

PERCORSI STORICI DI FISICA

LA FORMAZIONE DEL CONCETTO DI INDUZIONE ELETTROMAGNETICA

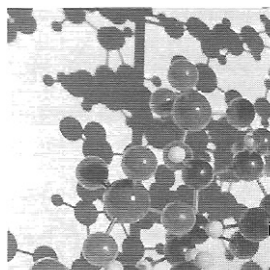
di Novella Sestini*

La storia della fisica diventa protagonista di un itinerario didattico impegnativo: nella classe seconda di un ITI, insegnante e studenti ricostruiscono il cammino sperimentale e concettuale che ha portato gli scienziati della prima metà dell'Ottocento a individuare la realtà del campo elettromagnetico. Un insegnamento della fisica interessante e efficace che poggia su due fondamenti: adeguatezza pedagogica e correttezza storica.

All'Istituto Tecnico Industriale la fisica viene insegnata solo nel biennio perché è concepita come propedeutica alle materie tecniche del triennio e quindi è materia di base sia sul piano dei contenuti che su quello metodologico.

Nel 1996, in un periodo in cui cercavo una modalità più efficace di presentazione della fisica ai ragazzi del biennio, ho frequentato un corso di aggiornamento per docenti di scuola superiore dal titolo *L'apprendimento della fisica come reinvenzione guidata*.¹ Nel lavoro e nel confronto con i colleghi ho compreso l'importanza di un approccio alla materia più «creativo» per me e per i miei alunni.

Da allora ho cominciato a orientare il mio lavoro di impostazione dei programmi, delle lezioni in classe e in laboratorio, secondo la modalità sottolineata nel corso: «creare interesse e curiosità per le cose, in primo luogo formulando domande e non fornendo risposte preconfezionate» o anche «partire dalla realtà come problema e sviluppare un'attività di conoscenza»² In particolare ho raccolto l'invito a considerare la dimensione storica come essenziale alla comprensione dei concetti fisici accompagnando così gli alunni a scoprire che «le leggi che studiamo oggi non sono sempre state così: esse sono frutto di un'evoluzione della conoscenza che è una storia di tentativi, fatiche, successi ed insuccessi da parte degli uomini di scienza. Allora la fatica che caratterizza la comprensione da parte dei nostri studenti non è diversa da quella che sempre l'uomo ha compiuto per giungere alla scoperta e alla conoscenza, non è una fatica inutile.»³



¹Il corso è stato realizzato a Milano dal gruppo SEED. Cfr.: AA. VV., *L'apprendimento della fisica come reinvenzione guidata*, Atti del Corso di aggiornamento SEED, Ce.se.d., Milano 1996.

²Op. cit., p. 135.

³Op. cit., p. 141.

Classe prima: inizia il progetto

L'attività interdisciplinare che descrivo si è sviluppata nell'arco del biennio, su tematiche diverse, ma con la medesima metodologia didattica. In particolare, il lavoro svolto nella classe prima, ha creato le condizioni per lo svolgimento della più impegnativa attività programmata per la classe seconda.

In prima, prendendo spunto dal «percorso di fisica e storia»⁴ svolto da Patrizia Iotti e Marco Pellegrini all'IPSIA A. Parma di Saronno nel biennio 1994 - 1996, nelle ore di lezione riservate all'Area di Progetto (attività interdisciplinare obbligatoria nel nostro istituto), ho proposto ai miei alunni un percorso su «l'evoluzione storica del concetto di moto». Dopo avere analizzato «come» un corpo si muove studiando la cinematica del punto materiale, ci siamo chiesti «perché» un corpo si muove.

In copresenza con l'insegnante di italiano e storia abbiamo analizzato in classe brani di Aristotele (la teoria dei luoghi naturali), Buridano (la teoria dell'*impetus*) e Galileo (dal *De Motu* e da *I Discorsi*).

Abbiamo effettuato una visita di istruzione all'ITIS *Enrico Fermi* di Desio dove, guidati dalla professoressa Antonia Poli, gli alunni hanno eseguito l'esperimento storico del piano inclinato di Galileo⁵ soffermandosi sulla portata innovativa del metodo sperimentale.

