



Zeno Martini (admin)

FARADAY-LENZ

1 January 2004

Obiettivi culturali e prerequisiti.

L'argomento si presta ad un approfondimento delle basi di cultura scientifica in possesso degli allievi. Per questo scopo la loro attenzione è posta sul modo logico-simbolico con cui, dall'osservazione dei fenomeni fisici da inquadrare nella nozione di elettromagnetismo, si arriva alla formulazione delle leggi che quantificano i fenomeni suddetti, fornendo contemporaneamente uno strumento di intervento sugli stessi sia ai fini di utilizzazione pratica che di pura conoscenza.

Le leggi fisiche sono l'interfaccia che pone in comunicazione la mente dell'uomo con il mondo esterno. Esse non sono il mondo fisico, ma dei modelli costruiti con i simboli su cui la mente opera, correlati tra loro dalla logica, comprensiva sia dei procedimenti induttivi che di quelli deduttivi.

Tenendo presente sia il fine di pura conoscenza che quello applicativo i prerequisiti richiesti per l'introduzione della materia generalmente sono già in possesso degli allievi di una terza ITIS: intensità di corrente elettrica, tensione elettrica, energia.

E' certamente utile approfondire la conoscenza di strumenti matematici quali la nozione di campo vettoriale ed il concetto di valore istantaneo di una grandezza fisica come limite di un valore medio in un intervallo di tempo i cui estremi si avvicinano fino a confondersi con l'istante stesso. Si vuole porre tra l'altro in evidenza che la matematica mette a disposizione del ricercatore strumenti potenti e generali, capaci di intervenire nell'interpretazione di fenomeni fisici, che inizialmente possono apparire tra loro diversi ma che dal punto di vista simbolico possono essere trattati nello stesso modo. Porvi l'accento permette di intravedere un campo di indagine cui la fisica moderna tende: la teoria dell'unificazione.

Ipotesi di lavoro: come si apprende

Il bambino prima costruisce la frase poi arricchisce il suo vocabolario.

All'obiezione che alcuni concetti possono non essere immediatamente assimilati dall'allievo, si può contrapporre l'idea che la conoscenza avvenga per approssimazioni successive. Del resto il fenomeno fisico si presenta a noi nella sua globalità e non spezzettato in segmenti di difficoltà graduata. Lo si deve dunque

affrontare coscienti che inizialmente se ne avrà una conoscenza grossolana che sarà però via via affinata mediante il ritorno ciclico sugli argomenti trattati.

Solo dopo questo processo si arriverà alla sua completa comprensione e si sarà in grado di suddividerlo in segmenti, ognuno in sé semplice, e che, uniti, descriveranno il fenomeno compiutamente nella sua globalità.

Il problema specifico

Introdotta il concetto di campo vettoriale con tutte le sue principali definizioni (linee di forza, flusso, circuitazione ecc.), precisato il concetto di valore medio di una grandezza variabile ed il modo in cui dal valore medio si passa al valore istantaneo, si possono richiamare esempi di campi che già sono stati trattati nelle diverse discipline tecniche: il campo gravitazionale, il campo elettrostatico, il campo di velocità dei fluidi, il campo di corrente. Ci si accorge che in ognuno di questi campi si arriva a definire una relazione che lega due grandezze utilizzate nella descrizione del campo. Il legame tra di esse è determinato da un parametro caratteristico del mezzo fisico che determina lo spazio in cui il campo è presente. Le due grandezze possono essere distinte, da un punto di vista pratico, attribuendo ad una di esse il ruolo di *causa* all'altra il ruolo di *effetto*. Si tratta di una distinzione che ha, una funzione essenzialmente pratica, comoda per fini tecnici, ma che la fisica moderna tende ad eliminare. Il legame può essere posto nella forma simbolica:

$$\textbf{Effetto} = \textbf{Funzione (Causa)}$$

Matematicamente si può scrivere:

$$\textbf{E}=\textbf{F}*\textbf{C}$$

- E: effetto;
- C:Causa;
- F: caratteristica del mezzo.

