

MODULO 14

L'ELETTROMAGNETISMO

OBIETTIVO:

Conoscere i fenomeni generati dal campo magnetico e le sue interazioni con la corrente elettrica.

TARGET:

Scuola media e media superiore

TEORIA:

Esistono in natura dei corpi che hanno la caratteristica di attrarre a sé pezzetti di ferro o altri materiali, le cui proprietà hanno sempre destato meraviglia e stupore negli uomini che li hanno studiati. Già agli antichi greci erano note le proprietà della magnetite ($\text{FeO Fe}_2\text{O}_3$) di attrarre a sé pezzetti di ferro o di altri materiali dello stesso tipo. La proprietà di questi corpi di attrarre a sé altra materia era vista come una sorta di magia. Quello che abbiamo appena detto è stato paradossalmente vero fino a non molto tempo fa. Forse non tutti sanno che prima del 1820 i fenomeni magnetici non erano ben visti dai fisici o dagli studiosi ritenuti "seri". Verso la fine del 1700 i fenomeni elettrici erano considerati scienza molto seria e importante e come tale veniva studiata da eminenti scienziati come il colonnello Coulomb, Alessandro Volta ecc, viceversa i fenomeni del magnetismo erano relegati a studi di minore importanza o fatti da studiosi ritenuti dei cialtroni. Tutto questo cambio quando nel 1820 si scoprì che il magnetismo era originato dalla corrente elettrica. Oggi sappiamo che il campo magnetico prodotto dalla magnetite o da altri materiali simili, si presenta attorno ad essi come un campo di forze che si estende in una regione di spazio più o meno ampia, all'interno della quale si verificano tali fenomeni di attrazione o repulsione. Per visualizzare il campo di forze (campo di linee di forza), prodotto da uno di questi magneti naturali, è sufficiente collocare nei pressi del minerale della limatura di ferro. Possiamo per esempio stendere la limatura uniformemente sopra un cartoncino chiaro e collocare il minerale sotto di esso. La limatura si disporrà in modo da permettere la visione della geometria delle linee di campo disegnando una caratteristica figura sopra il cartoncino stesso.

Cosa sono queste linee di forza è ancora oggi per certi versi un mistero. I fisici hanno chiamato campo magnetico questo misterioso campo di forze generato dalle calamite, e oggi sappiamo che la natura di questo campo è in qualche modo legata alle qualità intrinseche dell'elettrone.

Ciò significa che la causa della presenza del campo magnetico all'interno della materia è la conseguenza del campo magnetico generato da questa piccola particella a carica negativa. Il perché l'elettrone possieda questo campo magnetico resta tuttora un enorme mistero, a meno che non ci rifacciamo a parziali e macchinose teorie che non fanno altro che spostare il problema senza realmente spiegare come e perché la materia ha questa proprietà.

Tutto questo tuttavia non ha impedito i fisici di indagare su questo straordinario fenomeno, nonostante la sua espressione fisica essenziale resti ancora indefinita. Faraday, fu il primo a parlare di linee di forza corpuscolari e il professor Feynman è stato uno degli ultimi a elaborare una teoria che spiegasse le linee di campo elettrico vedendole come un flusso di fotoni virtuali. Anch'io, nel mio piccolo ho dato il mio contributo a questo filone di ricerca. Nel 1976, all'età di 18 anni, tentai, in un piccolo seminario (il primo) organizzato a Caserta dal mio preside e dalla società di Storia Patria locale (il cui pubblico era prevalentemente costituito dai miei cari amici di scuola), una definizione di campo magnetico come uno stato particolare di campo elettrico fotonico, simile a quello immaginato da Faraday nei primi decenni del 1800. Questo mio vecchio e infantile lavoro era solamente un tentativo di approfondimento, legato alla passione per lo studio di questi mirabili concetti. I risultati di quel seminario tuttavia, restarono legati all'oblio del tempo. Ho voluto ricordare questo piccolo aneddoto che mi riguarda, unicamente per tirare un po' su il mio morale e per darmi forza di continuare a scrivere. E ricordo con estrema tristezza, i risvolti successivi della mia vita e gli impedimenti che mi hanno ostacolato a raggiungere il completamento di quegli studi così affascinanti, iniziati in quegli anni, così, solo per gioco. Essermi espresso in questo modo, in queste ultime righe è solo per farvi capire come ho amato e come amo ancora questi argomenti meravigliosi che ora, in modo non molto dissimile a quei tempi io vi ripropongo.

Un campo magnetico può anche essere generato da una corrente elettrica così come fece notare nel 1820 Hans Christan Oersted. Se infatti, facciamo circolare corrente in un conduttore, attorno a quest'ultimo osserviamo il manifestarsi di un campo di forze analogo a quello prodotto da un magnete. Tutto questo perché i due fenomeni sono intimamente collegati e il campo magnetico racchiude le sue origini elementari, proprio nell'entità misteriosa che rappresenta la struttura dell'elettrone.

È proprio quest'ultima particella, il vero artefice di questi fenomeni straordinari. Sembra essere proprio l'elettrone con il suo campo di forza elettrico, che appena effettua un certo spostamento o si mette in movimento per una qualsiasi ragione, tende a generare i fenomeni magnetici che osserviamo.

Tutto questo quadro fenomenologico risulta, a prima vista, ulteriormente complicato dal fatto che le interazioni magnetiche sembrano influenzare solo alcuni materiali definiti ferromagnetici. In realtà tutti i materiali presentano una certa sensibilità a questo campo, solo che la nostra percezione ci consente di saggiare solo fenomeni di un certo ordine di grandezza generati, appunto, dai ferromagnetici, lasciando a tecniche di analisi più fine le misure di interazioni di ordine inferiore. Analizzeremo meglio, all'interno dell'allegato di questo modulo, i vari modi tramite i quali la materia risulta influenzata dal magnetismo.

Se l'intima essenza, il significato più profondo, delle linee di forza del campo non li conosciamo, sappiamo invece definirne e calcolarne tutti i fenomeni connessi. Nei prossimi laboratori incontreremo alcuni dei fenomeni più interessanti legati al campo magnetico e vi fornirò molti simpatici spunti per organizzare esperienze e lezioni sull'argomento.

LABORATORI

1°Laboratorio

Visualizzazione del campo magnetico

TARGET:

Scuola media

Materiale occorrente:

1 esperimento: Kit fotografico, calamita, polvere di ferro

2 esperimento: Un contenitore plastico perfettamente trasparente di basso profilo, glicerina oppure olio di vaselina, polvere di ferro, calamita.

Per ottenere la visualizzazione del campo magnetico prodotto da una calamita, ogni docente di fisica o qualsiasi altro maestro di didattica, sa molto bene che è sufficiente utilizzare un cartoncino e della limatura di ferro. Ed è proprio questo che faremo: dopo aver deposto sulla superficie del cartoncino una certa quantità di polvere di ferro è possibile, tramite la calamita, creare figure molto caratteristiche che mostrano la geometria del campo magnetico prodotta. Da quanto ho avuto modo di verificare, nelle varie occasioni di incontro con gli scolari delle scuole del primo ciclo, i giovani studenti sono molto attratti da questo genere di sperimentazioni. Essendo inoltre un'esperienza di semplice realizzazione, non c'è alcuna limitazione pratica che vi costringa a desistere. Forse il problema più scocciante è caratterizzato dalla necessità di pulire la calamita che inevitabilmente si porta a coprirsi di polvere di ferro. Ma questo non costituisce affatto un problema o un impedimento insormontabile.

In questo primo laboratorio voglio proporvi due metodi per ottimizzare questo genere di visualizzazioni del campo magnetico con la limatura di ferro, in modo piuttosto originale.

Fotografiamo il campo (1 metodo):

Il primo metodo prevede l'uso di una tecnica fotografica, molto elementare, che vi permette di fotografare le linee di forza magnetiche ottenute mediante i vostri esperimenti con la calamita. Questo esperimento dovete effettuarlo per vostro conto prima della lezione in un laboratorio scolastico attrezzato a tale scopo oppure a limite, direttamente a casa vostra. Solo successivamente mostrerete ai vostri allievi le foto rappresentative ottenute. Con questo, non voglio escludere del tutto la possibilità di realizzare quest'esperienza didattica di fotografia anche in presenza dei vostri allievi. L'importante è riuscire a organizzarsi in modo tale che la presenza dei ragazzi non comprometta il risultato.



Fig. 1.14.0 - Vaschette e reagenti necessari per il trattamento dei cartoncini fotografici -

Per portare a termine questa tecnica, occorre munirsi di cartoncini fotografici. Sto parlando di quelli utilizzati per stampare le foto, chiamate anche "carte sensibili", in vendita nei negozi specializzati in materiale fotografico e dotati di vario formato. Poi bisogna acquistare una soluzione di sviluppo fotografico e una soluzione di fissaggio. Fatevi spiegare da un amico fotografo la preparazione e l'uso delle soluzioni, oppure, in mancanza d'altro, riferitevi a un manuale. Ricordo che la prima volta in cui mi accinsi a compiere questa esperienza fu nel lontano 1976: a quel tempo esistevano in vendita delle bustine contenenti gli opportuni sali che andavano sciolti in un litro di acqua per ottenere sia la soluzione di sviluppo che quella necessaria al fissaggio. Infatti, la procedura di base, necessaria a produrre stampe fotografiche, richiede sia un'operazione di sviluppo, che avviene con sali di tipo chimico che consentono di amplificare i grani fotosensibili della carta impressionata dalla luce, e sia da un'operazione di fissaggio, che consente all'immagine di fissarsi in modo permanente sul supporto. Oggi esistono delle soluzioni già pronte che devono essere diluite in rapporto 1:9 con acqua. Quindi, supponendo di voler ottenere un litro della soluzione di sviluppo, si utilizzano 100 ml di questo prodotto e si aggiungono 900 ml di acqua distillata.

Per quanto riguarda la soluzione adoperata per il fissaggio della fotografia, si tratta di soluzioni contenenti una certa quantità (circa il 30%) di tiosolfato di sodio e solfito di sodio.

Da un punto di vista chimico, la soluzione di sviluppo, è costituita da un riducente molto forte. La moderna tecnica fotografica oggi usa sostanze come l'idrochinone, oppure il metilparamminofenolo o anche soluzioni di acido pirogallico, o pirogallolo, in carbonato di sodio. Vi consiglio però di comprare un prodotto commerciale già miscelato, in modo di avere la sicurezza sufficiente per garantire il successo della vostra esperienza.

Appena avete procurati i reagenti, preparate tre vaschette di plastica di dimensione adeguate a contenere senza grossa difficoltà il cartoncino fotografico con le adatte misure che avete trovato in commercio. Nella prima vaschetta, mettete la soluzione di sviluppo, nella seconda mettete solo acqua di lavaggio mentre la terza, deve invece contenere la soluzione di fissaggio. Il vostro cartoncino fotografico deve essere preparato in luce rossa (fatevi spiegare da un amico fotografo le modalità precise e il tipo di lampada che dovete comprare). Questo significa che non deve prendere luce a parte quella di colore rosso, emessa dalla lampada che utilizzerete per illuminare l'area dove lavorate. Questi cartoncini sono infatti realizzati da emulsioni che sono praticamente insensibili alla luce rossa. Se avete letto il modulo "Luce e Colori" sapete certamente che la luce rossa ha l'energia più bassa di tutto lo spettro luminoso. In particolare ricordiamo che i fotoni della radiazione rossa hanno un'energia pari a circa 1.1 eV, mentre per la luce violetta questa energia è pari a 3.3 eV. Torniamo però ora al nostro semplice esperimento.

Prendete della limatura di ferro e cospargetela in modo uniforme sul cartoncino fotografico. Il cartoncino va posto sopra una superficie più grande, come ad esempio un rettangolo di vetro o di plexiglas rialzata dal tavolo dove operate: questo vi permetterà di effettuare tutte le successive operazioni con più comodità. Fatto ciò, ponete sotto il cartoncino e quindi subito sotto la superficie di appoggio che avete scelto, una calamita sufficientemente potente. Sul cartoncino fotografico la limatura presente si disporrà fedelmente seguendo le linee di forza del campo magnetico generato dal magnete. A questo punto accendete per pochi secondi (uno o due al massimo) la luce nella stanza, per poi riportare nuovamente l'ambiente alla luce rossa. Il tempo di impressione sarà eventualmente stabilito a seconda dei prodotti fotografici che avete reperito. Normalmente basta un singolo flash di luce ambiente. Dopo questa fase, raccogliete il cartoncino fotografico ed eliminate la limatura di ferro che si trovava sopra, assicurandovi che non sia presente nemmeno un granello. È inutile ricordarvi che state sempre in un ambiente illuminato da una debole lampada rossa, quindi con scarse condizioni di visibilità. Immergete a questo punto il cartoncino nella vaschetta contenente la soluzione di sviluppo. Dopo pochi secondi, dovrete vedere apparire la figura caratteristica delle linee di forza del campo magnetico impressionata sul cartoncino. Non fatevi prendere da un eccessivo entusiasmo e se non avete cozzato con la testa da qualche parte nel vostro laboratorio poco illuminato procedete, prelevando con una pinzetta di plastica il cartoncino dal bagno di sviluppo e ponetelo nella vaschetta di acqua di lavaggio, stando attenti a mantenere ancora spenta la luce ambiente. Ricordate che dovete rigorosamente mantenere il laboratorio a luci rosse e, poiché non state facendo niente di sconveniente, prendete il cartoncino dalla vaschetta di acqua di lavaggio e ponetelo nel bagno di fissaggio. Dopo circa 2 o 3 minuti che il cartoncino è rimasto immerso in questa soluzione, la quale provvederà ad eliminare l'emulsione fotografica che non ha reagito con la luce, potete illuminare normalmente l'ambiente e prelevare dal bagno il cartoncino. Allo scopo di essere didatticamente completi, mentre procedete alla conduzione di questa tecnica fotografica, approfittate dell'occasione per richiamare alcuni concetti di chimica applicata alla reazione di fissaggio. I sali di tiosolfato (che un tempo era chiamato "iposolfito"), reagiscono con il bromuro di argento (AgBr), composto base dell'emulsione fotografica presente sul cartoncino, provocando questa reazione di dissoluzione del sale:



Il cartoncino fotografico impressionato sarà quindi, lavato con acqua corrente. La foto n. 1.14 riproduce uno dei risultati da me ottenuti nel lontano 1976.

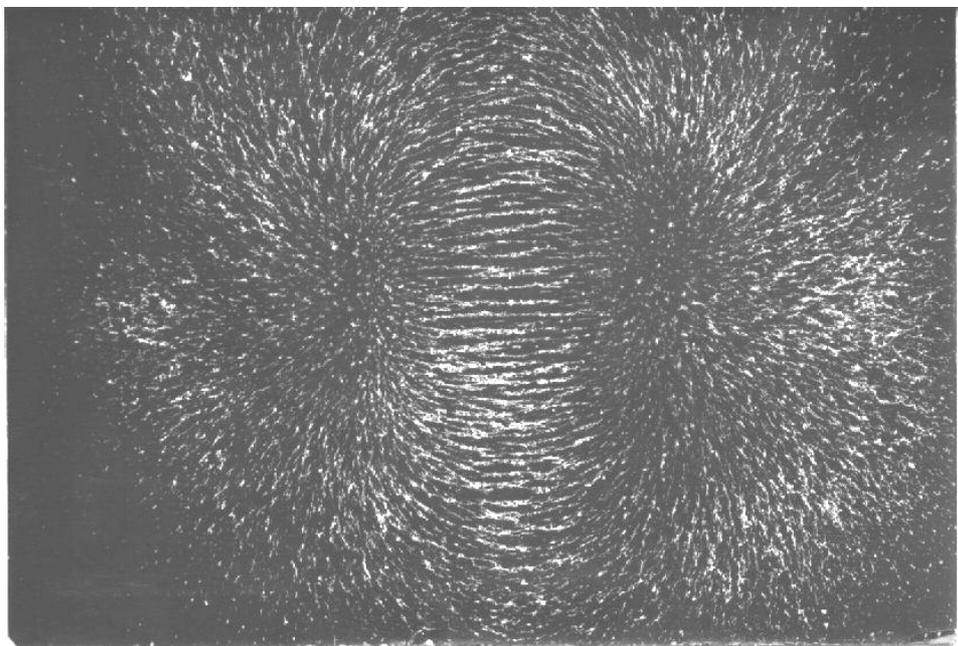


Fig. 1.14 - Immagine che si presenta sul cartoncino fotografico alla fine del processo di fissaggio -

Una volta acquisita una certa dimestichezza, tramite questa tecnica potete divertirvi a fotografare varie condizioni. Potete ad esempio riprendere due magneti posti con i poli omologhi che si respingono, oppure un magnete che attira un corpo metallico e altro ancora dettato dalla vostra fantasia. Un esempio di cartoncino fotografico utile per poter fare questa esperienza, potrebbe essere il tipo con sensibilità 100 ASA della ILFORD tipo multigrade MGIV. Ma qualsiasi altra marca con analoghe caratteristiche può essere idonea allo scopo.