In seguito abbiamo «ripetuto» l'esperimento nel laboratorio di fisica del nostro istituto studiando la caduta libera di un grave con la moderna strumentazione didattica.

Poi abbiamo analizzato in classe il brano di Galileo sul «principio di inerzia» (enunciato in riferimento al moto sul piano inclinato) e gli enunciati dei tre «principi della dinamica» nella formulazione data da Newton nella *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* del 1687.

Gli alunni si sono resi conto che, anche a distanza di tanti secoli e con così diversa strumentazione, Galileo aveva eseguito una verifica sperimentale del moto di un grave altrettanto efficace di quella che si può eseguire ai giorni nostri. Egli, grazie alla sua passione ed al suo genio, era arrivato a enunciare il principio di inerzia aprendo la strada al lavoro di Newton che porterà ai tre principi della dinamica così come ancora oggi li studiamo.



Classe seconda: l'induzione elettromagnetica

Per continuare l'attività dell'Area di Progetto nella classe seconda ho preso spunto da un prezioso testo di Paolo Marazzini e Pasquale Tucci del 1983.⁶ Gli autori propongono un itinerario didattico in cui si parte dall'esperimento di Oersted e si giunge, con Faraday, al moderno concetto di induzione elettromagnetica attraverso l'esame degli esperimenti storici più significativi.

Anni or sono questo percorso sperimentale era stato ricostruito in un'apposita sala del *Museo della Scienza e della Tecnica* di Milano che, in anni più recenti, è stata smantellata.

Rispetto al percorso descritto nel saggio, ho deciso di restringere il campo di lavoro al fenomeno dell'induzione elettromagnetica la cui portata innovativa mi ha sempre affascinato. In particolare ho preso in considerazione l'esperimento di Arago (François Dominique Arago, 1786 - 1853) effettuato nel 1822 e quattro esperimenti compiuti da Faraday (Michael Faraday, 1791 - 1867) nel 1831 che fecero luce su tale fenomeno.

Ho proposto ai miei alunni di ricostruire tali esperimenti per poter entrare nel vivo delle domande che gli scienziati si erano posti e comprendere più a fondo le risposte cui erano pervenuti.

Ho avuto la fortuna di avere un collega (insegnante tecnico - pratico di Officina Meccanica) di grande esperienza didattica e molto disponibile con il quale ho reperito il materiale utile all'interno dell'istituto (legno nella falegnameria, materiale elettrico nei laboratori di elettrotecnica e calamite nel laboratorio di fisica); ho potuto inoltre contare sulla consulenza dello stesso professor Marazzini che mi ha dato utili suggerimenti durante l'impostazione del lavoro.

Sommario del progetto

Attività preparatoria (13 ore):

Dopo aver svolto l'elettrostatica e la conduzione elettrica nelle sostanze solide (circuiti in corrente continua) sono stati sviluppati i seguenti argomenti:

Fenomenologia del magnetismo, esperimento di Oersted: azione della corrente elettrica su un ago magnetico. Esperimento di Faraday: azione di un magnete su una corrente rettilinea. Esperimenti di Ampère: azione tra due correnti rettilinee, equivalenza spira-magnete. Interpretazione amperiana dell'esperienza di Oersted, ruota di Barlow. Magnetismo nella materia. Forza di Lorentz.

Attività sperimentale

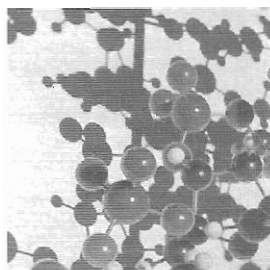
Illustrazione degli esperimenti storici di Arago e Faraday e suddivisione della classe in gruppi di lavoro per procedere alla ricostruzione delle esperienze (2 ore).

Lavoro a gruppi in officina meccanica con copresenza dell'insegnante di fisica, degli I.T.P. di fisica e di tecnologia e disegno (8 ore).

Attività conclusiva

Sviluppo teorico del concetto di induzione elettromagnetica a partire dagli esperimenti storici ricostruiti (3 ore).

