$$B = H \quad (6)$$

L'unità di misura dell'induzione magnetica è il Gauss nel sistema G.C.S. mentre nel sistema internazionale M.K.S. è il Tesla. Dopo opportune estrapolazioni matematiche si ottiene che:

$$1 \text{ Tesla} = 10^4 \text{ Gauss}$$

La differenza esistente tra B ed H è che l'induzione magnetica B è strettamente dipendente dal mezzo al contrario di H che invece rimane indipendente da esso.

Tra le due grandezze vettoriali generalmente quando si parla di intensità di campo magnetico ricavato dai rilevamenti mediante apposita strumentazione si preferisce riferire tutti i parametri calcolati all'induzione magnetica B e non ad H innanzi tutto perché le misurazioni sono effettuate in un mezzo e poi perché anche l'induzione magnetica B segue l'importantissima regola (già citata in precedenza) secondo la quale *le linee di forza del campo vettoriale induzione magnetica sono sempre linee chiuse (non hanno né un inizio e ne una fine) ed hanno sempre verso e direzione costante (dal polo sud al polo nord) qualunque sia il sistema che genera il campo di forza vettoriale*.

LE PROPRIETÀ MAGNETICHE DELLA MATERIA

La permeabilità magnetica della materia μ_r , dipende dalle sue caratteristiche atomiche dipendenti quindi dal comportamento intrinseco degli elettroni ed in secondo luogo del nucleo. Da questo punto di vista la materia viene classicamente suddivisa in tre gruppi:

1. le *sostanze diamagnetiche* per le quali la costante di permeabilità μ_r è solamente di pochissimo meno impermeabile del vuoto ($\mu_r = 0,999830$). In questa categoria appartengono i metalli superconduttori che sono totalmente impermeabili alle linee di forza del campo magnetico. Essi creando una barriera che impedisce alle linee di forza del campo magnetico di penetrare in essi sono considerate sostanze *diamagnetiche perfette*. Altre sostanze rientranti in questo gruppo sono l'acqua, l'argento, il bismuto, il rame, etc;
2. le *sostanze paramagnetiche* sono quelle sostanze che hanno una costante di permeabilità lievemente maggiore all'unità. Questo indica che queste sostanze hanno una permeabilità magnetica μ_r lievemente maggiore a quella del vuoto (all'unità). A livello pratico sia le sostanze diamagnetiche, ad eccezione dei superconduttori, che le sostanze paramagnetiche possono essere approssimate all'unità (cioè al vuoto). Esempi di sostanze paramagnetiche sono l'aria, l'alluminio, il platino, etc;
3. le *sostanze ferromagnetiche* sono invece quelle sostanze che hanno un comportamento magnetico che ricorda molto da vicino la magnetite. Infatti, è proprio grazie ad esse che vengono costruite le calamite. Esempi di queste sostanze sono il ferro, il cadmio, il nichel e molte loro leghe. Le sostanze ferromagnetiche hanno la peculiare caratteristica magnetizzarsi (le calamite) nel momento in cui si trovano "immerse" in un campo magnetico. Inoltre, nel momento in cui quest'ultimo viene annullato le sostanze ferromagnetiche mantengono la cosiddetta *magnetizzazione residua*. Queste considerazioni concettuali sono descritte in quella che viene chiamata *curva di isteresi magnetica*. La loro costante di permeabilità magnetica μ_r è incostante. È proprio grazie a questa loro peculiare caratteristica che è possibile creare le calamite.

A questo punto è di sicura utilità capire cosa accade a livello microscopico, ad esempio, in un cilindro di ferro nel momento in cui esso si trova nelle vicinanze di un campo magnetico. Questo concetto era già stato accennato in precedenza. Infatti, ponendo che quel cilindro non sia magnetizzato gli elettroni dei suoi atomi hanno degli spin (rotazione dell'elettrone su sé stesso) dotati di momento angolare nullo nel senso che le loro rotazioni avvengono in tutte le direzioni dello spazio.

Nel momento in cui quel cilindro in ferro subisce sotto l'influsso di un campo magnetico esterno la magnetizzazione, gli spin degli elettroni della sola parte superficiale del cilindro si orientano tutti nella stessa direzione (*polarizzazione magnetica*) dando origine ad un campo magnetico. Infatti, gli elettroni più interni del cilindro non sono magneticamente polarizzati. Questo comportamento permette di paragonare il comportamento di un cilindro di ferro ad un solenoide: *equivalenza di Ampere*.