La causa tecnica fondamentale del campo magnetico è l'intensità di corrente elettrica. Si deve anche considerare il numero di rotazioni complete che le cariche elettriche farebbero, nel caso di corrente continua, per tornare al punto di partenza (spire). Da questo punto di vista la corrente elettrica o, meglio, il prodotto dell'intensità di corrente per il numero delle spire assume il nome di forza magnetomotrice (*f.m.m.*). L'effetto che consideriamo è l'insorgere di una forza elettromotrice (*f.e.m.*) in un circuito che assume una posizione variabile nel tempo rispetto alle linee di forza magnetiche o rispetto al quale le linee di forza magnetiche cambiano di orientazione e/o densità. L'effetto è facile notarlo con semplici esperienze di laboratorio, ad esempio muovendo un magnete permanente od elettromagnete nei pressi di una bobina ai cui capi è collegato un voltmetro. Si

può osservare che movimenti opposti generano effetti (tensioni) di segno opposto e che movimenti identici effettuati a velocità maggiore determinano effetti più intensi. Le osservazioni precedenti sono interessanti ma qualitative: occorre ricercare una legge quantitativa rigorosa se si vuole ritenere di aver compreso compiutamente il fenomeno. L'esperienza descritta induce a dire che la forza elettromotrice che si sviluppa nel circuito è con ogni probabilità proporzionale alla velocità con cui avviene la variazione della porzione di campo magnetico abbracciata dal circuito. In altre parole si può scrivere una legge del tipo:

$$f.e.m. = \frac{\Delta Campo}{\Delta tempo}$$

Per quel che riguarda l'intervallo di tempo non ci sono dubbi: è l'intervallo che intercorre dal momento in cui ha inizio la nostra osservazione fino al momento in cui la stessa si conclude. Se osserviamo il voltmetro ci accorgiamo che il valore misurato varia nel tempo: considereremo pertanto un parametro globale che possa caratterizzare l'insieme dei valori, il valore medio, ad esempio, matematicamente così definito: suddiviso l'intervallo di tempo in n parti, se n è abbastanza elevato, si può considerare come valore caratteristico dell'intervallo i -esimo la media aritmetica dei valori assunti agli estremi di questo intervallo. La tensione media sarà allora definita come la somma degli n prodotti intervallo di tempo i -esimo per il valore caratteristico di tensione di quell'intervallo, diviso l'intero intervallo di tempo. Brevemente, in forma matematica:

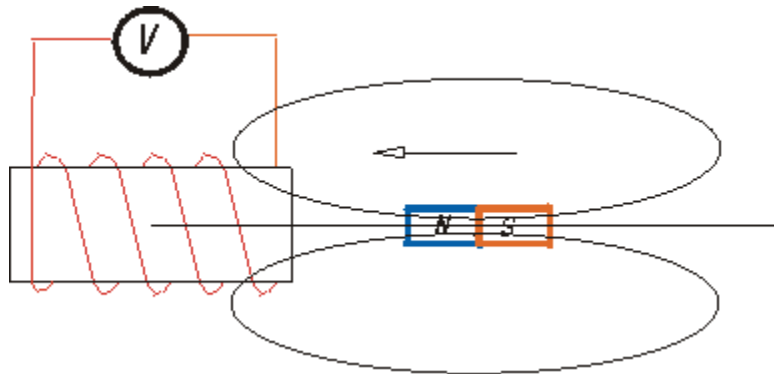
$$E_{medio} = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^n u_i \cdot \Delta t_i$$

Risultano così definite anche le dimensioni fisiche della grandezza che caratterizza la variazione di campo. La tensione si misura in volt, il tempo in secondi, la "variazione di campo" in volt*secondo che chiameremo *weber*. Si può ovviamente definire un simbolo per rappresentare la grandezza che abbiamo momentaneamente chiamato variazione di campo. Per meglio identificarla ricorriamo alle nozioni matematiche acquisite sui campi vettoriali. Se il campo è rappresentabile con le linee di forza la "variazione di campo" da considerare non è altro che il variare della densità e dell'inclinazione di queste linee rispetto alla superficie racchiusa dal circuito elettrico. Ora, la grandezza che matematicamente descrive quanto detto è il flusso di un vettore. Possiamo in definitiva affermare che:

il valore assoluto della forza elettromotrice media indotta in un circuito è proporzionale alla velocità con cui varia il flusso magnetico abbracciato dal circuito e la costante di proporzionalità corrisponde al numero di spire.