Presentazione del percorso storico e degli esperimenti ai miei alunni della classe parallela che non hanno partecipato all'area di progetto (1 ora).



‘Il progetto didattico citato, intitolato *L'evoluzione del concetto di calore*, ha vinto il secondo premio del concorso «Federchimica Giovani» nel 1995.

Cfr.: P. Iotti, M. Pellegrini, *Fisica e storia*, Ce.se.d., Milano 1996;

P. Grisetti, P. Iotti e M. Pellegrini, *Alla ricerca di nuovi cieli*, in: *Emmeciquadro* n. 2, giugno 1998.

³Cfr.: A. Poli, *Il movimento dei corpi*, in: *Emmeciquadro* n. 4, dicembre 1998.

⁴P. Marazzini, P. Tucci, *La formazione del concetto di induzione elettromagnetica*, Franco Angeli, Milano 1983. Questo saggio, fuori commercio, può essere richiesto presso la redazione di *Emmeciquadro*.

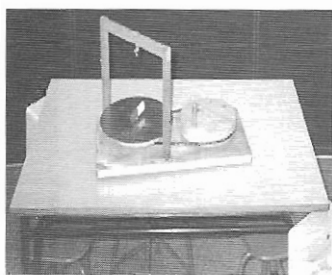
L'esperimento di Oersted

Già nella fase preparatoria del progetto abbiamo seguito un approccio storico, per esempio considerando la figura di Hans Christian Oersted (1777 - 1851). Egli abbracciava l'idea della scuola filosofica tedesca nota con il nome *Naturphilosophie* che sosteneva l'unità profonda di tutte le forze fisiche della natura. Di conseguenza, nel suo esperimento del magnete orientato da una corrente rettilinea, effettuato nel 1820, Oersted si aspettava che, in concomitanza con l'effetto magnetico ci fossero anche l'effetto termico e luminoso, analogamente a quanto accadeva in natura nel fenomeno del fulmine. L'esperimento però smentiva questa ipotesi perché fili più sottili venivano resi più facilmente incandescenti dalla corrente che fluiva in essi ma, avendo maggiore resistenza, facevano passare corrente di minore intensità con il risultato che l'effetto magnetico risultava poco rilevante. Viceversa, fili di sezione maggiore davano una maggiore deviazione dell'ago magnetico ma non provocavano l'effetto luminoso previsto. Oersted, non senza difficoltà, accettò quanto si evinceva dall'esperimento proseguendo le sue prove con fili di diametro maggiore e ottenne effetti decisamente migliori. Proprio questo suo atteggiamento da vero scienziato, «sottoporre le proprie ipotesi al vaglio sperimentale», permise lo sviluppo della teoria dell'elettromagnetismo.

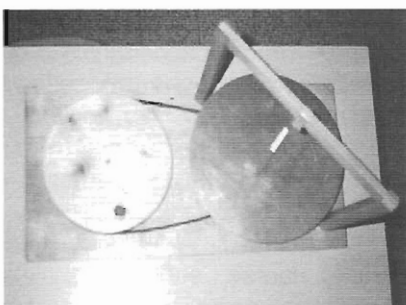
L'esperimento di Arago

Arago era stato particolarmente colpito dall'esperimento di Oersted e fu tra i primi a ripeterlo. Il suo interesse per il comportamento dei magneti lo portò, nel 1822, a osservare che un ago magnetico, posto in oscillazione, acquistava più rapidamente la sua posizione di riposo se era in presenza di un altro corpo. Poiché il numero delle oscillazioni dell'ago nell'unità di tempo dipendeva dalla sostanza presa in esame, Arago pensò che il fenomeno potesse essere sfruttato per classificare le varie sostanze sulla base della loro capacità di esercitare un'azione di tipo magnetico. L'ipotesi più importante nata da questi esperimenti, gravida di conseguenze anche teoriche fu che: se un piatto conduttore aveva il potere di diminuire l'ampiezza delle oscillazioni di un ago magnetico, un piatto rotante avrebbe dovuto trascinare un ago sospeso sopra di esso. Arago modificò l'esperimento e trovò l'effetto previsto: facendo ruotare un piatto conduttore sotto un ago magnetico sospeso e mobile, il piatto in moto trascinava con sé l'ago. Ciò non accadeva se il piatto messo in rotazione era isolante.