IL FLUSSO DI INDUZIONE MAGNETICA Φ (B)

Fatte queste considerazioni sul vettore induzione magnetica in tale sede è sicuramente utile accennare il concetto di *flusso di un campo di forza vettoriale* applicato all'induzione magnetica nell'ambito di una superficie chiusa. Questo concetto è ovviamente applicabile anche al campo elettrico con delle importanti differenze. Infatti, nel caso dell'induzione magnetica le sue linee di forza entrano ed escono attraverso una superficie chiusa in modo continuo, cioè senza un inizio e senza una fine: sono quindi linee di forza chiuse. Per tale motivo il flusso dell'induzione magnetica è sempre uguale a zero.

$$\Phi (B) = 0 \quad (7)$$

A titolo di confronto il flusso dell'induzione del campo elettrico Φ (E) ha invece un valore maggiore di zero trattandosi di un campo di forza dipendente da un certo numero di cariche presenti sulla superficie, ad esempio di un conduttore in condizioni di staticità. Questo sta ad indicare che le linee di forza nel caso del campo elettrico avendo un'origine da una carica elettrica, ad esempio positiva "vedono" la loro fine nella loro controparte, cioè in una carica negativa.

La seconda ed ultima legge fondamentale del vettore induzione magnetica B è quella della circolazione già descritta per il vettore campo magnetico H (v. pag. 3).

APPLICAZIONI PRATICHE DELLE FORZE DOVUTE AI CAMPI MAGNETICI

AMPEROMETRI, GALVANOMETRI E VOLTMETRI

Gli amperometri e i galvanometri sono strumenti destinati alla misura della corrente elettrica che circola all'interno di un conduttore di un circuito. Mentre gli amperometri sono deputati alla misura di correnti di alta intensità i galvanometri hanno invece la funzione di misurare correnti elettriche di piccole intensità.

Entrambi basano il loro principio di funzionamento sull'applicazione pratica delle forze elettromagnetiche. Entrambi sono costituiti da un magnete posto all'interno di un solenoide (chiamato tecnicamente bobina) collegato in serie al circuito elettrico al quale si vuole misurare l'intensità della corrente.

Inoltre, tale bobina è meccanicamente collegata ad un indicatore su scala munita di apposita taratura con la possibilità di ruotare su sé stessa. Il ritorno dell'indicatore allo zero della scala di taratura è garantito dalla molla di ritorno.

Nel momento in cui il circuito elettrico viene chiuso a livello della bobina (solenoidale) si crea un campo magnetico che interagendo in modo repulsivo con quello del campo magnetico statico della calamita determina la rotazione dell'indicatore a livello della scala di taratura.

I galvanometri a differenza degli amperometri hanno una bobina notevolmente più sensibile alle variazioni di corrente ed inoltre la molla di ritorno collegata alla bobina e quindi all'indicatore è molto più sensibile degli amperometri. Sia gli amperometri che i galvanometri sono sempre inseriti nel circuito elettrico in serie.

Per quanto concerne i *voltmetri* essi sono innanzi tutto deputati a misurare la differenza di potenziale espressa in volt ed hanno una struttura simile ai galvanometri con una differenza sostanziale: nei circuiti elettrici i voltmetri sono sempre inseriti in parallelo, rispetto ad una resistenza R del circuito molto elevata.

GLI ELETTROMAGNETI

Gli elettromagneti sono costituiti da un cilindro in materiale ferromagnetico avvolto da un solenoide. Nel momento in cui la si chiude il circuito elettrico nel quale sono integrati si crea un campo magnetico di elevata intensità. Un elettromagnete potenzialmente dotato di un campo elettrico di intensità maggiore rispetto all'utilizzo del semplice cilindro in ferro è il cosiddetto traferro costituito da un elettromagnete a forma di C il campo magnetico che si forma tra le facce adiacenti ha un'intensità notevolmente elevata. Per quanto riguarda la magnetizzazione residua generalmente essa è talmente bassa da poter essere considerata come nulla. Gli elettromagneti sono ad esempio dei componenti strutturali dei motori elettrici e di molti dispositivi adibiti a far compiere azioni meccaniche a componenti strutturali integrati nei dispositivi stessi. I più noti in questa direzione sono *il relè, il telegrafo, il telefono e l'altoparlante*.

Per quanto riguarda *il relè* esso è un dispositivo costituito da un elettromagnete adibito a chiudere più circuiti contemporaneamente nel momento in cui nel relè circola corrente. Questo risultato si ottiene con una lamina in ferro dotata di una certa lunghezza direttamente saldata ad un traferro. Nelle immediate vicinanze di quest'ultima è riposta una seconda lamina dotata di movimento in direzione verticale. Nel momento in cui nel traferro circola corrente la lamina mobile si sposta verso la lamina fissa prendendo con essa contatto: in tal modo è possibile chiudere più circuiti contemporaneamente.