Mostriamo il campo magnetico con una lavagna luminosa. (2 metodo):

La seguente realizzazione pratica è invece molto utile, quando desiderate mostrare velocemente ad un determinato pubblico le linee di forza prodotte da un campo magnetico con l'ausilio di una lavagna luminosa. Mediante questa esperienza potrete agevolmente fare tutte le vostre osservazioni, stando ben certi che tutti i presenti osservino il campo di forza magnetico prodotto dall'eventuale calamita che avete deciso di studiare. Inoltre, potete riprodurre infinite volte la vostra esperienza senza preoccuparvi di pulire o eliminare la fastidiosa limatura di ferro.

Tutto parte dalla possibilità di procurarsi un contenitore di plastica molto trasparente dotato di un basso profilo. La confezione di un giocattolo o un contenitore di minuterie o la confezione esterna di qualche tipo di prodotto commerciale, può risolvere questo problema. Nel disegno illustrato in figura

2.14, ho voluto mostrarvi il contenitore in PVC di tipo circolare, munito di coperchio sempre trasparente, che ho trovato soddisfacente allo scopo.

A questo punto è necessaria la solita limatura di ferro molto pulita e senza ruggine. Le condizioni ottimali si ottengono, tuttavia mediante limatura di nichel.

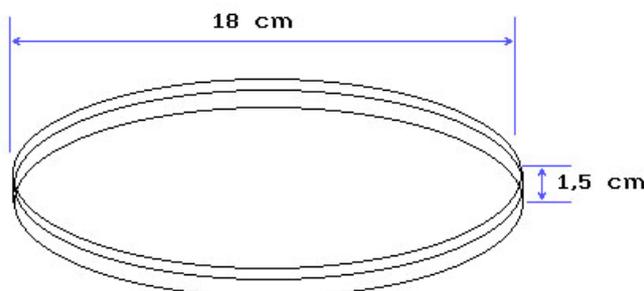


Fig. 2.14 - Dimensioni del contenitore trasparente -

Infatti, essendo il nichel un materiale anch'esso ferromagnetico, sostituisce molto bene il ferro col vantaggio che non si arrugginisce e quindi è più stabile. Se avete difficoltà a trovare la limatura di nichel non vi preoccupate troppo, purché vi assicuriate di prendere della polvere di limatura di ferro buona, lucida e a grana uniforme, mediante la quale otterrete certamente un buon risultato, poiché quest'ultima, una volta posta a contatto con l'olio, si preserverà. Se il contenitore ha più o meno le dimensioni riportate in figura, dovete usare un cucchiaino di polvere di ferro. Mettete il cucchiaino di limatura di ferro nel contenitore trasparente e aggiungete 30 ml di olio di vaselina trasparente. Anche la glicerina può essere adoperata ma i migliori risultati si ottengono o con la vaselina oppure con olio di silicone. Se occorre, potete regolare il grado di viscosità del liquido aggiungendo dell'alcole etilico per liquori. L'ultimo sistema, che ho realizzato nel 1997 e che funziona da diversi anni senza la minima traccia di intorbidimento, è costituito solamente da vaselina. Ricordatevi che se il miscuglio dovesse intorbidirsi è segno che la polvere di ferro introdotta era sporca. In questo caso è inutile completare il lavoro poiché il risultato sarà insoddisfacente. Introdotta polvere e vaselina, occorre sigillare accuratamente il contenitore in modo che il contenuto liquido non fuoriesca. L'uso di nastro isolante autoestinguento, oltre ad una dose di colla cianoacrilica lungo il perimetro del coperchio riesce a garantirvi un lavoro affidabile nel tempo. Fatto questo, dovete aspettare alcuni giorni prima di utilizzare il vostro nuovo apparecchio in modo che gli adesivi adoperati si asciughino bene e facciano il loro effetto.

Per far funzionare questo semplice dispositivo basta scuotere il contenitore in modo che la limatura si distribuisca uniformemente sulla superficie. Successivamente bisogna porlo sulla lavagna luminosa, poggiandolo su due supporti laterali rialzati in modo da poter introdurre sotto di esso un piccolo magnete e regolare il fuoco della vostra lavagna luminosa in modo che sia nitida e ben visibile la limatura di ferro. A questo punto, vedrete sullo schermo la riproduzione delle linee di forza del campo magnetico prodotte dalla vostra calamita. La foto n. 3.14 mostra come si presenta l'apparato nel suo insieme. Poiché essa non è stata effettuata in trasparenza, non ci permette di giudicare l'efficacia dell'effetto che otteniamo quando osserviamo il dispositivo tramite la lavagna luminosa; tuttavia posso garantirvi che la visione è sufficientemente chiara.

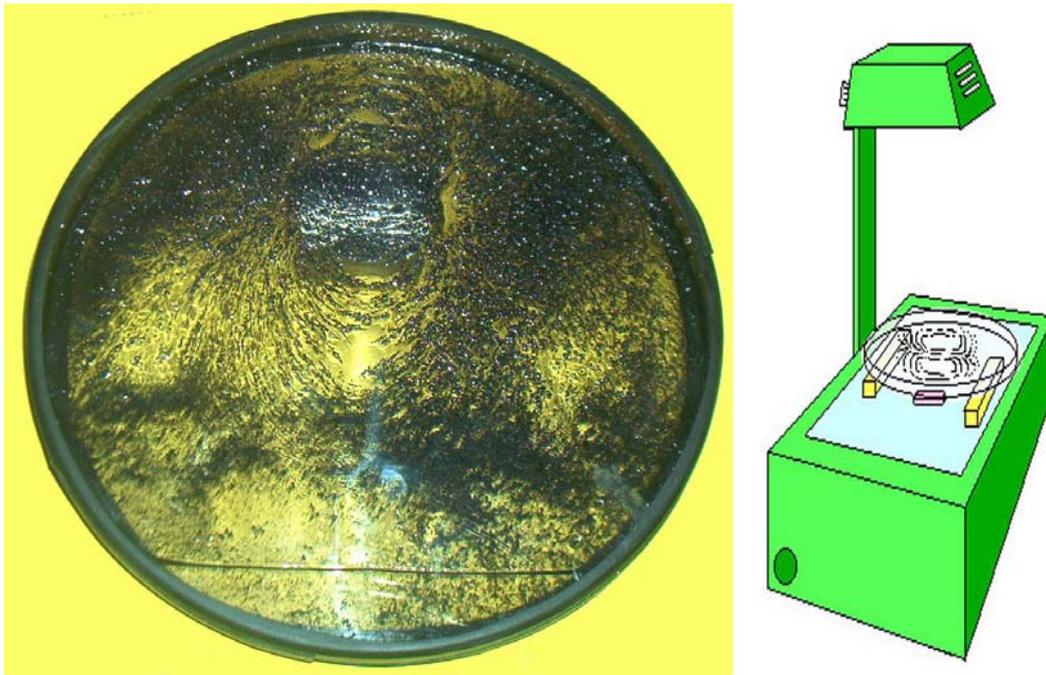


Fig. 3.14 - Dispositivo per l'osservazione di linee di forza di campo magnetico per lavagna luminosa -

L'unico problema, che certamente si verificherà, è legato alla formazione di gocce di olio sulla superficie anteriore del dispositivo. Queste gocce si cominciano a produrre subito dopo lo scuotimento del contenitore con l'olio e la

limatura. Esse impediranno un'osservazione ottimale della figura in trasparenza. A tale proposito è consigliabile aspettare pochissimi minuti per far in modo che le gocce svaniscano da sé prima di porre il magnete sotto il contenitore trasparente ed effettuare le relative osservazioni.

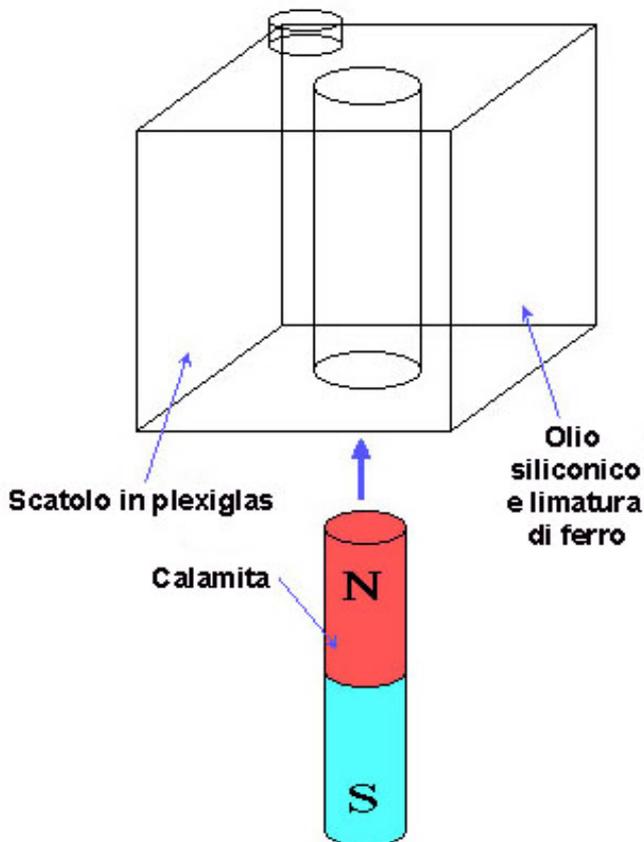


Fig. 4.14

Se avete voglia, ma, soprattutto molta pazienza, potete anche crearvi un dispositivo in grado di mostrare la struttura del campo magnetico prodotto da una calamita in tutto il suo sviluppo tridimensionale. Si tratta di un dispositivo per osservazioni ravvicinate, non idoneo quindi per esame visivo collettivo tramite lavagna luminosa, sul quale voglio darvi solo l'idea di base per realizzarlo.

La figura n. 4.14, mostra tale idea in tutto il suo insieme. Essa consta di un contenitore in plexiglas perfettamente trasparente forato lungo il suo asse centrale. Il contenitore potrà essere scelto di tipo cubico, come mostra la figura, oppure potrebbe anche essere utilizzato un contenitore cilindrico. La scelta è subordinata in base a ciò che riuscite a procurarvi. Successivamente dovete collocare al suo interno un tubo, sempre di plexiglas trasparente, di opportune misure, perfettamente combacianti con le dimensioni dei fori. Questo tubo sarà incollato con resine cianoacriliche, oppure con un'attenta e maestrale adesione a cloroformio. Il cloroformio infatti scioglie il plexiglas e ne permette l'adesione. All'interno del contenitore sarà posta la soluzione di olio siliconico e limatura di ferro. Anche in questo caso il contenitore deve essere agitato per favorire la distribuzione della limatura e dell'olio nell'intercapedine realizzata. A questo punto, basta far passare nel foro interno un magnete cilindrico per osservare la disposizione della limatura all'interno del contenitore principale. La limatura si disporrà uniformemente tutta attorno al magnete che avrete collocato all'interno del tubo mostrando una struttura con involuppo tridimensionale del campo magnetico.

2° Laboratorio

Esperienze con la calamita

TARGET:

Scuola media

Materiale occorrente:

Magnetini al neodimio-ferro-boro, un bicchiere, un sughero largo, una bussola, un ago di acciaio, un filo di spago leggero e sottile.

È molto importante che ci sia, fra l'attrezzatura di ogni docente appassionato, una serie di diversi tipi di magneti permanenti (calamite) delle forme più varie. Piccole calamite molto leggere possono infatti permettere la realizzazione di semplici bussole. A tale scopo, basta prendere un bicchiere di acqua e far galleggiare sulla superficie di quest'ultima un sughero di forma cilindrica con ampia circonferenza di base. Su questo supporto, potremo collocare, facendo in modo che non cada, un piccolo magnete di forma allungata come mostrato in figura n. 5.14. Questa disposizione permetterà di ottenere una semplice bussola. Infatti, il galleggiante con il suo carico magnetico, si orienterà sempre lungo una precisa direzione geografica. Se non disponete di un magnete cilindrico piccolo che possa facilmente essere collocato sul sughero, vi consiglio di procurarvi uno spillo oppure un ago d'acciaio che potrete magnetizzare strisciandolo sopra una calamita dirigendola sempre nello stesso verso ripetutamente. Un'altra semplice idea, per ottenere una bussola molto suggestiva, potrebbe essere quella di appendere ad un filo molto leggero un magnete particolarmente piccolo e potente.

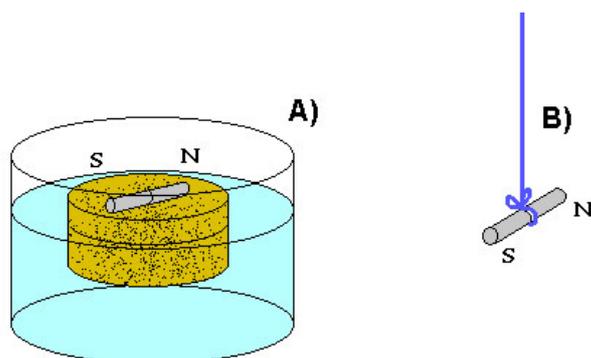


Fig. 5.14 - Bussola utilizzando un magnete al NdFeBo -

La figura 5.14 mostra infatti anche questa disposizione. Se il filo non è particolarmente rigido, vedrete sempre il magnete orientarsi lungo una precisa direzione corrispondente alla direzione dell'asse magnetico terrestre. Per ottenere un sicuro funzionamento di questo dispositivo sarebbe necessario utilizzare un magnete dotato di un campo magnetico molto intenso. In commercio esistono dei magneti al neodimio-ferro-boro che producono un campo veramente molto forte. Se il magnete che avete avuto la fortuna di procurarvi è uno di questi, riuscirete a notare la sua rotazione nell'intento di allinearsi al campo magnetico terrestre anche tenendolo sulla superficie di un tavolo.

Spiegate ai vostri allievi, che il nostro pianeta produce un campo magnetico sufficientemente dipolare. L'espressione "sufficientemente dipolare" significa che possiamo approssimare il campo magnetico naturale a quello di un magnete, che può essere immaginato come dotato di due poli orientati più o meno nella stessa direzione dell'asse di rotazione terrestre. La Terra in pratica si presenta come una grossa calamita. È questa la ragione per la quale, i magneti delle vostre due precedenti esperienze, sono portati a dirigersi verso una determinata direzione. I poli magnetici naturali sono infatti posizionati all'incirca in prossimità dei poli geografici (vedi nota fine laboratorio). Questo fatto consente alle bussole, il cui principio di funzionamento è lo stesso dei dispositivi realizzati negli ultimi due casi precedenti, di fornirci un'indicazione geografica di orientamento. Questo fenomeno accade poiché i poli opposti - eteronomi - di due magneti si attraggono, mentre i poli uguali - omologhi - si respingono. È un'esperienza nota a tutti quelli che hanno posseduto due calamite ed hanno visto che esse si respingono se avvicinate in un certo modo oppure si attraggono se una delle due viene capovolta. La Terra, comportandosi come un grosso magnete, influenza una piccola calamita o un ago della bussola che risulta magnetizzato allo stesso modo. A tal proposito potete cogliere l'occasione per dire una cosa molto importante. Il campo magnetico terrestre ha il polo nord magnetico posizionato in prossimità del polo sud geografico. Viceversa il polo sud magnetico corrisponde esattamente al nord geografico. Purtroppo, molti libri e molte persone commettono un errore quando riportano che il polo nord magnetico corrisponde al polo nord geografico. La ragione di questo fatto dipende da un problema di convenzioni stabilite da leggi elettrotecniche che riguardano proprio il polo nord dell'ago magnetizzato di una bussola. Per definizione, noi chiamiamo polo nord del magnete bussola, la parte dell'ago magnetizzato che si orienta verso il polo nord geografico. In base a questa affermazione, scaturiscono tutta una serie di

regole che compongono le leggi dell'elettromagnetismo. Se abbiamo detto che poli magnetici opposti si attraggono, mentre poli uguali si respingono, avendo chiamato "polo nord" il polo della calamita che punta verso il nord geografico, avremo che necessariamente il polo nord geografico è costituito da un polo sud magnetico. Se così non fosse, avremo il paradosso che il polo nord della calamita-bussola è attratto dal polo nord della calamita-Terra. Il che è assurdo perché poli uguali si respingono, non si attraggono.



Fig. 6.14 - Una bussola professionale -

NOTA: Il polo sud magnetico che corrisponde come abbiamo detto grossomodo al nord geografico, risiede attualmente (anno 2003) "esattamente" in una delle Isole Regina Elisabetta (arcipelago artico Americano), alla latitudine 75°N e longitudine 100°W ; il polo nord magnetico che corrisponde all'incirca vicino al polo sud geografico è ubicato nella terra di Adelia (Antartide) a latitudine 68°S e longitudine 140°E . Questi poli non sono diametralmente opposti, cioè non passano per il centro della Terra. Inoltre, l'asse magnetico è più o meno inclinato di circa 11° rispetto all'asse di rotazione. Questi poli, per ragioni ancora non perfettamente conosciute, si spostano lentamente nel tempo.

3° Laboratorio **L'elettrocalamita**

TARGET:

Scuola media ed elementare

Materiale occorrente:

Un chiodo da 20 cm, 4 metri di filo di rame smaltato da 1 mm di diametro, chiodini metallici, una pila da 4,5 volt.