L'esperimento ricostruito dai ragazzi corrisponde perfettamente alle previsioni di Arago.



Il piatto di rame e quello di alluminio (diametro 30 cm e spessore 2 mm per il rame, 5 mm per l'alluminio) messi in rotazione trascinano perfettamente nel loro moto una sbarretta magnetica (dimensioni 10 x 1 x 0,5 cm) sospesa con un sottile filo di nylon a circa 2 cm sopra il piatto.



Se si toglie il piatto conduttore e si lascia il supporto di legno o si mette un piatto di polistirolo, mettendolo in rotazione, la sbarretta magnetica resta completamente ferma.

Il dibattito tra Ampère e Faraday

Tra il 1822 e il 1830 l'esperimento di Arago venne ripetuto e fu al centro del dibattito tra diversi scienziati che si occupavano di ricerche sugli effetti elettrici e magnetici nei corpi in movimento.

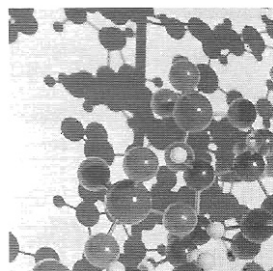
In particolare, in classe, abbiamo preso in esame la posizione di Faraday e quella di Ampère (Andrè Marie Ampère, 1755 - 1836).

Ampère, matematico di prim'ordine, era acceso sostenitore di Newton e della teoria molecolare della materia. Egli interpretò il magnetismo come effetto dell'interazione di correnti elementari legate alla struttura molecolare dei magneti. Inoltre, seguendo l'interpretazione coulombiana dell'interazione fra cariche elettriche, tentò di ridurre tutte le azioni fra magneti e correnti a quelle di forze centrali.

Sia Ampère che Faraday fecero una lunga serie di esperimenti in materia e arrivarono a concordare che l'azione di attrazione e repulsione fosse dovuta alla composizione di forze circolari che agiscono tra magneti o tra correnti.

Faraday rappresentò queste forze circolari con «linee di forza magnetiche o elettriche». Ma, a differenza di Ampère, Faraday sottolineava che il magnetismo prodotto dalla corrente che passa in un solenoide non è identico a quello generato da una sbarretta magnetica; quindi il magnetismo non poteva essere solamente il risultato di correnti elettriche. Inoltre le correnti in un magnete non venivano rilevate come invece avviene per la corrente in un filo conduttore. Tutto ciò lasciava Faraday perplesso mentre Ampère, in forza della completa formalizzazione matematica della sua teoria, sosteneva che, se un esperimento non riusciva a penetrare negli ultimi recessi della materia, andava accantonato l'esperimento e non abbandonata la teoria.

Infine l'interpretazione dell'esperimento di Arago secondo la teoria amperiana risultava insoddisfacente. Non si riusciva infatti a spiegare perché il fenomeno si manifestasse solo quando il magnete e il disco



fossero in moto relativo: ragionando in termini amperiani le correnti elettriche che circondano il disco di rame dovrebbero essere influenzate dalle correnti che circondano il magnete senza l'intervento del moto relativo: ma così non accade!

L'anello di Faraday

Faraday riprese i suoi studi sull'elettromagnetismo solo alcuni anni dopo l'esperimento realizzato da Arago e la sua incapacità a produrre risultati, che egli riteneva si potessero legittimamente dedurre dalla teoria di Ampère, lo confermò a considerarla con scetticismo. L'unica cosa di cui era convinto era che «l'elettromagnetismo fosse il risultato peculiare delle particelle del conduttore e non unicamente l'azione di due fluidi elettrici uno sull'altro.» Un'altra ipotesi per interpretare gli esperimenti eseguiti fino ad allora poteva essere la presenza di forze interne alla materia, ma bisognava trovare un meccanismo di trasmissione delle forze senza spostamento di materia.