$$E_m = N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Abbiamo evidentemente fatto, giunti a questo punto, un bel passo. E' però evidente che si tratta di una legge dedotta da considerazioni teoriche: per poterla accettare occorre verificarla sperimentalmente. Ricordiamo cosa si è fatto per riconoscere la legge di Ohm per i conduttori o come si è verificata la legge sul condensatore. Nel primo caso misurata con un voltmetro una tensione variabile ai capi del conduttore e, con un amperometro la corrente che l'attraversa, riportando in una tabella i valori delle due grandezze si costruisce un grafico che è una retta: la legge di Ohm non è altro che l'equazione matematica di questa retta. Nel caso del condensatore, costruendo una tabella con i valori della corrente di carica in istanti successivi dall'inizio del processo fino al suo pratico completamento, si ottiene un grafico che si riconosce essere di tipo esponenziale decrescente. Dalle caratteristiche di questa curva potremo ricavare le proprietà principali del condensatore: in particolare, misurando l'area sottesa dalla curva della corrente troveremo un valore proporzionale alla tensione finale esistente sul condensatore. L'area ha le dimensioni della carica elettrica essendo il prodotto di intensità di corrente per tempo e la costante di proporzionalità tra la carica e la tensione definisce la capacità del condensatore. Anche nel caso della legge di Faraday possiamo immaginare di procedere in modo simile. Organizziamo una esperienza in cui produciamo variazioni identiche di flusso magnetico in tempi diversi.



Possiamo ritenere di produrre variazioni identiche del flusso magnetico concatenato con il circuito se le posizioni relative iniziali e finali del magnete e del circuito elettrico sono sempre le stesse. Al circuito è collegato un voltmetro (o, ancora meglio, l'ingresso analogico della scheda di acquisizione dati di un computer) . Osservando i grafici tensione-tempo che si ottengono analizzando i dati raccolti, noteremo che l'area sottesa dalla curva di tensione è una costante. Potremo allora affermare che l'altezza del rettangolo che ha quell'area è inversamente proporzionale all'intervallo di tempo corrispondente alla durata del fenomeno. L'altezza di quel rettangolo non è altro che il valore medio della tensione indotta E_m , e l'area costante non potrà altro che dipendere da ciò che nell'esperienza è mantenuto costante, la posizione finale e posizione iniziale che definiscono la variazione complessiva del flusso. Nella posizione iniziale il circuito elettrico sarà concatenato con un certo flusso magnetico F_i , in quella finale da un valore F_f . Sintetizzando con la matematica:

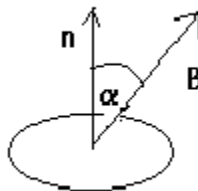
$$E_m = k \cdot \frac{1}{t_f - t_i} = k' \cdot \frac{\Phi_f - \Phi_i}{t_f - t_i}$$

Ripetendo l'esperienza con circuiti aventi un diverso numero di spire potremo riconoscere che K' è legato al numero di spire, oppure potremo introdurre il concetto di flusso concatenato con il circuito come $\Phi_c = k' \cdot \Phi$ e scrivere, avendo posto $\Delta t = t_f - t_i$

$$E_m = \frac{\Delta \Phi_c}{\Delta t}$$

In definitiva, arrivare ad una definizione quantitativa del fenomeno, quindi verificare la legge.

Nella discussione precedente non si è accennato alla polarità della tensione. Poiché, come possiamo facilmente verificare essa cambia (basta scambiare la posizione finale con quella iniziale) potremo pensare di legarla al segno del flusso. E' necessario allora precisare le convenzioni da adottare per stabilire il segno del flusso e la polarità della tensione indotta. Un problema formale simile è stato affrontato con la legge di Ohm. Indicando come positiva la corrente convenzionale che, attraverso il conduttore, fluisce dal punto a potenziale più alto V_i verso il punto a potenziale più basso V_u , si può scrivere $U = R \cdot I$ essendo $U = V_i - V_u$. Indicando come positiva la corrente opposta I' si deve scrivere $U = -R \cdot I'$. Si è scelta la prima convenzione, chiamata convenzione dell'utilizzatore, perché in un utilizzatore la corrente convenzionale va dal punto a potenziale più elevato verso quello a potenziale più basso. Nel caso del fenomeno che si sta studiando, stabilito il verso positivo del flusso secondo la definizione matematica di flusso di un vettore attraverso una superficie chiusa, (vedi fig. a lato: $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$ dove α è l'angolo che il verso positivo assegnato alla perpendicolare alla superficie individuata dal contorno della superficie di area S , forma con la direzione positiva del vettore caratteristico del campo, B) si deve stabilire il verso positivo o, ciò che è lo stesso, la polarità della f.e.m. indotta. La scelta è arbitraria, com'era arbitrario stabilire