Se facciamo percorrere, all'interno di un filo conduttore, della corrente elettrica vediamo che attorno al filo si manifesta un campo magnetico. Questa esperienza, realizzata per la prima volta dal fisico danese Hans Christan Oersted (1792-1871) nel 1823, apre un nuovo settore di ricerca denominato "l'elettromagnetismo". Oersted stabilisce così una relazione tra correnti elettriche e campi magnetici. Il matematico francese André Marie Ampere (1775-1836) venuto a sapere della rivoluzionaria scoperta di Oersted continua gli esperimenti scoprendo altre importanti proprietà legate agli effetti di queste correnti elettriche e dei campi magnetici da esse prodotte.

Per poter effettuare un semplicissimo esperimento che possa dimostrare questo fenomeno, dovrete procurarvi alcuni metri di filo di rame smaltato di circa 1 mm di diametro. Posso assicurarvi che sono sufficienti 2 o 3 metri per avere già un certo effetto, ma con 4 metri otterrete un fenomeno più evidente. Il filo deve essere avvolto attorno ad un chiodo di ferro lungo 20 cm. La foto n. 7.14 mostra più o meno come può apparire il vostro manufatto. Questa realizzazione prende il nome di "elettromagnete" o anche "elettrocalamita". Il filo di rame smaltato potete procurarvelo rivolgendovi a un vostro amico che si occupa di riparazioni elettriche o elettroniche. Oppure potete voi stessi svolgerlo da un vecchio motore in disuso oppure da qualche trasformatore elettrico di alimentazione che avete in garage o in qualsiasi altro manufatto elettrico che può contenerlo. Voglio ricordarvi che il filo di rame è smaltato, quindi, è ricoperto di

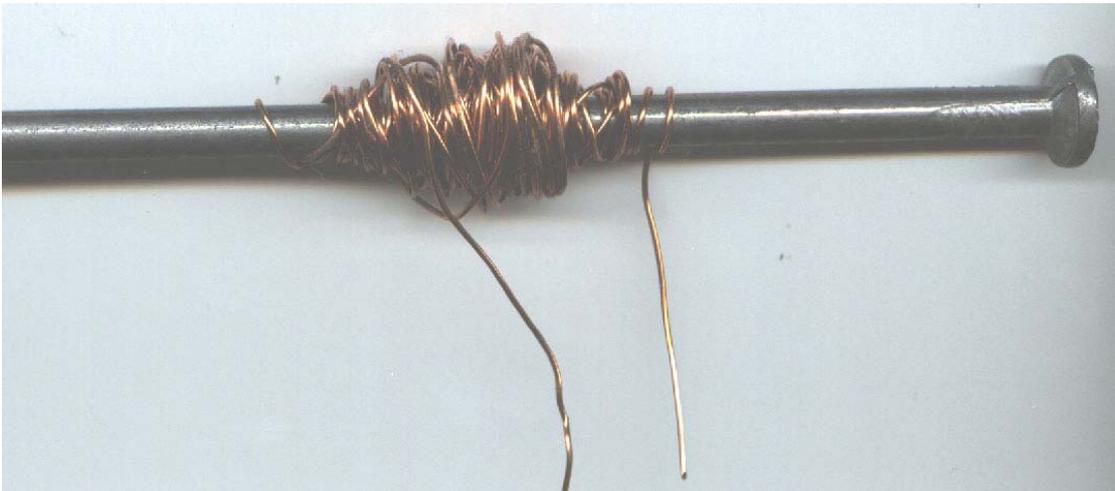


Fig. 7.14 - Elettrocalamita effettuata in aula con un semplice chiodo -

un sottile strato di vernice isolante, che vi permette di serrare le spire di filo attorno al chiodo di ferro senza il rischio che fra queste spire possa generarsi un corto circuito. Pertanto, dopo aver avvolto la bobina di filo attorno al chiodo, per poter connettere il vostro elettromagnete ad una fonte di alimentazione elettrica, come ad esempio una pila, dovete preoccuparvi di grattare da ciascuna estremità del filo di rame un po' di smalto. Questa operazione può essere resa più semplice se, tramite un piccolo accendino a gas o una qualsiasi fiamma, riscaldate l'estremità del filo di rame in modo da far bruciare la vernice e poi grattate lo smalto tramite una retina metallica. Quella che si usa in cucina per pulire le pentole è straordinariamente efficace. Questa procedura essendo estremamente semplice potete, anzi dovete, effettuarla direttamente in aula a

contatto con il vostro pubblico di allievi. La realizzazione dell'avvolgimento attorno al chiodo di acciaio, effettuata in aula è fondamentale per ottenere la più elevata valenza didattica da questa prova. Mentre avvolgete il filo di rame intorno al chiodo di ferro, utilizzate questo tempo per informare i vostri allievi che questa operazione consente di aumentare il campo magnetico prodotto dal filo. Essendo il campo magnetico legato alle caratteristiche geometriche del conduttore, tramite l'avvolgimento, si somma l'effetto magnetico prodotto da ogni centimetro del filo di rame. Il chiodo di ferro sarà un ulteriore espediente per rafforzare ancora di più il campo magnetico prodotto dalla vostra bobina in quanto assolverà alla funzione di "nucleo magnetico" dell'elettrocalamita. A questo punto il vostro elettromagnete è pronto e quindi, per completare l'esperienza potete provare ad alimentarlo con una pila da 4,5 V tipo piatta.

Mettete un mucchietto di chiodini sul tavolo e, avvicinando il vostro elettromagnete sconnesso dalla pila, mostrate ai vostri allievi che non si verificano evidenti effetti magnetici. State attenti a questo punto poiché potrà capitare, che se usate dei chiodini molto leggeri, alcuni di questi possono essere leggermente attratti dal chiodo di ferro anche nelle condizioni in cui l'elettromagnete non è alimentato. Se state facendo questa lezione ad un pubblico di scolari di una scuola primaria, potete evitare che questo accada, utilizzando dei chiodi di ferro più grossi e più pesanti. Altrimenti spiegate ai vostri allievi che non è difficile che un chiodo di ferro, essendo costituito da materiale ferromagnetico, possa avere una magnetizzazione residua. Dopo aver mostrato che il vostro elettromagnete non alimentato da alcuna corrente, non manifesta alcun fenomeno magnetico, collegate le estremità della bobina alla pila. La foto n. 8.14 mostra in modo schematico il vostro elettromagnete connesso elettricamente ad una pila piatta da 4,5V. Appena collegate la pila, se quest'ultima è ben carica, vedrete che l'elettromagnete produce un campo magnetico molto forte grazie al quale, i chiodini che avete raggruppato al centro del tavolo, verranno da esso attratti in modo evidente. Se state attenti potete effettuare anche l'osservazione del fenomeno di induzione magnetica. Infatti, i chiodini attratti dal magnete diventeranno, a loro volta, dei magneti ed attireranno altri chiodini. Mentre proseguite nella sperimentazione, noterete un certo riscaldamento del filo di rame poiché la corrente che sta circolando ha un intensità molto alta e quindi dissiperà energia sotto forma di effetto joule. Se l'effetto di magnetizzazione residua non si presenterà all'inizio della prova, si osserverà certamente dopo che avrete fatto circolare corrente nell'elettrocalamita. Infatti, il campo magnetico prodotto dalla corrente elettrica, che scorre nel filo, indurrà certamente sufficiente energia nel materiale affinché si produca questo fenomeno che può avere, come effetto secondario, quello di tenere i chiodini ancora attaccati al chiodo anche se la corrente smette di circolare. Se però usate, come ho già detto, dei chiodi o delle parti metalliche dotate di peso opportuno, non avrete nessuna difficoltà.

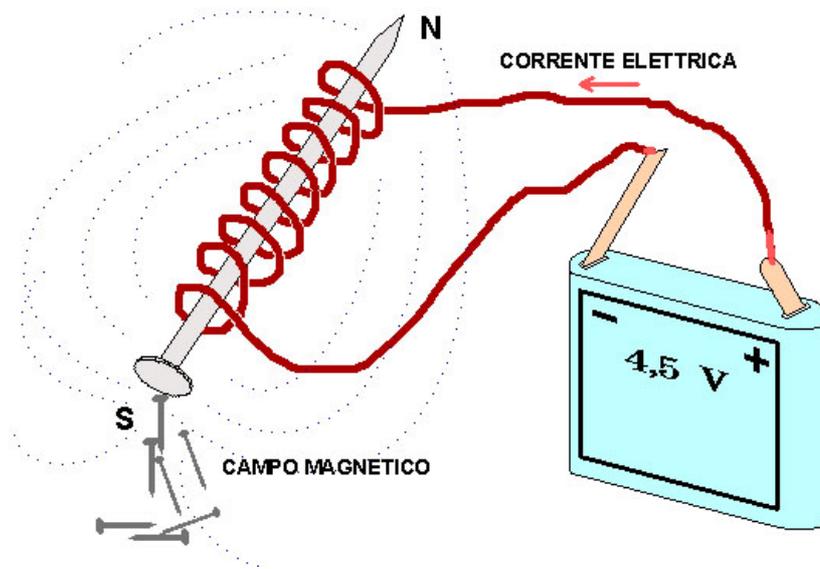


Fig 8.14 - Esperimento con l'elettrocalamita autocostruita -

Per un insegnante di scienze di scuola media, ma anche per uno che opera nelle ultime classi di un ciclo di scuola elementare, questa esperienza, condotta con le modalità che ho indicato in questo laboratorio è dotata di un ottimo livello didattico. Tuttavia un insegnante di fisica potrebbe desiderare di mostrare ai propri allievi il campo magnetico prodotto da un filo conduttore rettilineo percorso da corrente elettrica: si tratta di una esperienza fondamentale e didatticamente necessaria che risulta infatti illustrata in tutti i libri di fisica che trattano il magnetismo. Tuttavia essa non è un'esperienza semplice, e questo fatto può sembrare davvero paradossale visto che occorrono pochissimi apparecchi.

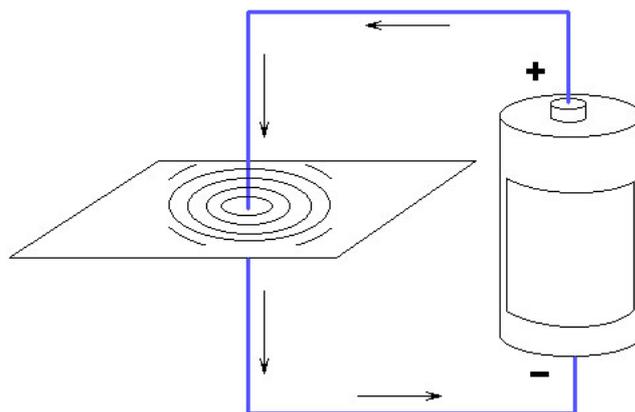


Fig. 9.14 - Campo magnetico attorno ad un filo rettilineo -

Il problema è legato al fatto che, per osservare il campo magnetico attorno al filo conduttore, bisogna farvi circolare all'interno una corrente molto elevata. Se volete rilevare il campo magnetico attorno al filo utilizzando una bussola sensibile, non c'è nessun problema, ma se vogliamo visualizzare con della limatura di ferro il campo magnetico che si genera attorno ad un semplice filo rettilineo, dobbiamo provvedere a inviare nel conduttore una corrente più

intensa. La figura 9.14 mostra, in linea di principio, l'apparato sperimentale ridotto nelle sue funzioni fondamentali. Un cartoncino sul quale abbiamo disposto uniformemente della limatura di ferro, un filo che attraversa il cartoncino da una parte all'altra, e una pila. La pila potrebbe essere proprio il tipo torcia da 1.5 V mostrata nella figura. Questa pila è capace di generare se sufficientemente carica, anche se per breve tempo, una corrente elettrica anche di 3 ampere. Il filo di rame deve però avere questa volta uno spessore più elevato, un diametro di 1.5 – 2 mm potrebbe essere ottimale. Se provate ad allestire l'apparato sperimentale come è mostrato dalla figura dovreste ottenere il risultato voluto. In ogni caso vi avverto che, visto il valore limitato della corrente elettrica ottenibile da una pila tipo torcia, non vi aspettate niente di eccezionale.

Prima di chiudere questo laboratorio voglio fornire un'indicazione molto importante per potersi costruire una bussola dotata di involucro trasparente che vi permetterà certamente di poterla collocare sopra una lavagna luminosa per mostrare ai convenuti gli effetti magnetici di una debole calamita o anche quella di un filo percorso da corrente elettrica. Per raggiungere questo scopo, la realizzazione pratica è estremamente semplice. Riferendoci alla figura n. 10.14 potete vedere che occorre procurarsi un contenitore trasparente in plexiglas o in altro materiale di forma cilindrica a basso profilo. A volte si può essere fortunati riuscendo ad utilizzare l'involucro di un semplice giocattolo, in altri casi possono essere adoperati contenitori per alimenti. Giusto al centro del contenitore prescelto collegherete una puntina da disegno, incollandola su una delle due superfici. Fatto questo, dovete procurarvi una bussola economica e smontare da essa l'ago magnetico che deve essere molto simile a quello raffigurato nella figura n. 10.14. Tale ago magnetico sarà collocato sopra la puntina e vi assicurerete che sia in grado di muoversi liberamente. Se si vuole, si potrebbe anche aggiungere con dei trasferibili oppure con un semplice pennarello indelebile, i punti cardinali disegnandoli sul coperchio superiore. Vi ricordo però, che quando sottoporrete la bussola alla luce della lavagna luminosa potete mettere a fuoco solo una cosa per volta. Se renderete nitida l'immagine regolando la messa a fuoco sull'ago magnetico, dovete sacrificare la visione chiara della scritta. Altrimenti dovete collocare internamente al contenitore, un cerchio trasparente alla stessa altezza dell'ago magnetico sul quale avrete annotato i punti cardinali della rosa dei venti.

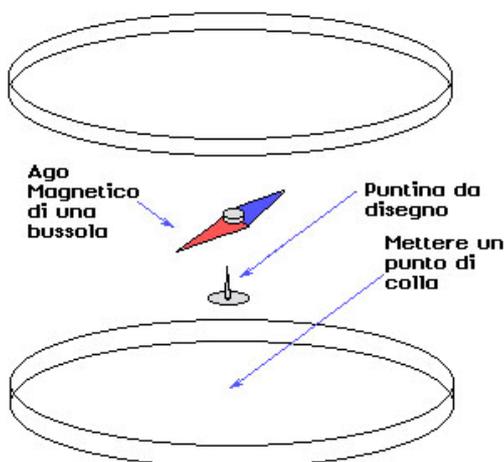


Fig. 10.14 - Semplice bussola per lavagna luminosa -

4° Laboratorio

La legge di Faraday-Lenz-Neumann

TARGET:

Scuola media e scuola secondaria

Materiale occorrente:

Una bobina di filo di rame molto induttiva dotata di nucleo di ferro, un galvanometro con indice centrale, una calamita.

Nel 1831 Michael Faraday (1791-1867) scoprì che è possibile indurre una corrente elettrica in un conduttore se nelle sue vicinanze se si verifica una variazione di campo magnetico. In effetti, quello che scoprì Faraday può essere così semplicemente riassunto: se poniamo un conduttore elettrico nello spazio e nelle sue vicinanze agiamo una calamita osserviamo, ai capi del conduttore, l'insorgere di un potenziale elettrico. Se colleghiamo gli estremi di questo conduttore otterremo anche la circolazione di una certa corrente. Misurare questo potenziale applicando uno strumento ad un semplice filo conduttore sarebbe troppo difficile, poiché il potenziale che si genera è molto piccolo ma, avvolgendo il filo numerose volte in modo da realizzare un solenoide, accresceremo notevolmente la sua sensibilità. Se poi inseriamo, nel solenoide così ottenuto, un materiale ferromagnetico, il potenziale che misureremo ai capi del solenoide sarà ancora maggiore. La scoperta di Faraday fu chiamata induzione elettromagnetica ed alcuni anni dopo, fu studiata accuratamente dal fisico russo Heinrich Friedrich Emil Lenz (Emilij Kristianovic' Lenz) (1804 - 1865). (vedi note a fine laboratorio).

Per effettuare un' esperienza, che si propone semplicemente di verificare questo fenomeno, è necessario disporre di una bobina di filo molto induttiva. In pratica una bobina è un avvolgimento che viene ripetuto molte volte su se stesso in modo da presentare una estesa quantità di filo elettrico avvolto. Per trovare una bobina di questo tipo è possibile smontare un campanello d'ingresso di una abitazione oppure, rivolgendosi ad un amico riparatore di videogames, è possibile in questo caso, farsi dare una di quelle adoperate all'interno dei flipper elettronici. Se avete difficoltà a procurarvi una bobina del genere potete sempre costruirvela. Per aumentare la sensibilità dell'esperimento è necessario che all'interno della bobina sia collocato un nucleo di materiale ferromagnetico. Potete assolvere a questa necessità utilizzando un grosso perno d'acciaio oppure all'occorrenza creare un struttura tubolare costituita da un fascio di chiodi da falegname. La figura 11.14 mostra come potrebbe presentarsi l'insieme delle parti.