Gli studi compiuti in altri campi della fisica gli diedero la chiave per la risoluzione del problema: Thomas Young (1773 - 1829) nel 1801 e Augustin Jean Fresnel (1788 - 1827) nel 1820 avevano suggerito che la luce fosse costituita da onde che si muovevano senza trasporto di materia. Consapevole dell'unità delle forze della natura, Faraday ipotizzò che anche l'elettricità fosse un fenomeno ondulatorio: l'onda elettrica era trasmessa dalle particelle di materia e le disponeva in qualche forma opportuna. Si trattava ora di rilevarla.

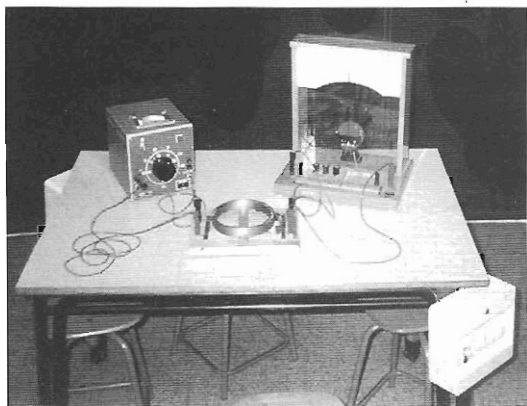
Egli tenne in conto i risultati sperimentali ottenuti da altri scienziati intorno al 1830: l'inversione delle polarità di un elettromagnete e il carattere istantaneo dell'interazione tra le ipotetiche onde di forza e le particelle di materia. Nel 1831 tentò il famoso esperimento che utilizzava un elettromagnete, in quanto la straordinaria potenza che sviluppava lasciava sperare di poter rilevare l'onda elettrica attraverso le intense manifestazioni di magnetismo che l'avrebbero accompagnata.

I ragazzi hanno ricostruito il famoso esperimento dell'anello.

Nella figura a lato si vedono: a sinistra: il generatore di corrente continua collegato ad un avvolgimento dell'anello; al centro l'anello di ferro con due avvolgimenti di filo di rame verniciato; a destra il galvanometro a zero centrale collegato al secondo avvolgimento.

Quando si apre il circuito (o lo si chiude) passa corrente nel secondo avvolgimento che non ha generatore.

Secondo l'ipotesi di Faraday il passaggio di corrente nel circuito collegato alla batteria crea una



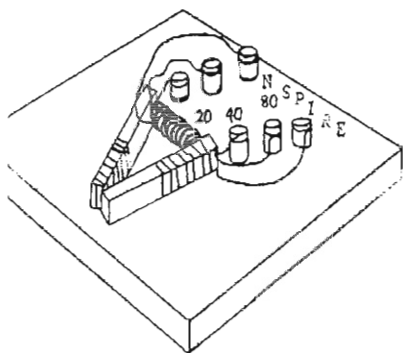
specie di «stato» particolare nell'anello di ferro, stato che egli denomina «elettronico» e che si rileva quando si forma l'onda di elettricità dovuta alla chiusura (o all'apertura) del circuito alimentato dalla batteria.

Da questo esperimento, che confermava le sue aspettative, arrivarono a cascata, in pochi giorni, tutta una serie di esperimenti che portarono Faraday a dare una risposta esauriente ai molti interrogativi posti dall'esperimento di Arago.

Le linee di forza tagliate: il circuito magnetico

In particolare, nel settembre del 1831, Faraday eseguiva un altro esperimento molto importante che in classe abbiamo denominato «il circuito magnetico» e che abbiamo così ricostruito.