Il telegrafo è un dispositivo dotato di un elettromagnete posto in un circuito avente un generatore di tensione un interruttore avente la funzione di aprire e chiudere il circuito e una penna scrivente collegata alla seconda lamina dell'elettromagnete. Nel momento in cui viene chiuso il circuito quest'ultima stabilisce il contatto fisico con la del traferro trascinando con sé la penna scrivente che lascia la propria traccia di inchiostro su un rullo di carta scorrevole. Il tal modo a seconda di come si modula l'interruttore del circuito si riesce a lasciare un segno. Infine, mediante l'utilizzo del cosiddetto alfabeto Morse è possibile lasciare sul rullo di carta un messaggio di qual si voglia natura.

Il telefono è costituito da un circuito nel quale sono integrati un generatore di tensione, un microfono ed un ricevitore. Il microfono contiene nel suo interno dei granuli di carbone dotati della loro naturale capacità di variare la resistenza e quindi l'intensità della corrente a seconda di come essi vengono meccanicamente sottoposti a forza pressoria. Infatti, essi all'interno del microfono sono stipati in un piccolo contenitore costituito da sottili lamine metalliche. L'azione della forza pressoria nel caso del telefono è esercitata dalle onde sonore emesse dalla voce umana. In questo sistema si ottiene una modulazione della resistenza che a sua volta influenza l'intensità della corrente che agisce in ultima analisi sul ricevitore costituito, appunto, da un piccolo elettromagnete.

Per quanto concerne, infine, l'*altoparlante* esso è costituito da una bobina avvolta attorno ad un magnete con la sostanziale differenza rispetto agli elettromagneti convenzionali che quest'ultima (la bobina) non è in stretto contatto fisico con la calamita, al fine di permettere a quest'ultima di poter muoversi in senso longitudinale. In magnete è a sua volta in contatto con una membrana (in carta, in plastica, in kevlar o in carbonio) solitamente a forma di cono in contatto con l'aria esterna al diffusore. La modulazione dell'intensità di corrente e della frequenza del segnale audio che attraversa la bobina mediante il campo magnetico variabile da essa generato interagisce con il campo magnetico statico della calamita spostandola in senso longitudinale alla stessa frequenza di modulazione del segnale che arriva alla bobina. Questo sistema si riflette, mediante la membrana, esternamente al diffusore creando le opportune onde acustiche che in ultima analisi sono percepite dal nostro organo sensoriale acustico.

ELETTROMAGNETISMO

CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI LINEARMENTE VARIABILI NEL TEMPO

L'INDUZIONE ELETTROMAGNETICA: LE LEGGI DI FARADAY-NEUMANN E DI LENZ

L'induzione elettromagnetica fu scoperta nel 1831 dal fisico M. Faraday mettendo in pratica il seguente dispositivo pratico. Una bobina collegata ad un galvanometro mediante i suoi due e-

stremi viene "interfacciata" ad un magnete nord-sud con una forma di parallelepipedo allungato. Il loro contatto reciproco avviene unicamente secondo la seguente procedura: si deve far passare il magnete N-S nello spazio interno della bobina dall'alto verso il basso senza interruzioni. Seguendo tali accorgimenti si noterà che il galvanometro segnerà il passaggio di un'intensità di corrente nella zona positiva o negativa della scala a seconda della posizione sull'asse verticale del magnete N-S. Queste correnti sono state denominate *correnti indotte* ed il fenomeno alla base di esse è stato denominato *induzione elettromagnetica*.

Di seguito furono messi a punto altri dispositivi del genere atti a dimostrare questo fenomeno, come ad esempio, l'utilizzo di una seconda bobina collegata ad un generatore di tensione ad un reostato ed a un galvanometro al posto del magnete N-S. Si notava infatti, che nel momento in cui si spostava il cursore del reostato il galvanometro segnava la presenza di correnti indotte. Il circuito dotato di reostato è denominato *circuito inducente* mentre il secondo è denominato *circuito indotto*. Infine, nel caso in cui negli spazi centrali delle due bobine del dispositivo prima descritto, venisse inserito un magnete di forma cilindrica si osserva *un aumento di intensità* delle correnti indotte.

In tutti i casi considerati il circuito indotto è per così dire il circuito "passivo" nel senso che la sua bobina in tutte e tre le esperienze risente del campo magnetico generato dai circuiti inducenti nelle loro diverse versioni di verifica sperimentale. Inoltre, la terza versione del dispositivo sperimentale dimostra chiaramente che all'aumentare della permeabilità magnetica della calamita inserita nelle bobine aumenta l'intensità delle correnti indotte. Queste esperienze dimostrano che la presenza delle correnti indotte è un fenomeno che primariamente interessa il campo magnetico visto la sua presenza è intrinseca in qualsiasi fenomeno di origine magnetica ma soprattutto del vettore induzione magnetica Φ (B) che, come è noto, permette di relazionare vicendevolmente la costante di permeabilità magnetica del mezzo (le esperienze non sono state condotte nel vuoto e quindi B è diverso da H) con il campo magnetico.