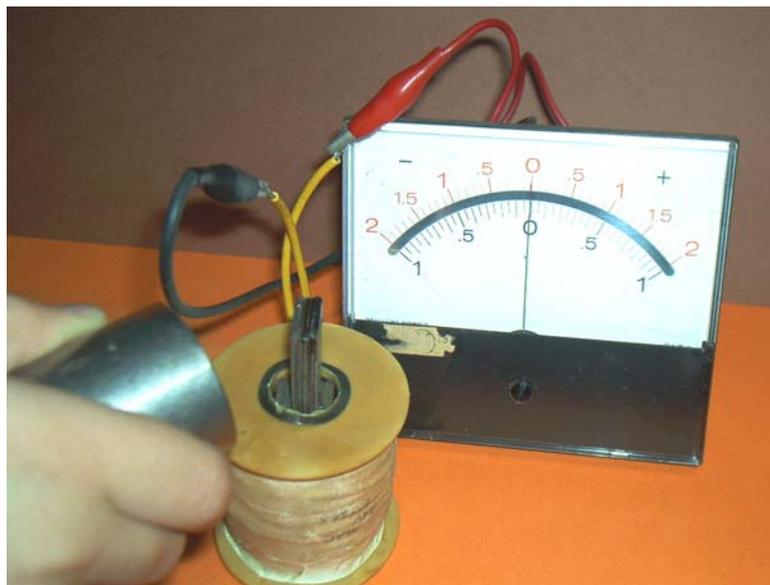


Fig. 11.14 - Legge di Faraday / Lenz -

L'accessorio più difficile da procurarsi è lo strumento misuratore, o galvanometro. Credo che sia indispensabile acquistarlo presso un rivenditore di materiali elettronici indicando la necessità di uno strumento misuratore di corrente tipo microamperometrico di buona sensibilità, che dovrebbe avere l'indice posizionato a centro scala. In alcuni casi, se si ha fortuna, è possibile reperire questi strumenti nei mercatini rionali di materiale usato. Il consiglio riguardante la posizione dell'indice dello strumento è indispensabile se volete mostrare ai vostri allievi la legge di Lenz. Se invece il vostro intento è mostrare soltanto la presenza del potenziale di induzione magnetica è possibile avvalersi anche di un più comune strumento con indice non centrato.

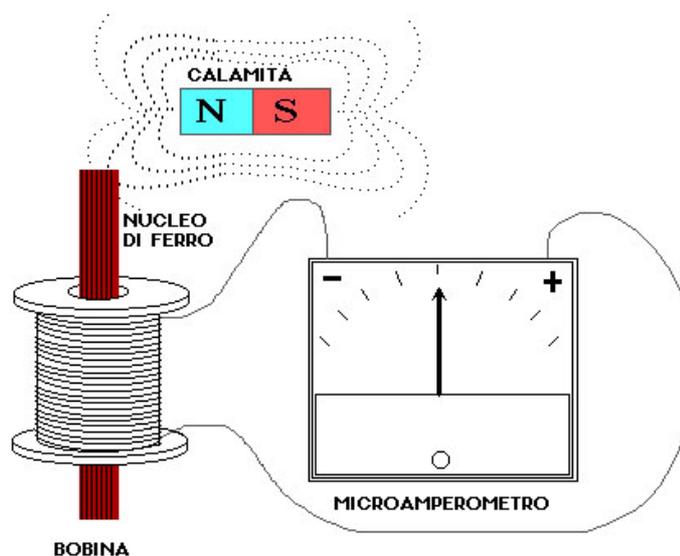


Fig. 12.14 - Schema dell'esperimento di Faraday/Lenz -

La figura 12.14 mostra come deve essere collegato lo strumentino alla bobina. Munendovi di una buona calamita sarete in grado di osservare immediatamente il movimento dell'indice dello strumento appena vi appresterete a muovere quest'ultima nei pressi della bobina: più questi

movimenti saranno rapidi più elevate saranno le indicazioni dell'indice dello strumento. È proprio su questo fenomeno che si basa il processo di trasformazione dell'energia meccanica in energia elettrica. I moderni alternatori, presenti nelle centrali idroelettriche, geotermiche o nucleari, convertono infatti, in energia elettrica, il movimento rotatorio della turbina. Quest'ultima è connessa al rotore dell'alternatore che a sua volta determina, con la sua rotazione, una variazione continua di campo magnetico nei pressi del circuito statore. È proprio nel circuito statore, che risulta a sua volta costituito da avvolgimenti simili alla bobina usata in questo esperimento, che il fenomeno dell'induzione elettromagnetica produce il potenziale elettrico che, opportunamente trattato, raggiunge le nostre case per provvedere a fornirci l'energia elettrica necessaria.

NOTE:

La legge dell'induzione elettromagnetica, scoperta da Faraday e studiata successivamente da Lenz, permise anche al fisico tedesco Franz Ernest Neumann(1798-1895) di postulare le relazioni analitiche che spiegavano esattamente il modo in cui la legge poteva essere interpretata. In pratica, ogni volta che varia il flusso d'induzione magnetica concatenato con un circuito, si desta in questo una corrente indotta, il cui senso è tale da opporsi alla variazione del flusso del campo magnetico che la produce, e il cui potenziale elettrico è proporzionale direttamente alla variazione del flusso e inversamente al tempo durante il quale avviene tale variazione.

5°Laboratorio

Interazioni elettromagnetiche in un tubo di materiale conduttore

TARGET:

Scuola secondaria

Materiale occorrente:

Un tubo in alluminio e uno in plastica lunghi circa un metro e con diametro interno di circa 15 mm, un magnetino al neodimio ferro boro che entra perfettamente nei due tubi.

L'esperimento che intendo presentarvi è una variante dell'esperienza precedente. Posso garantirvi che mostrando l'esperimento ad un pubblico di ragazzi di scuola superiore, riscuoterete un elevato interesse per l'effetto plateale che esso è in grado di generare. A tal proposito, dovete procurarvi due tubi, uno in alluminio e l'altro di plastica, lunghi circa 1 metro e con diametro della sezione interna di circa 15 mm. Il diametro interno non è vincolante, l'importante che il magnete di piccole dimensioni, che vi siete procurato, possa passare facilmente in entrambi i tubi scivolando all'interno di essi lungo la loro lunghezza. Un'idea potrebbe essere anche quella di assemblare i due tubi mettendoli uno vicino all'altro uniti con del nastro isolante. Tubi di alluminio delle

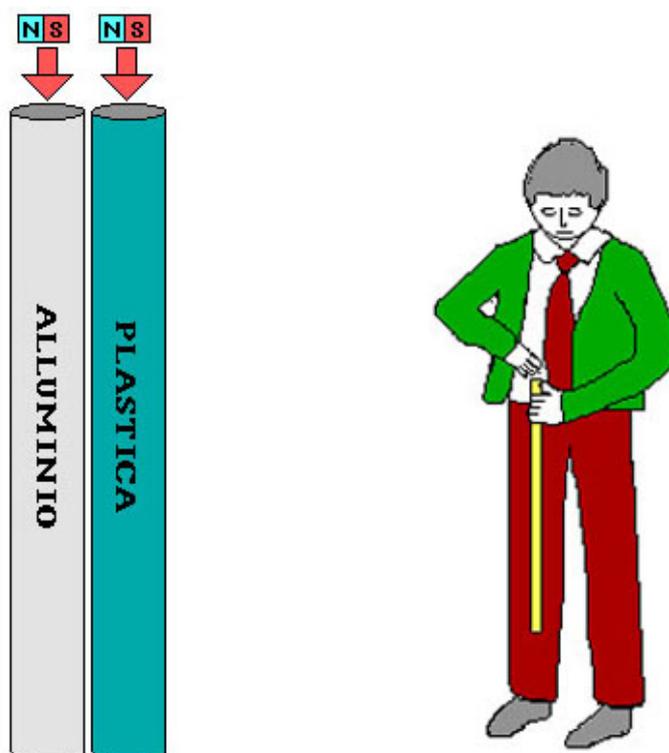


Fig. 13.14 - Frenatura elettromagnetica di una calamita -

dimensioni indicate possono essere facilmente procurati nei negozi di bricolage oppure presso un ferramenta. Per quanto riguarda i tubi di plastica è possibile rivolgersi presso un negozio di articoli per acquari. Il magnete, potrebbe diventare l'elemento critico poiché per avere un funzionamento sicuro dovete necessariamente procurarne uno molto particolare. Presso rivenditori specializzati è possibile procurarsi un magnete al neodimio-ferro-boro con le dovute caratteristiche. Una indicazione utile potrebbe essere quella di rivolgersi ai rivenditori di materiale elettronico per corrispondenza. In ogni caso è sufficiente disporre di un magnete cilindrico delle dimensioni almeno di 10 mm di lunghezza e 4 o 5 mm di larghezza con induzione magnetica misurata alle sue estremità di circa 1 wb/m^2 . Disponendo di un magnete ancora più grande l'effetto è straordinariamente più evidente e l'esperimento quindi risulterà più efficace.

A questo punto non vi resta che divertirvi. Prendete il magnete e fatelo scivolare inizialmente nel tubo di plastica: lo vedrete che cadere a terra piuttosto velocemente così come è normalmente prevedibile. Potrebbe non essere una cattiva idea porre sul pavimento dove fate cadere il magnete, un panno o un qualsiasi altro materiale soffice per attutire la caduta del magnete in quanto, questi magneti al neodimio ferro boro sono piuttosto fragili. Fatta la prima prova, provate ora a far cadere il magnete attraverso il tubo di alluminio. In questo caso assisterete ad una interessante variazione: il magnete nel cadere impiegherà un tempo molto maggiore.

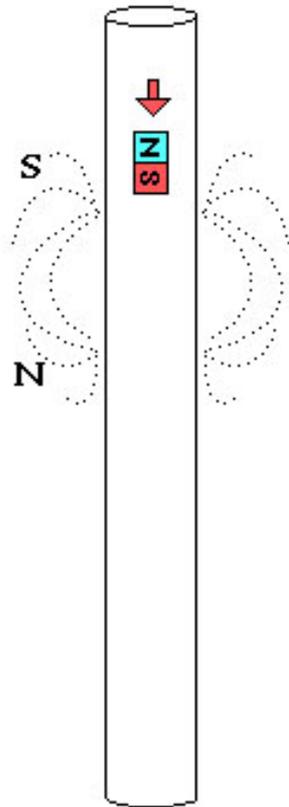


Fig. 15.14

Molto spesso, dalla sala ghermita di giovani allievi, è possibile che qualche sprovveduto possa pensare all'alluminio dicendo che il magnete è appunto attratto dal metallo e quindi, durante la caduta, trova un certo impedimento. Se si dovesse verificare una tale azzardata considerazione in seno all'eventuale gruppo di discenti, voi immediatamente farete notare il palese errore mostrando in modo disinvolto che il magnete non risulta affatto attratto dal tubo di alluminio per il fatto che l'alluminio non è ferromagnetico. Vi consiglio di aspettare qualche tempo prima di comunicare ai vostri discenti la vera ragione del fenomeno. Quasi sempre, dopo qualche minuto, uno degli allievi più brillanti comincerà a far funzionare il cervello e voi ovviamente, senza dimenticarvi di quelli che hanno maggiore difficoltà percettive, vi appresterete lentamente a spiegare il fenomeno del misterioso rallentamento. Si tratta sempre di una manifestazione della legge dell'induzione elettromagnetica di Faraday-Lenz-Neumann.

Infatti, quando il magnete comincia cadere nel tubo in alluminio, crea una variazione di flusso magnetico che si verifica appunto per il fatto stesso che il magnete è in caduta. L'alluminio pur non essendo ferromagnetico è indubbiamente un buon conduttore di elettricità e lo si può considerare come se lungo la sua dimensione, fosse fatto da infinite spire di alluminio tutte in cortocircuito. La variazione di flusso magnetico prodotta dal magnete in caduta, induce in queste spire di alluminio un potenziale elettrico in linea con la legge di Lenz. Poiché le spire sono in cortocircuito, comincerà a circolare una corrente che a sua volta creerà un campo magnetico. Vedi figura 15.14. Questo campo magnetico, in base alla stessa legge di Lenz, avrà verso tale da opporsi alle cause che l'hanno generato (vedi nota del precedente laboratorio). Col risultato finale che il campo indotto, essendo opposto a quello del magnete, ne rallenterà la caduta qualunque sia l'orientamento del magnete.

Nel tubo di plastica questo fenomeno non potrà verificarsi poiché la plastica non è conduttrice di corrente di conseguenza la caduta del magnete sarà regolata dalle sole leggi del campo gravitazionale, ovviamente disturbate dagli urti lungo la parete del tubo, dagli attriti fra il magnete l'aria e le pareti e dalle acrobazie che esso sarà in grado di compiere a seconda della sua dimensione e della sua forma.

Potete informare i vostri studenti che all'interno delle spire virtuali localizzate lungo la sezione del tubo di alluminio interessate al fenomeno del passaggio del magnete, si verificano circolazioni di corrente di grande amperaggio. Sono possibili valori anche di diverse decine di ampere.

6° Laboratorio

Progetto Tethered e legge di Lenz

TARGET:

Scuola secondaria

Materiale occorrente:

Riprodurre i disegni allegati in formato slides

Questo laboratorio costituisce un'idea per approfondire ulteriormente la legge di Lenz mediante la quale vi si presenta un'ulteriore possibilità di condurre una lezione, questa volta più teorica che pratica, su questa legge fondamentale dell'elettromagnetismo, di cui abbiamo ampiamente parlato nei laboratori precedenti. Trarremo spunto e aggiungeremo elementi comunicativi innovativi da un esperimento spaziale effettuato negli anni novanta. Si tratta di un argomento di cui ho già parlato nell'introduzione di questo testo. Nel 1996 la missione STS-75 della NASA, realizzata tramite lo Shuttle Columbia, oggi distrutto a causa del triste incidente avvenuto nel febbraio del 2003 al suo rientro verso Terra nel corso del quale per tutto il suo equipaggio, ha effettuato un esperimento in orbita molto interessante. L'esperimento fu preparato grazie all'intuizione del professor Giuseppe Colombo dell'università di Padova e consisteva nello stendere un filo conduttore, lungo 20 chilometri, nello spazio tramite l'azione combinata di una navicella tipo Shuttle e di un satellite sferoidale che aveva il compito di guidare il filo ed effettuare inoltre alcune misure fisiche essenziali. In effetti, l'esperimento si completò con esito non completamente soddisfacente poiché il filo si spezzò, a causa probabilmente di un cortocircuito, che avvenne quando questo fu steso solo per 19,200 km. Tuttavia, anche se l'esperimento si concluse con la perdita nello spazio del satellite TSS (Tethered Satellite System), si riuscirono a fare le misure necessarie che decretarono un certo successo della prova e il raggiungimento di alcuni obiettivi che la fase teorica aveva previsto. In realtà, le dinamiche che dovevano essere studiate durante quell'esperimento, erano molto più complesse di quanto possiamo immaginare. Infatti, con esso si voleva dimostrare la possibilità di impiegare il filo conduttore come antenna per comunicazioni a bassa frequenza nello spazio e utilizzare la tecnica della fune per il trasferimento orbitale di carichi con il minimo dispendio di energia. In questa sede tuttavia parleremo di questo esperimento, unicamente per i risultati, indubbiamente raggiunti, come generatore di energia grazie all'interazione del filo conduttore col campo magnetico terrestre.

Per capire perché parliamo della missione Tethered è necessario ricordare un'applicazione della legge di Lenz che si può trovare in tutti i libri di fisica di della scuola secondaria o negli eventuali testi universitari.

Se prendiamo un conduttore rettilineo di lunghezza "l" e lo facciamo muovere con velocità uniforme "u" all'interno di un campo magnetico, ai capi del conduttore si presenta una differenza di potenziale elettrica, chiamata anche tensione elettrica di valore "E".

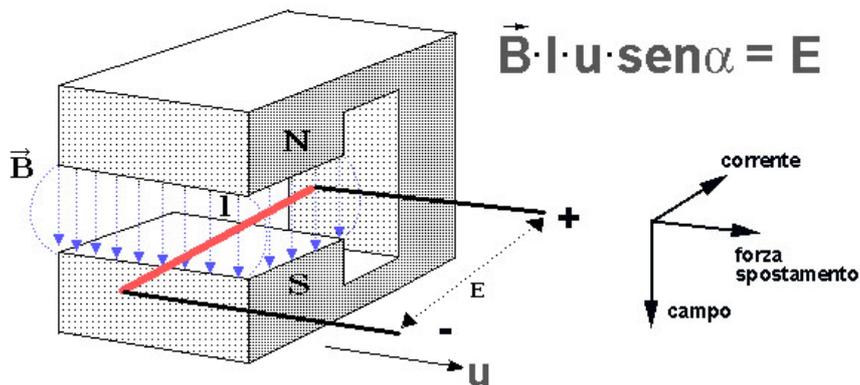


Fig. 16.14 - Fenomeno dell'autoinduzione a carico di un filo che si sposta ad una certa velocità in un campo magnetico -

Questa tensione indotta, dipende dal valore dell'induzione magnetica "B" prodotta dal magnete, dalla lunghezza "l" del filo che attraversa il campo e dalla velocità "u" con cui il filo attraversa la regione di campo prodotta all'interno dell'espansioni polari del magnete. Ovviamente, nella figura 16.14 è indicato anche un termine trigonometrico "sen α" poiché il valore della tensione indotta dipende anche dall'angolo con cui il filo attraversa il campo. Nell'esempio mostrato nella figura n. 16.14 il termine "sen α" può essere considerato uguale a 1 poiché il conduttore risulta essere perfettamente perpendicolare alle linee di forza del campo magnetico. In pratica quindi, se facciamo muovere un filo conduttore in un campo magnetico, possiamo ottenere ai suoi capi una tensione e generare la circolazione di una corrente elettrica da cui possiamo sfruttare una certa quantità di energia.