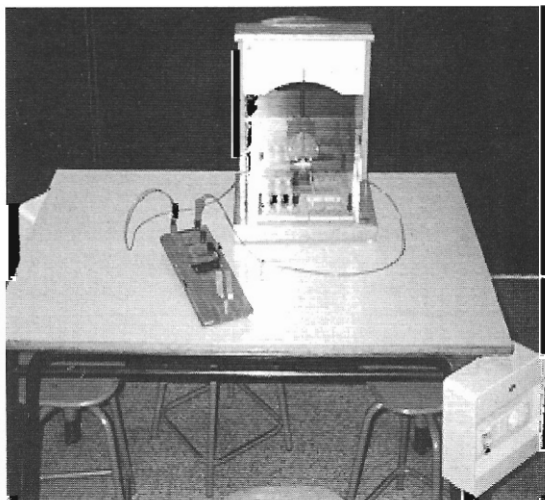
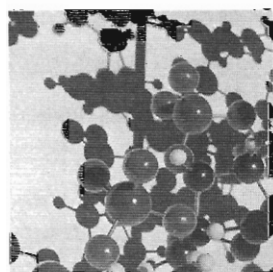
Un solenoide multiplo, costituito da tre diversi avvolgimenti di filo di rame verniciato, è avvolto attorno ad un cilindretto di ferro di diametro circa 1 cm e lunghezza 10 cm. Ogni avvolgimento è collegato autonomamente ai terminali di un galvanometro a zero centrale. A contatto con le estremità del cilindro di ferro sono poste due sbarrette magnetiche, lunghe circa 15 cm, con poli opposti in modo da formare un unico magnete che si richiude sul cilindretto stesso.



Quando il contatto fra i due magneti viene stabilito, l'ago del galvanometro si muove tornando subito allo zero e, quando i magneti vengono staccati, l'ago torna a muoversi in verso opposto e subito torna sullo zero. Invertendo il contatto magnetico si verifica l'inversione della deflessione dell'ago.

Abbiamo anche constatato che più velocemente agiamo nell'apertura e chiusura del contatto tra i magneti e maggiore è l'intensità di corrente che passa negli avvolgimenti.

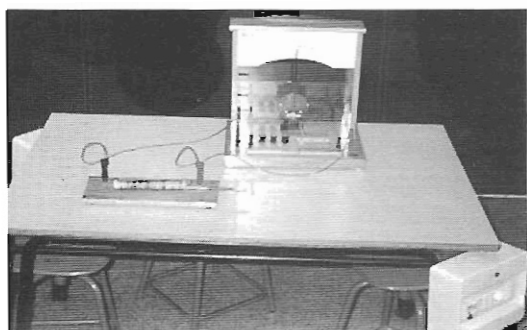
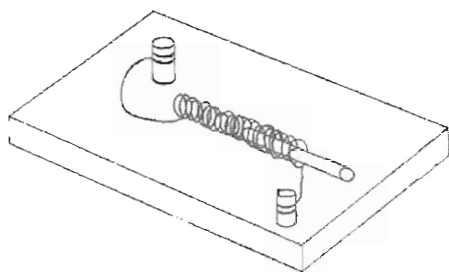
Discutendo in classe su tale esperimento è venuto naturale interpretarlo, come fece Faraday, con le linee di forza che formano un «circuito magnetico» che attraversa le spire del solenoide: quando le linee di forza vengono «tagliate», cioè si interrompe il circuito magnetico, si genera una corrente nell'avvolgimento cioè una conversione di magnetismo in elettricità.



Movimento relativo di magnete e conduttore

L'esperimento successivo, eseguito a pochi giorni di distanza, permise di ottenere elettricità dal magnetismo inserendo o estraendo un magnete in un cilindro di cartone sul quale era avvolto a elica un filo rigido di ottone.

Abbiamo ricostruito l'esperimento fissando su una basetta di legno un solenoide di filo di rame verniciato (lunghezza circa 15 cm e diametro circa 3 cm) i cui estremi vengono collegati al galvanometro. Inserendo o estraendo dal solenoide un magnete cilindrico si ha la deflessione dell'ago del galvanometro.



Faraday commentò l'esperimento affermando che quando veniva inserito o estratto il magnete dal solenoide si produceva un'onda magnetica che a sua volta si convertiva in corrente elettrica senza l'utilizzo della pila di Volta.

Questo esperimento più degli altri stupisce perché basta la presenza del magnete, del conduttore ed il movimento relativo per generare una corrente elettrica. È questo il principio base dei moderni generatori elettrici.