quale verso di corrente considerare positivo nella legge di Ohm, ma una volta fatta, l'esperienza che ha portato ad enunciare la legge di Faraday fornisce tutti gli

elementi per stabilire il segno nella legge. Se ad esempio conveniamo di assumere come polarità positiva della tensione indotta quella che determina nel circuito una corrente il cui verso convenzionale, considerato unitamente al verso positivo assunto per la normale alla superficie delimitata dal circuito, rispetto al quale si è stabilito il segno del flusso, corrisponde a rotazione ed avanzamento di una vite destrorsa, nella formula va introdotto il segno meno. Va ricordato a questo punto che una corrente in un circuito produce un campo magnetico che ha un verso tale che insieme alla corrente convenzionale che lo produce corrisponde a rotazione e senso di avanzamento di una vite destrorsa. Il segno meno nella formula evidenzia bene che *l'eventuale corrente indotta dà origine ad un campo magnetico opposto alla variazione che lo ha prodotto*. Quest'ultima osservazione è nota come legge di Lenz ed era prevedibile per il fatto che la tensione indotta assume un valore finito. Se così non fosse, se cioè la corrente indotta producesse un campo magnetico concorde con la variazione che ne è la causa, il fenomeno si autoesalterebbe determinando impossibili tensioni infinite. Potremo denominare questa legge come il principio di azione e reazione elettromagnetico. Avremo pertanto

$$E_m = - \frac{\Delta \Phi_c}{\Delta t}$$

Il vettore caratteristico del campo che dà luogo al flusso, indicato con la lettera B , si chiama *induzione magnetica*. La sua dimensione fisica corrisponde al flusso per unità di superficie, quindi $[V][s][M]^{-2}$ e si chiama tesla. $[T]$. L'unità di misura del flusso $[V][s]$ si chiama weber $[Wb]$. Il campo magnetico potrebbe esistere senza che noi sapessimo come produrlo e fosse solo una proprietà dei magneti permanenti che si trovano in natura. Il vettore B definito dalla legge di Faraday è la grandezza vettoriale che lo caratterizza. Però sappiamo che sono le correnti elettriche a produrre i campi magnetici e, tecnicamente, è questo il metodo usato per produrre i campi magnetici desiderati. Il campo magnetico prodotto da una corrente elettrica è tanto più intenso quanto più elevata è l'intensità di corrente, tanto più elevato quanto maggiore è il numero delle spire, tanto meno intenso quanto maggiore è la lunghezza su cui sono distribuite le spire o quanto maggiore è la distanza dal circuito elettrico o quanto più lunga è la linea di forza cui il punto considerato appartiene. Questo insieme di osservazioni porta a definire una grandezza proporzionale all'intensità di corrente ed inversamente proporzionale ad una lunghezza, cui si attribuisce il nome di campo magnetico ed è usualmente indicata con il simbolo H . La sua dimensione fisica è $[A][M]^{-1}$, ed è un vettore che ha la stessa direzione e lo stesso verso di B . Si trova che a parità H , B dipende dal mezzo in cui il campo magnetico si sviluppa. Si può allora stabilire una relazione tra B ed H del tipo

$$B = \mu \cdot H$$

dove si è introdotta una grandezza che è caratteristica del mezzo ed a cui si dà il nome di permeabilità magnetica assoluta. La sua unità di misura si deduce dalla relazione scritta, corrisponde all' $[W][s][M]^{-1}$. L'impulso di resistenza $[W][s]$ è denominato henry il cui simbolo è $[H]$: esso è l'unità di misura del parametro che lega la corrente al flusso magnetico da essa prodotto e che si concatena con il circuito stesso: il coefficiente di autoinduzione indicato generalmente con L . Nella figura che segue sono riportate i grafici e le misure di tensione di una possibile esperienza in cui sono state fatte due serie di misure secondo le modalità in precedenza descritte.

Analisi dei risultati dell'esperienza