Il progetto Tethered del 1992 e del 1996 è stato effettuato anche per dimostrare questo importante effetto. Tramite il campo di forza magnetico generato dal nostro pianeta, il conduttore, trasportato dalla navicella Shuttle e guidato dal TSS, è diventato una sorta di generatore elettrico planetario (vedi foto n. 17.14). È straordinaria, la possibilità offerta da questo esperimento per dimostrare al vostro pubblico di allievi l'esattezza della teoria di Lenz sulle correnti indotte. È sufficiente, infatti, sostituire, alla formula che appare illustrata nella figura n.16.14, i dati in nostro possesso, per ricavare la tensione che gli astronauti del Columbia hanno misurato ai capi del filo conduttore. Per effettuare i nostri calcoli è necessario sapere che il Columbia si spostava ad una velocità di 8.000 metri al secondo e che il campo magnetico medio del nostro pianeta si aggira ad un valore di $31 \mu\text{wb}/\text{m}^2$, come appare dalla tabella presente nell'appendice al modulo "Massa e densità". A questo punto, sapendo che il cavo era lungo 20 km cioè 20.000 metri, è facile ottenere il seguente calcolo:

$$E = B \cdot l \cdot u = 31 \cdot 10^{-6} \times 20.000 \times 8000 = 4960 \text{ V}$$

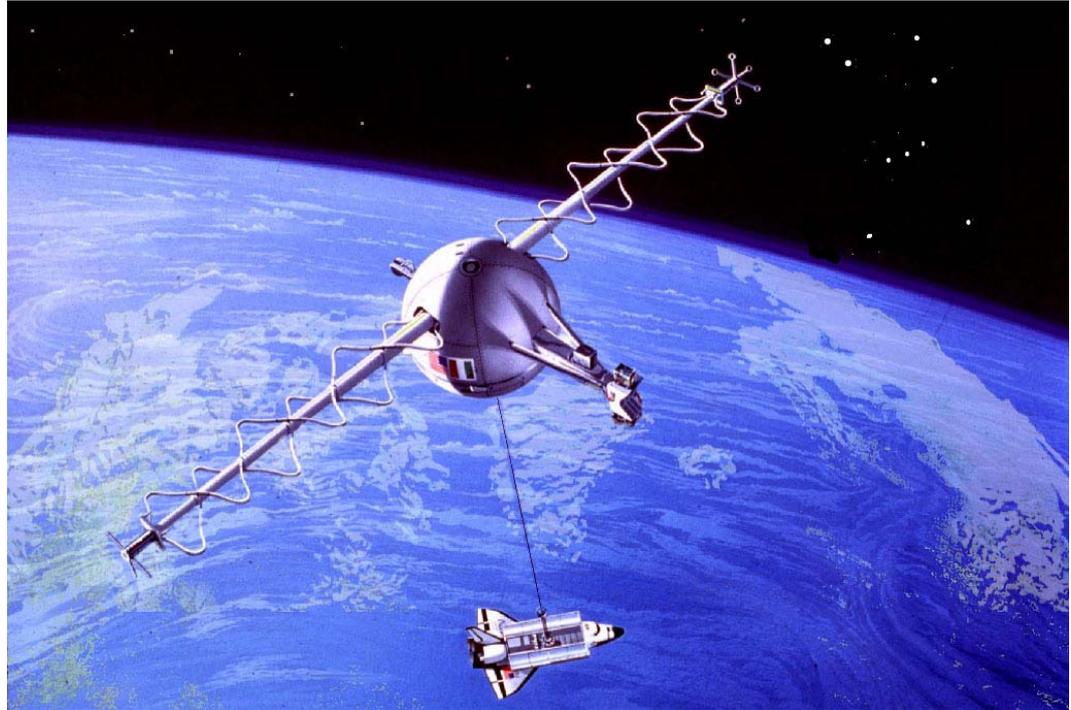


Fig. 17.14 - Missione Tethered -

Che risulta essere all'incirca la tensione misurata dai tecnici della missione Tethered. È molto interessante far notare ai vostri allievi che, per ottenere praticamente la misura di questa tensione ed anche lo sfruttamento energetico di una certa corrente, è necessario creare un circuito di ritorno. Ma come hanno fatto gli scienziati della Nasa a realizzare questa condizione ? Per ovviare a questo problema, a bordo dello Shuttle era stato installato un cannone elettronico a elettroni. Questo cannone, progettato dalla Proel Tecnologie di Firenze, sparava elettroni nello spazio in modo da chiudere il circuito e permettere la misura della tensione elettrica che si instaurava fra il TSS e la navicella Columbia. A tal proposito voglio ricordare che, poco prima che il conduttore elettrico si spezzasse, fu misurata una corrente di 500 mA che attraversava il conduttore in rame da 2,5 mm di diametro rivestito di materiali avveniristici quali teflon, kevlar, nomex, grazie alla quale fu possibile ottenere una potenza di circa 2,5 kW . Il valore di questa potenza non deve essere considerato trascurabile, visto che risulta approssimativamente uguale a quella richiesta per far funzionare gli impianti elettrici di una civile abitazione. Qui di seguito ho voluto presentarvi, con la figura 18.14, una slide che potrebbe essere presentata al vostro pubblico di allievi per riassumere e descrivere quanto detto.

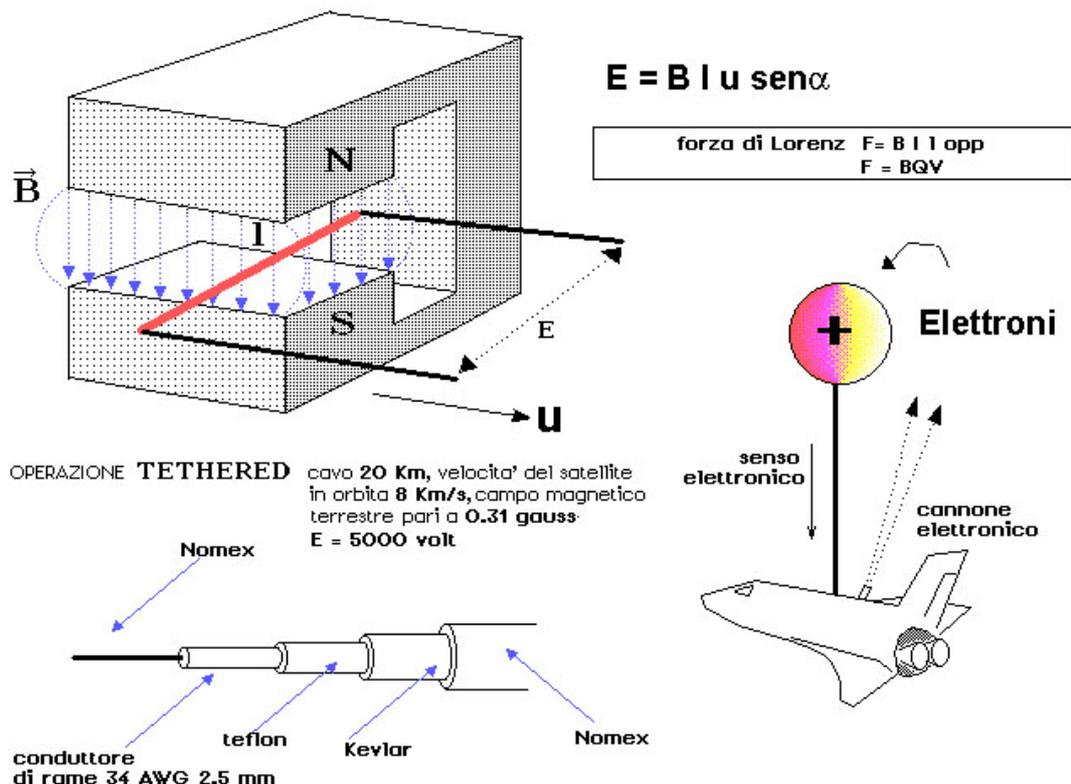


Fig. 18.14 - Esempio di proiezione preparato per una lezione -

Durante una lezione sulla legge di Lenz, in cui avete deciso di parlare di questo progetto spaziale per accrescere l'attenzione e la curiosità della platea, vi consiglio di documentarvi maggiormente sui dettagli della missione e sulle tecnologie delle navette spaziali. Una lezione di questo tipo l'ho effettuata diverse volte e ho sempre riscosso un particolare interessamento da parte dei discenti. In modo particolare, alcuni dei presenti ricordavano la formula illustrata, anche a distanza di diversi mesi, poiché associavano le grandezze fisiche ai valori numerici e ai fatti sperimentali narrati durante la lezione.

7° Laboratorio Levitazione magnetica

TARGET:

Scuola secondaria

Materiale occorrente:

Menischi di bismuto, stagno, calamita, magneti al neodimio ferro boro

Mostrare un oggetto in perfetta sospensione aerea come se fluttuasse nell'aria senza il minimo peso, potrebbe essere considerata, senza dubbio, un'impresa estremamente complicata. Invece, voglio dimostrarvi come, questo fenomeno, può essere realizzato senza troppe difficoltà, spendendo poche risorse

economiche e soprattutto, facendo un semplice e interessante esperimento scientifico.

Dovete in qualche modo procurarvi del bismuto metallico. Per esempio, potete comprarlo tramite un rivenditore di materiali chimici, facendo attenzione di richiedere un prodotto non necessariamente puro e possibilmente in scaglie oppure in palline. Una buona fonte possono essere i pallini da caccia cosiddetti "ecologici" dove, al posto del piombo, si utilizza bismuto, che risulta atossico. Il problema della purezza del bismuto che dovete utilizzare, riguarda aspetti unicamente di ordine economico. Il bismuto è un materiale fortemente diamagnetico e, come tutti i materiali dotati di questa proprietà, possiede la tendenza ad espellere le linee di forza di un campo magnetico generando un campo opposto a quello in cui è introdotto; perfettamente al contrario dei materiali ferromagnetici. Nell'allegato di questo modulo potete trovare eventuali approfondimenti su questo argomento. Proprio grazie a questa proprietà, noi utilizzeremo il bismuto per creare una specie di lente magnetica, in grado di creare una specie di trappola per il campo magnetico generato da un magnetino al neodimio-ferro-boro (NdFeBo), che risulta essere l'oggetto che sospenderemo in levitazione. A proposito del magnetino al neodimio-ferro-boro, abbiamo già parlato ampiamente di questa potente calamita in alcuni laboratori precedenti. Procurarsi un tale magnete, risulta una condizione necessaria per garantire un certo risultato da questo esperimento.

Per eseguire l'esperimento dobbiamo innanzitutto costruirci due menischi di bismuto. Il bismuto fonde a circa 271°C , quindi sarà piuttosto facile provvedere a questa preparazione. Lo stampo con la forma più opportuna potrebbe essere il fondo delle lattine di birra. Bisogna prendere due di queste lattine e dopo averne eliminato il contenuto, saranno poste sottosopra, sulla superficie di un tavolo, e tenute ben ferme e stabili. In un crogiolo di porcellana oppure anche in un pentolino di acciaio deve essere fusa una certa quantità di bismuto a scaglie. Questa operazione deve essere effettuata facendo molta attenzione a non farsi male e provvedendo ad effettuarla in un area del laboratorio di fisica attrezzata ed idonea a questi scopi. Appena il bismuto diventa liquido, sarà versato negli stampi. Bisognerà ovviamente aspettare che si raffreddi e il gioco è fatto. Tramite lo stagno ma anche il legno va benissimo, bisogna creare due spessori che saranno posti ai lati dei due menischi in modo che la struttura si presenti come indica la figura 19.14.



Fig. 19.14 - Magnete al NdFeBo in levitazione fra due blocchi di bismuto -

Poiché il magnetino a neodimio-ferro-boro, deve avere una forma cilindrica con uno spessore di circa 4 o massimo 6 millimetri, i due spessori in stagno saranno dimensionati in modo da creare uno spazio interno nella trappola magnetica di poco superiore allo spessore del magnete al neodimio.

Fatto tutto questo, avete praticamente realizzato l'essenziale. Mettete il magnetino al neodimio all'interno della trappola e prendete una comunissima calamita che avete, per esempio, smontato da un vecchio altoparlante. Ponete la vostra calamita superiormente al sandwich di bismuto e tenetela ad una certa altezza in modo, che il magnetino al neodimio cominci a sollevarsi. Vi ricordo, che per far sollevare il magnetino piccolo al neodimio, dovete porre la calamita superiore con la giusta polarità in modo da attrarre verso l'alto il magnetino. Vedi a questo punto la fig. 20.14.

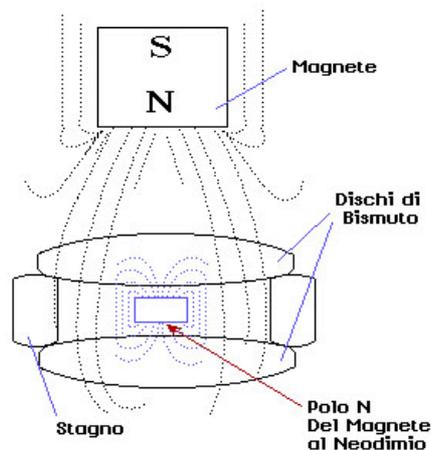


Fig. 20.14 - Trappola magnetica -

Se avete effettuato il lavoro correttamente vi accorgete che tenendo ben salda ad una precisa altezza la vostra calamita superiore, il piccolo magnete al neodimio-ferro-boro, posto all'interno del sandwich di bismuto, si collocherà in una posizione centrale, sospeso nell'aria perfettamente in levitazione come se non avesse peso. La figura 19.14 mostra quello che dovrebbe succedere. In pratica, il magnete superiore costituisce la forza di attrazione che innesca la levitazione, mentre la barriera di bismuto funziona da trappola. Grazie, infatti, alle sue proprietà diamagnetiche, nello spazio del sandwich di bismuto, la forza della calamita superiore sarà attenuata e lo stesso campo magnetico generato dal magnetino al neodimio sarà circondato da un campo magnetico opposto, che lo terrà circoscritto all'interno del sandwich che in queste condizioni funzionerà da trappola magnetica facendo in modo che il magnetino al neodimio galleggerà all'interno di essa. Vi accorgete che la posizione della calamita superiore è alquanto critica, quindi non vi conviene tenerla con le mani. Potete a tal proposito realizzare un piedistallo in legno che la sorregga, dotato di altezza regolabile grazie alla presenza di una vite senza fine che consenta di adattare di volta in volta la distanza della calamita dai menischi in modo estremamente preciso. L'esperimento che vi ho descritto è stato realizzato con successo anche dal mio amico Domenico Cirillo più volte nominato in questo testo. Potete realizzare qualche variante, sostituendo per esempio al bismuto la grafite, ma i risultati più efficaci li ho potuti unicamente ottenere con il bismuto.

NOTE 1: Attualmente tramite internet è possibile reperire da società specializzate presenti nel territorio americano a poche decine di euro, kit completi che comprendono magneti al neodimio ferro boro di forma cubica e un materiale artificiale molto interessante chiamato **grafite pirolitica**. Questo materiale è in pratica grafite ottenuta per crescita monocristallina ed è dotata di forti caratteristiche diamagnetiche. Le caratteristiche **diamagnetiche** della grafite pirolitica, tra l'altro molto più elevate di svariati ordini di grandezza rispetto al bismuto, sono dovute alla peculiarità della struttura cristallina di questo materiale. Il lettore può infatti, rileggere il modulo 12 " I Cristalli" ed osservare attentamente la figura 15.12 che mostra la struttura della grafite. La grafite pirolitica si differenzia dalla grafite comune per il fatto di possedere macrocristalli perfettamente regolari simili alla struttura mostrata dalla figura 15.12 estesi a tutto il materiale. Gli elettroni dei legami tipo pigreco possono muoversi facilmente nella struttura polinucleare (tipo benzene) che possiede la grafite lungo il piano orizzontale. Sono proprio i movimenti di questi elettroni nel piano orizzontale del cristallo che consentono alla grafite pirolitica di avere un elevato diamagnetismo.

Utilizzando piastrine di grafite pirolitica spesse poche frazioni di millimetro è possibile farle levitare sulla superficie dei magneti al neodimio ferro boro con estrema facilità. Per ottenere la cosiddetta "trappola magnetica" necessaria a tenere in equilibrio la piastrina di grafite sopra i magneti è necessario disporre i magneti cubici a scacchiera. In pratica ogni faccia "**Nord**" deve essere avvicinata da una faccia "**Sud**" in questo modo il sistema è stabile ed è possibile ottenere il fenomeno di galleggiamento aereo della piastrina. Il mio esperimento effettuato senza troppa difficoltà mi ha permesso di far levitare una piastrina (1,4 mm X 1,8) di grafite pirolitica spessa 0,7 mm dal peso di 0,3 grammi sopra un gruppo di 9 magneti cubici. La foto 20.14.1 mostra la levitazione pirolitica ottenuta a circa 2 millimetri dalla superficie..