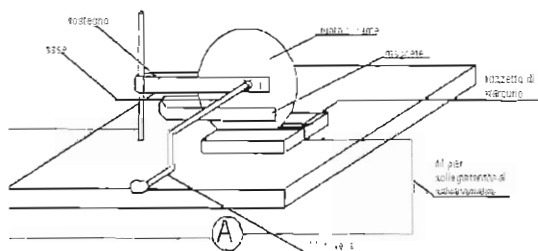
Disco in rotazione in un magnete

Faraday riprese l'esperimento di Arago modificandolo con l'obiettivo di ottenere con continuità elettricità dal magnetismo.

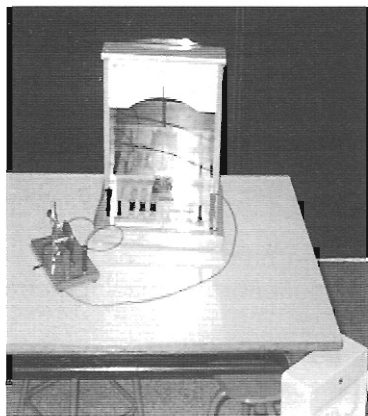
Noi abbiamo ricostruito il suo esperimento modificando opportunamente una «ruota di Barlow» in dotazione al nostro laboratorio. Barlow, contemporaneo di Faraday, aveva studiato la deviazione prodotta dall'azione delle masse di ferro delle navi sull'ago della bussola e in seguito aveva ripetuto gli esperimenti di Arago e Faraday.

Aveva notato che un filo, alimentato da una pila per mezzo di un contatto fisso e di uno mobile (estremo immerso in un pozzetto di mercurio), oscillava se veniva sospeso tra i poli di una calamita. Per trasformare il movimento oscillatorio in movimento circolare, egli pose al posto del filo una ruota (un polo della pila collegato all'asse della ruota e l'altro nel pozzetto di mercurio dove la ruota si immergeva con la circonferenza più esterna) e osservò che questa ruotava in senso orario o antiorario secondo il verso della corrente che la attraversava.

L'esperimento di Faraday fu esattamente l'inverso

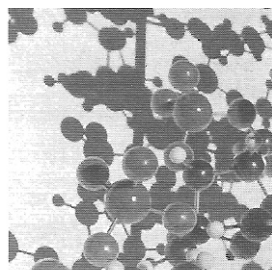


di quello di Barlow: la rotazione di un disco di rame che passava tra le espansioni polari di un elettromagnete produceva una corrente elettrica. Quando il disco era fermo l'ago del galvanometro, collegato al centro e alla circonferenza del disco, non si muoveva mentre, a disco in movimento, l'ago veniva notevolmente deflesso. Per assicurarsi che



l'effetto fosse dovuto proprio al magnete, dopo averlo asportato, Faraday fece ruotare il disco: l'effetto fu nullo.

Il lavoro dei miei alunni è stato modificare la ruota di Barlow costruendo un nuovo asse con una manovella per mantenere la ruota in moto tra le espansioni di una piccola calamita. Inoltre tali espansioni sono state notevolmente ravvicinate per aumentare l'effetto elettromagnetico e ottenere una corrente misurabile.



Interpretazione definitiva dell'esperienza di Arago

Come il magnete in moto nel solenoide, anche il disco in moto tra le espansioni di un magnete dà come esito una corrente: questo ci ha fatto riflettere sulla causa «microscopica» di queste correnti chiamate «indotte». Ho guidato i miei alunni con una sequenza di domande e risposte riportate nel riquadro sottostante.

d. Considerando un circuito elettrico alimentato da una pila, che cosa è essenziale perché in esso passi corrente?

r. La corrente è un moto di cariche quindi occorre che ci siano cariche mobili (corpo conduttore) e che ci sia una forza che le mette e che le mantiene in moto, superando gli attriti interni: è la forza del campo elettrico (o differenza di potenziale) instaurato dalla pila.

d. Per ottenere una corrente indotta che cosa è quindi necessario?

r. Un corpo conduttore e una forza che muova le cariche: qui non è più la forza del campo elettrico ma quella del campo magnetico che però agisce solo su cariche in moto rispetto al magnete cioè la forza di Lorentz. Allora si ha corrente solo se le cariche del conduttore sono in moto rispetto al magnete e questo spiega la necessità del «moto relativo».