Queste conclusioni portano ad una importante conclusione:

- *in un circuito chiuso si genera una corrente indotta tutte le volte che le linee di forza del flusso di induzione magnetica Φ (B) del circuito inducente concatenato con il circuito indotto variano nell'unità di tempo. Questo sta ad indicare che la presenza nel circuito indotto delle correnti indotte è misurabile unicamente nel momento in cui si verifica la variazione del flusso del vettore induzione magnetica Φ (B) del circuito inducente in relazione alla variazione temporale Δt .*

La definizione prima enunciata sta ad indicare che ad esempio nell'ambito del primo dispositivo sperimentale il parallelepipedo magnetico deve obbligatoriamente effettuare uno spostamento verticale affinché si possano osservare sul galvanometro del circuito indotto correnti indotte. A questo punto risulta di chiara utilità definire l'intensità ed il verso della corrente indotta. La determinazione dell'intensità delle correnti indotte è possibile solamente mediante la *legge di Faraday-Neumann* (1847). La *legge di Lenz* invece ci permette di definirne il verso. La legge di Faraday-Neuman dice che *la forza elettromotrice delle correnti indotte è legata alla variazione di flusso $\Delta\Phi$ (B) dell'induzione magnetica:*

$$\Delta\Phi (B) = \Phi_2 - \Phi_1 \text{ (legge di Faraday-Neumann) (8)}$$

Φ_2 = valore di Φ (B) nell'istante di tempo $t_2=t_1 + \Delta t$

Φ_1 = valore di Φ (B) nell'istante di tempo t_1

Da ciò si ricava che, *se nell'intervallo di tempo Δt il flusso di induzione magnetica concatenato con un circuito varia con un valore $\Delta\Phi$ (B) la forza elettromotrice indotta è proporzionale al rapporto tra la variazione $\Delta\Phi$ (B) del flusso concatenato e l'intervallo di tempo Δt in cui tale variazione ha avuto luogo.*

La forza elettromotrice indotta del circuito indotto (che sia rigorosamente chiuso) da quindi origine alla corrente indotta. Come è stato detto, nella parte generale riguardanti i fenomeni magnetici qualsiasi circuito che sia attraversato da una corrente elettrica genera a sua volta nello spazio circostante un campo magnetico. Per quanto riguarda infine, il verso della corrente indotta la legge di Lenz afferma che: *il verso della corrente indotta e_i è sempre tale da opporsi alla variazione di flusso $\Delta\Phi$ (B) che genera la stessa corrente indotta e_i .*

Questa legge può essere interpretata anche considerando i due campi magnetici in gioco: quello del circuito indotto e quello del circuito inducente. Nel momento in cui aumenta l'intensità del campo magnetico (o il flusso dell'induzione magnetica $\Delta\Phi$ (B)) del circuito inducente, il campo magnetico creato dalle correnti indotte del circuito indotto tende a diminuire di intensità e viceversa nel momento in cui l'intensità del campo magnetico (o il flusso dell'induzione magnetica $\Delta\Phi$ (B)) del circuito inducente diminuisce, aumenta l'intensità del campo magnetico creato dalle correnti indotte del circuito indotto. In definitiva quanto su detto può essere agevolmente descritto dalla seguente formula matematica (legge di Lenz):

$$e_i = - \frac{\Delta\Phi (B)}{\Delta t} \text{ (sistema M.K.S.) (9)}$$

$$e_i = - \frac{1}{c} \frac{\Delta\Phi (B)}{\Delta t} \text{ (nel sistema C.G.S.) (10)}$$

Il segno meno delle formule su elencate ha appunto la funzione di descrivere il tipico comportamento del campo magnetico del circuito indotto che ovviamente coincide con quanto enunciato dalla legge di Lenz. Per quanto concerne le unità di misura e_i si misura in *volt*. Per quanto concerne invece $\Delta\Phi$ (B) la sua unità di misura è il *weber*.

PROPRIETÀ GENERALI DEL CAMPO ELETTRICO INDOTTO

Fino a questo momento si è sempre parlato di correnti indotte. Ma come è ben noto tutto le volte che si parla di corrente elettrica entra in gioco il campo elettrico E. Infatti, in un qualsiasi conduttore (bobina compresa) che sia attraversato da corrente elettrica subisce a livello microscopico uno spostamento di cariche elettriche sottoforma di elettroni: essi corrispondono con il cosiddetto *mare di elettroni di Fermi*. Hanno una velocità di spostamento molto bassa (30 cm/s) e sono nel contempo responsabili della resistenza (espressa in ohm) tipica di ogni conduttore metallico. Alla luce di quanto fin qui detto si può enunciare che: *la forza elettromotrice indotta e_i rappresenta il lavoro fatto dal campo elettrico E quando la carica unitaria si sposta da un estremo all'altro del cavo del circuito chiuso.* Inoltre, dall'esperienza si ricava