Attenzione per evitare di ottenere un facile insuccesso il bravo insegnante deve saper disporre i magneti nella maniera opportuna. I magneti cubici possono indurre facilmente in errore poiché non è semplice determinare la polarità della faccia "Nord" e quella "Sud". Pertanto vi consiglio di utilizzare una bussola e di verificare attentamente la polarità della faccia "Nord" per esempio, segnandola con un pennarello. Subito dopo, facendo molta attenzione, avvicinare i cubetti in modo da ottenere lo schema a scacchiera.

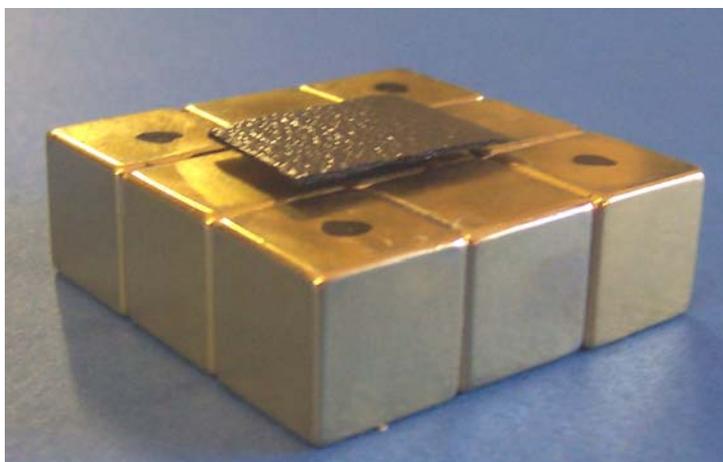


Fig. 20.14.1 - Grafite pirolitica in levitazione -

NOTE 2: Molto interessante da un punto di vista didattico, risulta il dispositivo illustrato dalla figura 30.14 che facilmente può essere realizzato utilizzando un magnete cilindrico al neodimio-ferro-boro, una semplice vite d'acciaio o di ferro a testa piatta (in ogni caso deve essere ferromagnetica cioè sensibile al campo prodotto dalla calamita) e una semplice pila stilo da 1,5 V. Questo dispositivo descrittomi da un mio carissimo amico di nome Riccardo, mostra molto chiaramente l'effetto elettrodinamico che si produce mediante l'interazione di una corrente e di un campo magnetico. La forza che si produce (nel nostro caso è la risultante di un momento) determina la rotazione del magnete che si

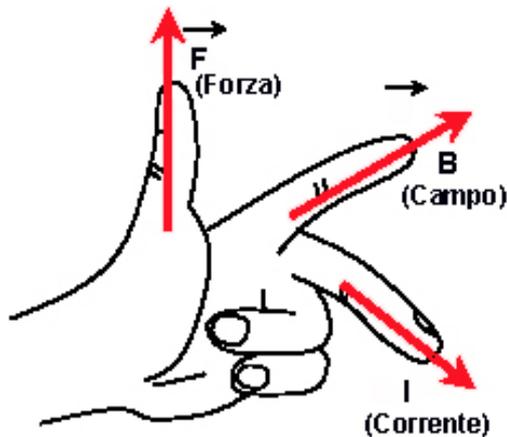


Fig. 29.14

può osservare con estrema facilità se la pila è perfettamente carica.

La composizione degli effetti vettoriali prodotti dal campo e dalla corrente, che determina la direzione della forza è illustrata dalla figura 29.14 ed è conosciuta come regola delle dita della mano sinistra o regola di Fleming. Potremo considerare questo effetto fisico esattamente come il complementare del fenomeno illustrato invece dal laboratorio N.6 "Tethered e legge di Lenz".

Infatti, mentre nel laboratorio N.6 viene generata una corrente indotta in un conduttore che si muove in un campo magnetico, in questo semplice esperimento possiamo osservare il caso opposto e cioè che una corrente, fatta circolare in un conduttore con la contemporanea presenza di un campo magnetico, produrrà un movimento a carico di quest'ultimo (nel nostro caso specifico la corrente circolerà all'interno dello stesso magnete). Questo principio è quello che sta alla base del funzionamento dei motori elettrici. Per ottenere un sicuro funzionamento da parte dell'apparato rappresentato dalla figura n. 30.14 è necessario assicurarsi che la pila possa essere del tipo alcalina

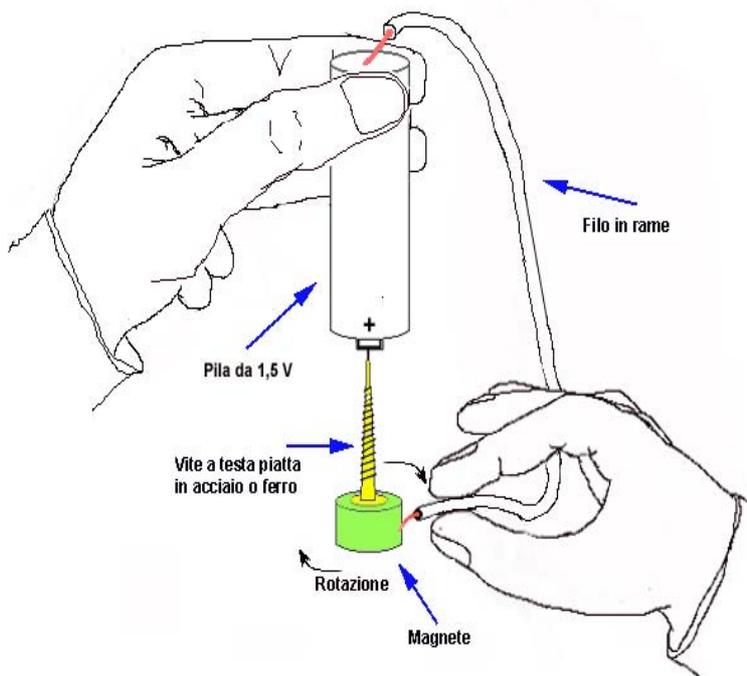


Fig. 30.14 - Semplice motore con un solo magnete -

oppure possa trattarsi di una batteria ricaricabile tipo Ni-MH. Infatti, queste batterie sono dotate di un elettrodo centrale positivo in nichel che risulta essere fondamentale affinché la vite di acciaio, grazie alla magnetizzazione indotta dal magnete sottostante, possa essere attratta da questo elettrodo e quindi riuscire a restare sospesa come illustrato dalla figura.

NOTE 3: Voglio ricordare al lettore che un esempio molto interessante che mostra come i fenomeni elettrici sono strettamente legati ai fenomeni magnetici è dato dall'osservazione di una bussola che oscilla e ruota vivacemente appena si presentano scariche elettriche atmosferiche molto intense (fulmini). Ovviamente durante il temporale debbono verificarsi le condizioni più opportune per poter assistere al fenomeno. Quest'ultimo viene osservato molto frequentemente in montagna e soprattutto se ci si trova un ragionevole raggio di azione dal punto in cui il fulmine impatta al suolo.

APPENDICE:

Susceptività magnetica di alcune
sostanze a temperatura ambiente

Materiale	Densità kg/dm ³	Susceptività 10 ⁵ χ
Alluminio	2.7	2.2
Argento	10.5	-2.6
Arsenico	5.72	-2.2
Azoto(gas a 1 atm)	0.0012	-0.0005
Cromo	7.2	32
Diamante	3.52	-2.2
Manganese	7.2	90
Mercurio	13.5	-3.2
Oro	19.3	-0.36
Osmio	22.5	1.4
Ossigeno (gas a 1 atm)	0.0014	0.21
Palladio	12.0	80
Rame	8.9	-0.96
Zolfo	2.0	-1.2

Susceptività atomica o molare in unità cgs e moltiplicati per 10⁶			
Li	+14.2	Sc	+315
Be	-9.0	Ti	+153
B	-6.7	V	+255
C	-6	Cr	+1.8
N ₂	-12	Mn	+530
O ₂	+3450	Fe/Co/Ni	Ferromagnetici
F ₂	-	Cu	-5.5
Ne	-6.74	Zn	-11

Valori di permeabilità magnetica (μ_r) di alcuni materiali	
$\mu_r = (1 + \chi)$	
Paraffina	0.99999942
Legno	0.9999995
Acqua	0.99999
Argento	0.99998
Bismuto	0.999986
Germanio	0.9999232
Grafite pirolitica	$\cong 0.09$
Aria	1.0000004
Ossigeno gassoso	1.0013
Platino	1.0002019
Alluminio	1.00000065
Berillio	1.00000079
MnSO ₄	1.000040
NiCl	1.000040
Cobalto	60
Nichel	50
Ghisa	90
Ferro puro	5000 a 8000
Lega ferro-silicio	10000
Leghe speciali	1000000
Acciaio	300 – 4500

Alcune Grandezze Magnetiche		
1 TESLA	10.000 gauss	
1 Oe (oersted)	79.577 A/m	1 A/cm = 1,256 Oe 1 A/inch = 0,494 Oe
1 μT	300 V/m	(adattamento)
γ Gamma	1 nT (10^{-9} T) (impropria)	10^{-5} Oe = $7.95 \cdot 10^{-4}$ A/m
(BH) max	1 J/m³ (Densità di energia magnetica)	0.1257 MGOe
(BH) max	1MGOe (Densità di energia magnetica)	7.95 kJ/m³

Proprietà magnetiche di alcuni materiali				
Materiale	μ_i	μ_m	Bs Induzione di saturazione T	Punto Curie °C
Ferro	10 000	200 000	2.15	770
Nichel	300	2500	0.61	358
Cobalto	70	250	1.79	1120
Fe - C (0,2% C)	150	5 000	2.12	770
Fe - Si (4% Si) Laminato a caldo	500	7 000	1.97	690
Fe - Si (3% Si) cristalli orientati	1500	30 000	2.00	740
Fe - Ni (50% Ni) cristalli orientati (permenorm 5000Z)	800	50 000	1.55	450
Fe - Ni (45% Ni) (Permalloy 45)	2 500	25 000	1.60	400
Fe - Ni (68% Ni) Raffredd. Magnetico (Permalloy 68)	1 200	250 000	1.30	600
Fe - Ni (78,5% Ni) (Permalloy 78)	8 000	100 000	1.08	600
Fe - Ni (50% Ni) (isoperm 50)	90	100	1.60	500
Fe - Ni - Mo (79% Ni, 5% Mo) (supermalloy)	100 000	1000 000	0.79	400
Fe-Ni-Cu-Cr (77% Ni, 5% Cu, 2% Cr) (Mumetal)	20 000	100 000	0.65	–
Fe - Co (50% Co) (Permendur)	800	5 000	2.45	980
Fe - Ni - Co (45% Ni, 25% Co) (perminvar 45-25)	400	2000	1.55	715
Ferrite Mn-Zn (Ferroxcube)	1000	1500	0.35	160
Polvere di permalloy (81% Ni, 2% Mo)	125	130	0.70	480
Polvere di ferro Carbonile (60%)	20	–	1.50	770

ALLEGATO:

L'elettrone e il suo campo magnetico

Alla base dei fenomeni magnetici, prodotti da alcune sostanze naturali, oppure realizzati artificialmente dall'uomo, c'è il moto degli elettroni nella materia e il fatto che gli elettroni stessi sono portatori di un proprio campo magnetico. Per comprendere le problematiche, non semplici, che esistono intorno a questo fenomeno è necessario uno studio approfondito sulle proprietà magnetiche dell'elettrone. Un siffatto lavoro non potrà naturalmente essere compiuto mediante questo testo, tuttavia le poche cose che diremo tra breve, potranno costituire un bagaglio di conoscenze preziose per i docenti che vogliono comprendere le origini di questo misterioso fenomeno. Cominciamo a stabilire che se consideriamo possibile che l'elettrone ruota intorno all'atomo, quest'ultimo può essere studiato mediante un modello, ormai superato ma efficace per i nostri scopi, che associa ad esso un momento magnetico orbitale. Secondo tale modello, l'elettrone percorrendo la sua orbita, si comporta come una spira atomica di dimensioni microscopiche. Prendiamo come esempio un atomo di idrogeno che, come sappiamo, possiede un solo elettrone orbitante a circa **0.053 nm** (r_0). Dall'allegato al modulo "Materia (concetti base)", nel paragrafo "Meccanica atomica" si è visto che la velocità dell'elettrone sull'orbita di riferimento, di cui abbiamo appena dato il valore del raggio, ammonta a circa $2,0754 \cdot 10^6$ m/s. Possiamo quindi, facilmente calcolare il periodo orbitale T_0 che risulta uguale a circa $1,604 \cdot 10^{-16}$ secondi. Un elettrone orbitante con periodo T_0 , comporta che, attraverso ogni punto dell'orbita, passi una carica (-e) $(1/T_0)$ volte al secondo; e ciò equivale ad una corrente atomica I_s pari a:

$$I_s = \frac{e}{T_0} \cong 1 \cdot mA \quad (1.014)$$

Il momento magnetico di un atomo di idrogeno, associato a questa spira atomica, vale dunque:

$$\mu_m = I_s \cdot S = I_s \cdot \pi \cdot r_0^2 = 8.814 \cdot 10^{-24} \cdot A \cdot m^2 \quad (2.014)$$

Si tratta ovviamente di un calcolo approssimato, precise misure sperimentali, ci consentono di attribuire al momento magnetico orbitale dell'elettrone dell'atomo di idrogeno, il valore di:

$$9.2847781 \cdot 10^{-24} \cdot A \cdot m^2 = j / T \quad (3.014)$$

Che può essere espresso dallo stesso valore numerico anche come joule/tesla.

I fisici quantistici hanno previsto matematicamente il valore che doveva essere attribuito al momento magnetico dell'elettrone tramite una formula, estratta dalla teoria quantistica. Questo valore, chiamato magnetone di Bohr, risulta pari a:

$$m_b = \frac{e \cdot h}{4 \cdot \pi \cdot m_e} \quad (4.014)$$

Dove "h" è la famosa costante di Planck (vedi appendice B, di fine testo), "e" il valore della carica elettrica espressa in coulomb ed "m_e" la massa a riposo dell'elettrone. Se facciamo tutti i calcoli previsti per l'equazione n. 4.014 otteniamo il valore seguente:

$$9.2740154 \cdot 10^{-24} = j / T \quad (5.014)$$

La discrepanza tra il valore numerico ricavato sperimentalmente e il valore del magnetone di Bohr appena calcolato risulta essere:

$$g_l = 1.001159652193 \quad (6.014)$$

Questa discrepanza è chiamata anche anomalia elettronica o anomalia magnetica dell'elettrone. Essa è la misura di quanto il momento magnetico sia maggiore rispetto a quello previsto dalla teoria quantistica. Questo numero è chiamato a volte "numero di Dirac" e non viene quasi mai adoperato in pratica. Al suo posto i fisici considerano il valore:

$$g_s = 2.0023193044 \quad (7.014)$$

Che si chiama "**Fattore Giromagnetico dell'elettrone**" oppure anche Fattore "**g_s**" o anche "**Fattore di Landè**", che risulta essere esattamente il doppio della discrepanza precedentemente mostrata.

Vedremo tra breve, la ragione della presenza di questo numero.

Il termine numerico riportato dalla 6.014 è anche ricavabile dalla formula seguente che calcola il momento magnetico di un generico atomo (μ_m):

$$\mu_m = -g_L \cdot \frac{e \cdot L}{2 \cdot m_e} \quad (8.014)$$

Dove "e" rappresenta la carica elettrica dell'elettrone espressa in coulomb, "L" è il momento angolare dell'elettrone sull'orbita, "m_e" rappresenta la massa

dell'elettrone ($9,11 \cdot 10^{-31}$ kg) ed il termine "g_L" risulta essere il fattore numerico mostrato dalla 6.014. Questo fattore, risulta essere quindi il rapporto fra il momento magnetico e il momento angolare:

$$g = \frac{m}{L} \tag{9.014}$$

La formula n. 9.014 ha, in effetti, validità generale per qualsiasi sistema fisico in cui vogliamo determinare un fattore giromagnetico.