Abbiamo interpretato l'esperienza di Arago, tenendo come filo conduttore l'interpretazione data da Faraday nel 1831.

Dagli esperimenti di Faraday si nota che il moto di un magnete in un solenoide conduttore provoca corrente, un disco conduttore in rotazione tra le espansioni di un magnete viene percorso da corrente. Allora nell'esperienza di Arago: il moto relativo magnete - piatto conduttore provoca corrente nel conduttore stesso (e sarà corrente di intensità non trascurabile essendo la resistenza molto piccola).

Dall'esperimento di Oersted sappiamo che a sua volta la corrente elettrica agisce su un magnete. Allora nell'esperienza di Arago: le correnti indotte instaurate nel disco di rame in rotazione agiscono sul magnete sospeso trascinandolo nel moto rotatorio.

Conclusioni

Per comprendere il fenomeno dell'induzione elettromagnetica abbiamo ripercorso l'*iter* logico di Faraday che così possiamo riassumere.

Interpretazione delle interazioni tra magneti e correnti con le linee di forza: «per curve magnetiche intendo le linee di forza magnetiche, comunque modificate dalla giustapposizione di poli, che sono evidenziate dalla limatura di ferro, o quelle alle quali sarebbe tangente un ago magnetico molto piccolo.»

Prima ipotesi interpretativa del fenomeno delle correnti indotte: l'idea di «stato elettrotonico» per spiegare l'esperimento dell'anello.

L'instaurarsi di questo stato nel circuito primario (cioè da corrente nulla a corrente di regime) fa deflettere il galvanometro del circuito secondario.

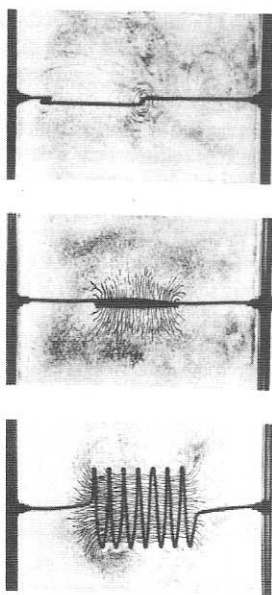
Quando la corrente cessa nel primario lo stato elettrotonico «collassa» e questo causa la deflessione del galvanometro del secondario nella direzione opposta.

La corrente ottenuta nell'esperienza dell'anello sarebbe quindi un rapido emergere e collassare dello stato elettrotonico, «un'onda di sforzo» trasmessa da particella a particella.

L'esperimento del «circuito magnetico» e le linee di forza: quando le linee di forza che passano attraverso il conduttore vengono «tagliate», nel conduttore si ha una corrente indotta. Più in generale, quando un conduttore passa attraverso, cioè taglia, queste linee di forza, in esso si genera una corrente la cui direzione e intensità sono determinate dalla direzione e dalla velocità di moto del conduttore.

Interpretazione del fenomeno dell'induzione mediante il «taglio» delle linee di forza: Faraday abbandona l'ipotesi dello stato elettrotonico, non direttamente individuabile, spiegando l'induzione mediante il taglio di linee di forza che sono nettamente individuabili mediante la limatura di ferro.

Il concetto di linea di forza viene così esteso ai fenomeni elettromagnetici e assume progressivamente il carattere di rappresentazione di una modificazione reale dello spazio, un passo in più verso il moderno concetto di campo.



Linee di forza evidenziate con la limatura di ferro

Docente di fisica
Lecco

Nello svolgimento di questa Area di Progetto il riferimento al testo di Marazzini e Tucci è stato costante. Spesso nell'articolo sono riportate frasi del testo stesso al quale, per non appesantire la trattazione, non si fa riferimento esplicito.