L'importanza del magnetone di Bohr consiste principalmente nel fatto, che quando trattiamo fenomeni fisici dal punto di vista quantistico, il momento magnetico orbitale di un elettrone può assumere solo valori che siano multipli della quantità espressa dalla formula n. 4.014. Il magnetone di Bohr rappresenta quindi, il più piccolo momento magnetico che possiamo trovare in natura. Il valore del magnetone di Bohr può essere anche espresso come:

$$5.7883826 \cdot 10^{-5} \cdot eV / T$$

Ma i problemi, inerenti al comportamento magnetico dell'elettrone, non sono finiti. Nel 1921 fu effettuato un famoso esperimento dai fisici Stern e Gerlach. L'esperimento consisteva nel far passare un fascio di atomi di argento, dotati di momento angolare nullo, in un campo magnetico disomogeneo. Lo scopo del campo magnetico disomogeneo era di produrre una forza deviatrice su qualunque momento magnetico presente nel fascio. Se fosse stato adoperato un campo magnetico omogeneo, un eventuale atomo dotato di momento magnetico, sarebbe stato soggetto soltanto ad una coppia torcente e non ad una forza flettente. Vedi figura 21.14

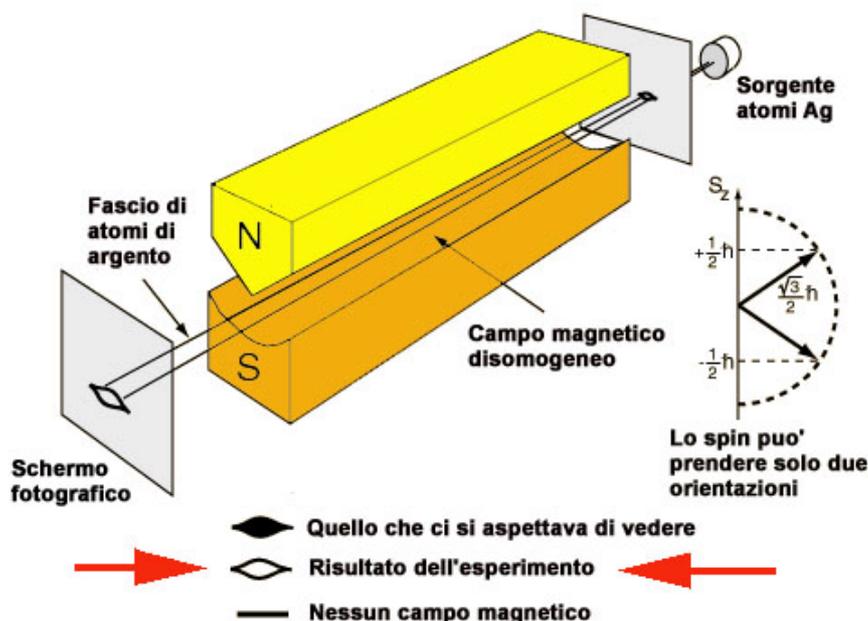


Fig. 21.14 - Schema dell'esperimento di Stern e Gerlach -

Da questo esperimento risultò che gli elettroni erano dotati anche di un momento magnetico intrinseco. Il fascio di atomi di argento, infatti, durante l'esperimento, si divise in due fasci uguali e distinti, il che autorizzò i fisici S.A. Gouldsmith e G.E. Uhlenbeck, nel 1925 ad interpretare, questo risultato come la prova che gli elettroni erano dotati di un momento magnetico interno che assumeva soltanto due possibili orientazioni nello spazio. Tale caratteristica fu denominata spin.

I fisici teorici forniscono, per il concetto di spin dell'elettrone, una interpretazione matematica molto complessa. Da un punto di vista elementare, possiamo pensare allo spin come un movimento di rivoluzione dell'elettrone su se stesso un po' come una piccola trottola. Il valore numerico di questa grandezza, ricavabile attraverso una relazione relativamente semplice, ha il significato di una energia di momento angolare. Oggi sappiamo che lo spin dell'elettrone vale $\pm 0.5273 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$. I fisici quantistici fanno corrispondere questa quantità alla relazione numerica seguente:

$$S = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2 \cdot \pi} \quad (10.014)$$

Dove "h" è la costante di Planck. La formula ci dice che l'elettrone può avere solo due orientazioni spaziali dello spin. Questo modo di esprimerci, pur relegato ad una interpretazione classica dell'elettrone trottola, ci permette di interpretare il suo momento magnetico come se l'elettrone rappresentasse appunto una piccola calamita.

Anche in questo caso possiamo adoperare la formula n. 8.014 per determinare il momento magnetico dell'elettrone. In questo caso però, la formula ci permette di determinare il momento magnetico intrinseco, infatti, se sostituiamo il valore del coefficiente angolare "L", inserendo al suo posto il momento di spin "S", abbiamo:

$$\mu_m = -g_s \cdot \frac{e \cdot S}{2 \cdot m_e}$$

(11.014)

La formula è simile alla precedente n. 8.014, ma con l'aggiunta del termine "S", lo spin, che è appunto il momento magnetico intrinseco dell'elettrone, e il termine "g_s", che in questo caso è proprio il valore espresso dalla 7.014, cioè il fattore giromagnetico dell'elettrone. È evidente come il termine "g_s" sia perfettamente il doppio del termine "g_L", infatti, in questo caso, il termine "S" potrà essere pari solo al valore di +/-1/2.

Il fattore giromagnetico è un parametro molto importante, che vale nell'atomo di idrogeno isolato (per quanto riguarda il suo unico elettrone) 2,002 circa. Poiché questo parametro varia a seconda della composizione e della struttura della molecola, è possibile utilizzare queste differenze di "g_s" per ottenere una tecnica di indagine analitica di tipo fisico, chiamata "**risonanza di spin elettronico**" (ESR). Per fare ciò è sufficiente porre una sostanza, per esempio un corpo umano, all'interno di un campo magnetico di induzione, pari a

1 T e, successivamente si potranno eccitare le transizioni di livello. Si dimostra che, per quanto riguarda gli elettroni spaiati, presenti certamente in un insieme di strutture e di sostanze così diversificate come i tessuti di un corpo umano, i livelli di quantizzazione di energia per elettrone raggiungono valori di circa 10^{-4} eV. Le transizioni di livello possono essere indotte da un campo di microonde, che spazia da 5 GHz fino a 60 GHz, in modo che le variazioni di assorbimento di energia possono essere rilevate e, tramite un computer è possibile avere anche un'immagine tridimensionale della struttura dei tessuti analizzati.

Oltre all'elettrone, anche le particelle del nucleo dell'atomo possiedono un momento magnetico intrinseco. Esprimendo questo momento magnetico come magnetone di Bohr " m_b " possiamo scrivere la seguente tabella:

Particella	Momento magnetico
Elettrone	-1.001159652193 m_b
Protone	2.7928 m_{bP}
Neutrone	-1.9128 m_{bN}
Deuterone	0.8574 m_{bD}

Tab. 1.14 - Momento magnetico di alcune particelle note -

Vi faccio notare che, i termini di momento magnetico espressi nella tabella 1.14, sono calcolati tenendo presente le variazioni del valore del magnetone di Bohr, calcolati a seconda del valore della massa delle particelle. Il magnetone di Bohr del protone, per esempio " m_{bP} ", è stato calcolato utilizzando la formula n. 4.014 in cui però il termine di massa è stato sostituito con la massa della particella o dell'eventuale sistema di particelle. Spesso, i fisici, per quanto riguarda i termini " m_{bP} " e " m_{bN} ", ci si riferiscono definendoli magnetone nucleare.

Il momento magnetico totale di ogni atomo si ottiene quindi da una somma vettoriale dei momenti orbitali e dei momenti di spin di tutte queste particelle. Il magnetismo macroscopico, misurato sulla materia, dipende quindi fortemente da tutti questi effetti ora analizzati. Normalmente il momento magnetico nucleare viene trascurato, ma quello prodotto dagli elettroni, sia per rivoluzione intorno al nucleo, che per produzione propria di spin, risulta essere la causa degli effetti magnetici che si trovano in natura.

Magnetismo nella materia

Poiché ogni atomo è circondato da elettroni e la materia è costituita da moltissimi atomi, ci aspetteremo di trovare il magnetismo come un fenomeno estremamente diffuso su ogni oggetto che ci circonda. Ma visto che la realtà non si presenta così "magnetica", è evidente che questo modo di ragionare è completamente errato. Infatti, nell'analisi di questa qualità fisica, bisogna tener presente che gli elettroni ubbidiscono ad un principio fondamentale chiamato principio di esclusione di Pauli. Tramite questo principio due elettroni, che occupano una stessa orbita, non possono avere lo stesso numero quantico di spin. Pertanto la presenza di un fenomeno magnetico evidente nella materia che ci circonda risulta estremamente raro. Se ogni corpo materiale fosse portato a possedere una magnetizzazione più o meno alta, la materia che ci circonda, non avrebbe certamente la struttura attualmente conosciuta.

In realtà, questa scarsa diffusione di corpi macroscopicamente magnetizzati è dovuta al fatto che gli elettroni, orbitanti attorno a un atomo, si dispongono sempre progressivamente in modo tale che uno si presenta con spin pari a $+1/2$ e l'altro con spin pari a $-1/2$. In questo modo, gli effetti magnetici risultano perfettamente annullati. Gli atomi, che hanno un elettrone spaiato sull'ultima orbita tendono invece a combinarsi con altri atomi e quindi ancora una volta l'equilibrio è raggiunto. Anzi, è proprio questa attitudine verso il raggiungimento di un equilibrio che determina il modo di reagire della materia stessa e la formazione dei mondi così come li conosciamo oggi. Tuttavia anche per questa regola generale si possono presentare delle eccezioni. Alcune strutture molecolari. Infatti, possono presentarsi in natura con qualche squilibrio a livello delle orbite elettroniche. In questo caso, il materiale può manifestare una certa sensibilità al campo magnetico, oppure essere in un certo modo dotato esso stesso di un certo campo magnetico. L'ossigeno, per esempio, che ha due elettroni spaiati sull'orbita esterna, anche se forma legami con altri atomi della stessa specie, risulta influenzato dai campi magnetici (l'ossigeno è un elemento paramagnetico). Alcuni metalli di transizione, come il ferro, il nichel, il cobalto, il gadolinite e il disprosio presentano, negli orbitali esterni tipo "d", degli elettroni spaiati: tale caratteristica rende questi elementi nell'annovero dei materiali ferromagnetici. La magnetite, per esempio, un minerale naturale che contiene ossidi di ferro, manifesta un proprio campo magnetico.

Per misurare l'attitudine della materia a reagire ad un campo magnetico dobbiamo considerare un parametro chiamato "**suscettività magnetica della materia**", " χ ", il quale indica il grado di sensibilità o di risposta dei vari elementi chimici o dei vari materiali e sostanze che conosciamo, quando essi sono sottoposti ad un campo di forze magnetiche. Normalmente la suscettività magnetica indica il rapporto fra un termine generale di magnetizzazione "M" e il valore del vettore di induzione magnetica "B". Il motivo per cui la materia reagisce al campo magnetico è insito nella sua stessa intima struttura. In alcuni casi ad esempio, per alcuni aggregati molecolari, possiamo verificare che alcuni atomi possiedono dei momenti magnetici non nulli. Con tali premesse è ovvio che, ponendo il materiale all'interno di un campo magnetico, questi subisce una certa influenza, che si traduce in forze che modificano l'assetto di alcune orbite elettroniche col risultato finale che, il più delle volte, nel materiale si desta una vera e propria forza che genera uno spostamento fisico nello spazio. Tale spostamento tuttavia, è macroscopicamente osservabile solo in alcuni semplici casi, uno di questi lo si può sperimentare osservando le proprietà magnetiche delle leghe ferrose o quelle possedute da materiali che contengono elementi metallici come nichel o cobalto. Oppure, come già visto nei laboratori di questo modulo, osservando il movimento dell'ago di una bussola, come si distribuisce della limatura di ferro quando agisce su di essa un campo magnetico, ed altri casi in cui si verificano azioni elettrodinamiche tra elettroni in movimento e campo magnetico. In molti altri casi, gli effetti magnetici sono molto meno evidenti. È stato pertanto importante dividere i materiali a seconda della loro suscettività magnetica dividendoli in tre categorie: Paramagnetici, Ferromagnetici, e Diamagnetici.

Paramagnetismo

Quasi tutti i materiali sono paramagnetici. Il paramagnetismo si verifica quando la sensibilità " χ " del materiale sottoposto al campo magnetico è tale da generare un allineamento delle caratteristiche magnetiche del materiale con quelle del campo esterno a cui è sottoposto. Per esempio, un pezzetto di carta non viene attratto da una calamita. Tuttavia, se potessimo fare una misura con un elevato grado di precisione, adoperando tra l'altro una calamita molto potente, ci accorgeremo, anche se in modo molto lieve, che il pezzo di carta viene in qualche modo influenzato dal campo magnetico indotto. Questo fenomeno è dovuto al fatto che, all'interno della struttura molecolare di queste sostanze, ci sono degli atomi che hanno un momento magnetico prodotto da un elettrone che risulta spaiato per quanto riguarda il suo momento magnetico intrinseco. Tale disaccoppiamento trasforma la molecola in una specie di calamita infinitesima o, per dirla in maniera più rigorosa, in un dipolo magnetico. Questi dipoli magnetici infinitesimi, chiamati anche "**domini**", sono orientati casualmente grazie all'agitazione termica o all'assetto molecolare della sostanza. Un campo magnetico esterno non ha alcun influsso sul momento magnetico di ciascuno di questi dipoli, ma solo sulla loro reciproca orientazione. Quindi, la sua presenza non fa altro che orientare questi dipoli infinitesimi, agendo sul momento risultante della sostanza. Un materiale paramagnetico è quindi un materiale che possiede alcuni domini magnetici che, in una certa misura, reagiscono, orientandosi, al campo magnetico induttore. A tal proposito voglio ricordare alcuni sali che possiedono evidenti proprietà paramagnetiche. Fra questi il cloruro di rame (CuCl_2) e il solfato di nichel (NiSO_4). Quest'ultima sostanza è in grado di mostrare in modo evidente la sua tendenza ad essere attratta da un potente magnete. Volendolo verificare, dovete porre la polvere azzurra di solfato di nichel sopra un portacampione di un microscopio per mineralogia e osservare come i cristalli più minuti vengono influenzati da un potente magnete al neodimio-ferro-boro posto nelle immediate vicinanze.

Ferromagnetismo

I materiali ferromagnetici sono un particolare categoria dei materiali paramagnetici. La differenza sostanziale consiste nel fatto che, mentre, nei materiali paramagnetici, il campo magnetico esterno orienta solo una parte dei dipoli infinitesimali, nei materiali ferromagnetici quasi tutti i dipoli disponibili si orientano nella direzione del campo di forza magnetico induttore. Questi materiali agiscono quindi, rinforzando notevolmente il campo magnetico induttore fino ad un livello chiamato di saturazione. In una certa misura essi presentano la caratteristica di conservare il momento magnetico anche quando il campo magnetizzante è stato rimosso. Fra i materiali ferromagnetici conosciamo il ferro e alcune sue leghe, il cobalto, il nichel, il disprosio e il gadolino. Molto importanti sono anche le leghe ottenute con elementi di transizione e elementi delle terre rare con le quali possono essere realizzati magneti permanenti (calamite) di ottime caratteristiche. Fra i materiali citati per la preparazione di magneti permanenti ricordiamo le leghe Cobalto-Samarium e le leghe al Neodimio-Ferro-Boro. La suscettività magnetica dei materiali ferromagnetici è, in genere, molto elevata.

Gli elettrotecnici utilizzano spesso, nei loro calcoli, un altro parametro, chiamato permeabilità magnetica “ μ_r ” che risulta legato alla suscettività magnetica attraverso la seguente relazione analitica:

$$\mu_r = (1 + \chi) \quad (12.014)$$

Ogni materiale magnetico è caratterizzato da un suo determinato valore di permeabilità magnetica relativa “ μ_r ”, anche se quest’ultimo, può subire variazioni che dipendono sia dal livello di induzione magnetica, operato sul materiale, che della temperatura. Nell’appendice di modulo sono presenti alcune tabelle che mostrano i valori di “ μ_r ” dei materiali magnetici più conosciuti.

Tale concetto di permeabilità magnetica è estremamente importante. Il valore di riferimento è quello assunto dal vuoto o dall’aria, è definito dal simbolo “ μ_0 ” ed è pari a:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad (13.014)$$

La permeabilità magnetica relativa “ μ_r ” dei materiali ferromagnetici, diminuisce con la temperatura finché, oltre un determinato valore, chiamato “temperatura di Curie” il materiale non presenta più suscettività magnetica. La temperatura di Curie del ferro è di 770 °C, mentre per il gadolino è addirittura di 20 °C.

Diamagnetismo

Il diamagnetismo è una proprietà presente in tutte le sostanze che si verifica quando, la presenza del campo magnetico induttore, altera l’appaiamento dei momenti orbitali degli atomi presenti nel materiale, costringendolo ad assumere un campo magnetico interno di direzione opposta al campo magnetico induttore. In questi casi, il piano dell’orbita atomica tende a ruotare (Precessione di Larmor) a causa del campo magnetico esterno. Il diamagnetismo quindi, tende ad opporsi al campo magnetico induttore, come una legge di Lenz che agisce a livello atomico riducendo l’intensità del campo induttore. Normalmente, essendo l’intensità del fenomeno diamagnetico molto lieve, essa viene resa trascurabile dalla presenza del paramagnetismo o del ferromagnetismo. Nel caso del diamagnetismo gli atomi con le loro spire atomiche, reagiscono al campo magnetico creando a loro volta un dipolo magnetico di segno opposto a quello induttore. La formula seguente, mostra la dipendenza della suscettività magnetica di un materiale diamagnetico:

$$\chi_d = - \frac{\mu_0 \cdot n \cdot e^2 \cdot r^2}{2 \cdot m_e}$$

(14.014)

dove " μ_0 " è la permeabilità del vuoto, "n" il numero di atomi diamagnetici", "e" la carica elettrica dell'elettrone, "r" il raggio dell'orbita elettronica e " m_e " è la massa dell'elettrone.

Fra le sostanze diamagnetiche più conosciute abbiamo il bismuto metallico, la grafite, l'oro, l'acqua, il benzene. Quest'ultimo, infatti, possiede una struttura ciclica che favorisce l'instaurarsi di correnti indotte.

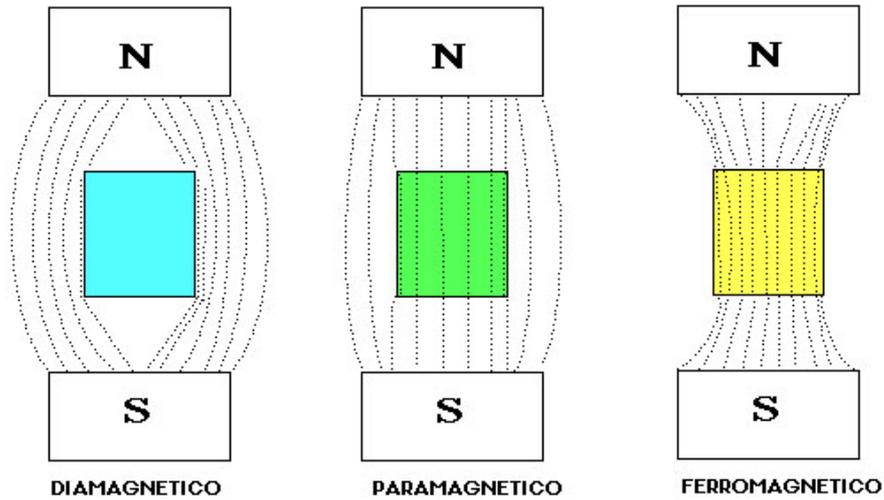


Fig. 22.14 - Comportamento dei vari materiali al campo magnetico -

Antiferromagnetismo e ferrimagnetismo

Oltre quelle appena viste, che sono le più importanti, esistono altre due categorie minori di materiali magnetici. Queste sono rappresentative di aspetti particolari di quei materiali posti fra le categorie dei paramagnetici e dei ferromagnetici. Si tratta di materiali che possiedono due diversi momenti magnetici atomici sistemati in domini magnetici disposti alternativamente. La figura n. 23.14 mostra come potrebbero essere posizionati tali domini nei materiali antiferromagnetici e ferrimagnetici.

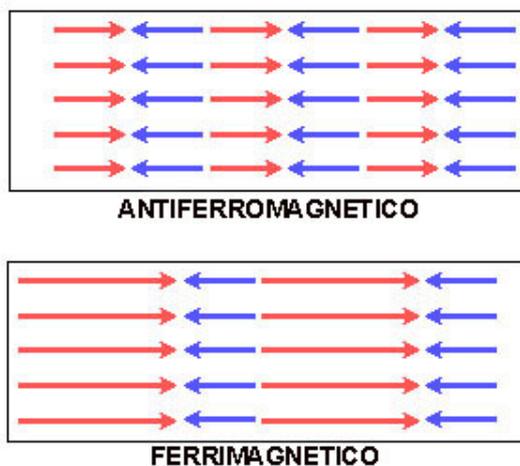


Fig. 23.14 - Disposizione dei domini nei materiali -

Nel primo caso, cioè nei materiali antiferrimagnetici, i domini magnetici atomici, in assenza di campo magnetico esterno, sono di uguale intensità e sono disposti in modo alternativo. In questo caso il campo magnetico esterno è nullo. Nel secondo caso, cioè nei materiali ferrimagnetici, i domini non hanno la stessa ampiezza e quindi il materiale presenta un campo magnetico esterno anche senza la presenza del campo induttore.

Il grafico n. 24.14 mostra invece l'andamento della suscettività magnetica nei materiali magnetici al variare della temperatura. In questo grafico è interessante il caso del materiale antiferromagnetico, che possiede un andamento a cuspide. La suscettività magnetica di questo materiale, infatti, inizialmente aumenta, poi successivamente, oltre una determinata temperatura comincia improvvisamente a diminuire. La temperatura nella quale il materiale possiede la massima suscettività magnetica è chiamata temperatura di Néel.

Fra i materiali antiferromagnetici ricordiamo l'acetato di rame monoidrato mentre, fra i ferrimagnetici, c'è la magnetite naturale.

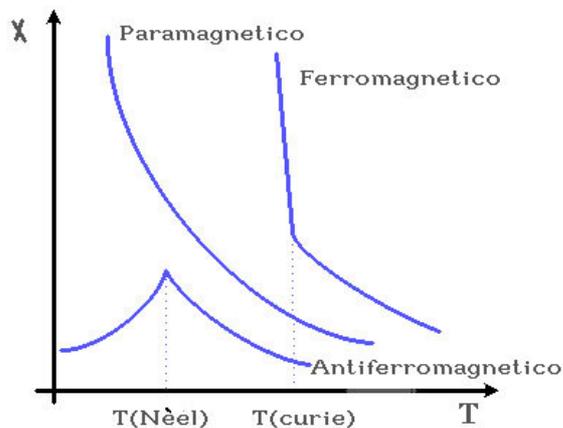


Fig. 24.14 - Suscettività magnetica che varia con la temperatura di alcuni materiali magnetici -

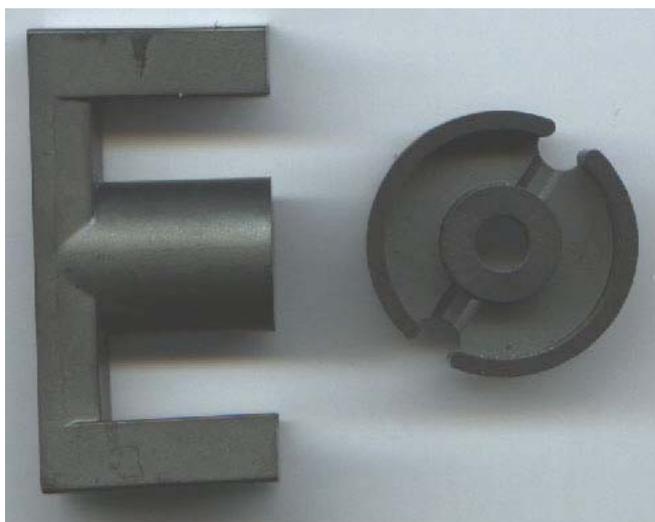


Fig. 25.14 - Alcuni tipi di ferrite adoperati in elettronica.
- Le ferriti sono un esempio di materiali ferrimagnetici. -

Elettromagnetismo

Quando facciamo circolare corrente in un filo di rame, intorno a quest'ultimo, si genera un campo magnetico. Gli elettroni, fluendo all'interno del materiale conduttore, orientano il proprio spin in modo coerente in una determinata direzione (quest'ultima affermazione è dell'autore vedi **nota 4**). Il campo magnetico, che misuriamo all'esterno del filo, dipende dal valore della corrente elettrica che circola nel conduttore e dalla distanza in cui si effettua la misura.

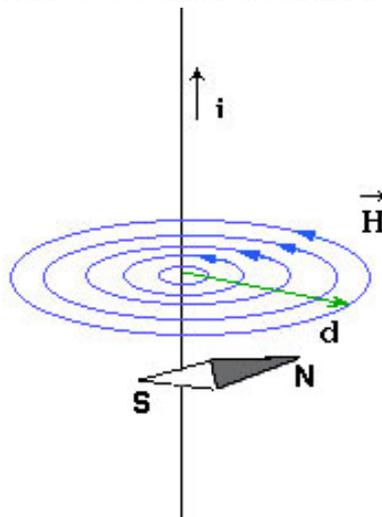


Fig. 26.14 - Campo magnetico attorno ad un filo percorso da corrente elettrica -

La figura n. 26.14 mostra un filo rettilineo in cui circola una certa corrente "I". La figura presenta la direzione del verso convenzionale del campo e la posizione che assumerebbe un ago magnetico di una bussola posto nelle sue immediate vicinanze. La formula che permette di determinare l'intensità del campo magnetico, rilevata all'esterno del filo ad una determinata distanza "d" è la seguente:

$$|H| = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{I}{d} \quad (15.014)$$

Se la distanza è misurata in metri e la corrente "I" in ampere, il campo magnetico è espresso in ampere su metro (A/m).

Per aumentare l'intensità del campo magnetico è sufficiente avvolgere il filo su se stesso a forma di spira. In questo modo, le linee di forza del campo, grazie alla geometria ottenuta, sono più vicine le une alle altre e quindi il campo è più elevato. Per raggiungere intensità di campo magnetico ancora più elevate, bisogna aumentare ulteriormente il numero di spire di filo ravvicinate, in modo da raggiungere la configurazione chiamata "solenoido". La figura 27.14 mostra un solenoide attraversato da una corrente elettrica e il suo campo magnetico.

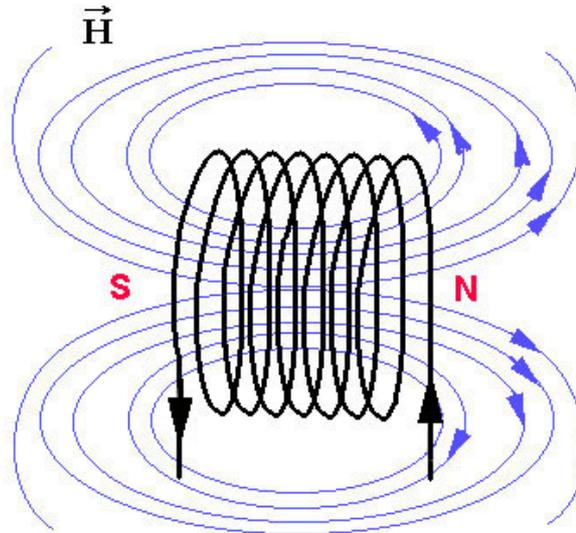


Fig. 27.14 - Campo magnetico di un solenoide -

Il lato del solenoide, dove la corrente che attraversa la sezione circolare di spira scorre in senso antiorario, è il lato nord magnetico. La direzione delle linee di forza del campo magnetico è uscente da questo lato. Viceversa, il lato opposto del solenoide, rappresenta il sud magnetico e le linee di forza sono entranti. Un solenoide quindi, costituisce una configurazione particolare che grazie alla sua geometria è in grado di produrre un campo magnetico molto intenso. Normalmente, l'attitudine di un circuito a produrre un campo magnetico è anche chiamata **induttanza** del circuito, simbolo "L". Un solenoide con molte spire, per esempio, ha una induttanza molto più elevata di un filo singolo. L'induttanza ha una propria unità di misura il cui simbolo è "H" henry. Per calcolare l'intensità del campo magnetico prodotto da un solenoide bisogna applicare la formula seguente:

$$|H| = \frac{N \cdot I}{l}$$

(16.014)

dove "N" è il numero delle spire del solenoide, "I" il valore della corrente elettrica che lo attraversa e "l" la lunghezza del solenoide. La formula è valida solo se il solenoide è fatto da un certo numero di spire ben serrate le une alle altre e con un diametro dell'avvolgimento inferiore alla misura della lunghezza dell'intero solenoide. Il valore in A/m è misurato all'interno dell'avvolgimento.

Il parametro più importante non è l'intensità di campo magnetico "H" ma un altro parametro che esprime appunto la densità delle linee di forza. Questo parametro è chiamato "induzione magnetica" simbolo "B". L'induzione magnetica, che si può misurare in Tesla (T) o anche in Weber su metro quadro (Wb/m^2), tiene conto anche del materiale o mezzo in cui il campo magnetico sta agendo. Volendo praticamente calcolare il valore dell'induzione magnetica, misurato all'interno del solenoide precedentemente esaminato, basta adoperare la formula seguente:

$$B = \mu_0 \cdot H$$

(17.014)

se invece inseriamo all'interno del solenoide una barretta di ferro o di altro materiale avente permeabilità magnetica diversa da quella dell'aria. Il valore dell'induzione magnetica misurato all'interno di quel materiale risulterebbe espresso dalla formula:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

(18.014)

Il termine “ μ_r ” è un parametro che misura la permeabilità del materiale ed è ricavabile in alcune tabelle.

Abbiamo già detto che il vettore di induzione magnetica viene misurato in tesla oppure in Wb/m^2 . Essendo quest'ultima una unità di misura di dimensioni troppo grande, il vettore di induzione magnetica può essere espresso anche in “gauss”. 1 gauss è uguale a 0.0001 tesla (vedi tabellina in appendice).

Se moltiplichiamo il vettore di induzione magnetica per la superficie interessata alle linee di forza del campo, abbiamo un termine nuovo che esprime un flusso magnetico uscente da quella superficie:

$$\phi = B \cdot S$$

(19.014)

Questo termine è molto importante per diverse applicazioni di analisi e studio, associate ai circuiti magnetici. Il flusso si misura in weber (Wb) oppure in volt per secondo (V s).

La presenza di un campo magnetico esprime anche un concetto di energia racchiusa dal campo magnetico stesso.

La densità di energia magnetica è in genere una espressione che tiene conto del prodotto di queste ultime due grandezze che abbiamo conosciuto. Il prodotto dell'induzione magnetica “B” e dell'intensità di campo magnetico “H”, esprime quindi una energia specifica per unità di volume. È facile verificare che il prodotto dei due termini si esprime come Joule su metro cubo (J/m^3). Facendo semplici passaggi matematici è possibile dimostrare che la densità di energia può essere espressa dalla seguente formula:

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \cdot B^2$$

Per calcolare solo l'energia racchiusa in un circuito di tipo magnetico, possiamo adoperare varie formule. Nel caso del solenoide, l'energia magnetica immagazzinata sottoforma di campo magnetico, è calcolabile con la formula:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2 \cdot l \cdot S}{\mu_0} \quad (20.014)$$

dove “B” è il valore dell’induzione magnetica, “l” è la lunghezza del solenoide ed “S” è la superficie della sezione.

Se invece conosciamo il valore dell’induttanza del circuito magnetico, l’energia racchiusa dal campo magnetico risulta esprimibile attraverso la formula seguente:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (21.014)$$

Dove “L” è appunto l’induttanza misurata in henry e “I” la corrente misurata in ampere. Il valore dell’energia sarà misurato in Joule.

Legge di Lenz-Faraday

Se un circuito magnetico, per esempio un solenoide, viene attraversato da un campo magnetico variabile, ai capi del solenoide si misura una differenza di potenziale o tensione, che dipende dalla intensità del campo, misurata come variazione del flusso magnetico concatenato, diviso il tempo in cui dura la variazione.

$$V = - \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (22.014)$$

Il segno meno, prima della frazione, indica che il verso del potenziale elettrico misurato è tale da opporsi alle cause che l’hanno generato. Normalmente, durante una variazione di flusso in aumento, il potenziale ai capi del solenoide assume una determinata polarità. Quest’ultima, si inverte quando la variazione è di verso opposto, cioè quando si verifica una diminuzione del flusso concatenato nel solenoide. Queste variazioni di polarità, costringono le correnti elettriche circolanti a produrre a loro volta effetti magnetici che si oppongono a quelle generate dal campo induttore in perfetta armonia a quanto stabilito dalla legge di Lenz. Facciamo un esempio: se la variazione di campo magnetico in prossimità del solenoide aumenta nella misura di un campo che genera una polarità “N”, allora ai suoi capi si genera un potenziale con verso tale da far circolare una corrente che a sua volta è in grado di generare nel solenoide un campo magnetico di polarità “N” in modo da opporsi al campo induttore. Una polarità omologa tende, infatti, a respingere il campo induttore. Se, al contrario, la variazione sarebbe ottenuta riducendo il campo di polarità “N” (cosa che potrebbe essere ottenuta allontanando l’eventuale calamita), il potenziale di Lenz che si produce ai capi del solenoide, avrebbe verso tale da far circolare una corrente che a sua volta sarà in grado di generare un campo magnetico di

polarità "S" in modo da opporsi al campo induttore. Una polarità magnetica opposta tenderà, infatti, ad attirare il campo che si allontana.

Costante di struttura fine dell'elettrone

Nel modulo n. 3 abbiamo ampiamente parlato degli spettri ottici di alcuni atomi generici. La figura 31.3 della sezione "allegato" del modulo n.3 ci ha mostrato un esempio delle righe spettrali osservabili in campo ottico per alcuni elementi chimici caratteristici. Osservando attentamente con maggiore risoluzione le righe spettrali di alcuni di questi atomi, come per esempio l'idrogeno oppure l'elio, possono essere osservate più finemente costituite alcune ulteriori distribuzioni di livelli. In pratica, quello che accade è che aumentando la risoluzione degli apparati spettroscopici si osserva una maggiore distribuzione di energie elettroniche. Appaiono più linee di quelle che potremo aspettarci. La spiegazione di questo fenomeno fu elaborata nel 1916 da Arnold Sommerfeld e veniva spiegata in ragione del fatto che l'elettrone era sottoposto, durante il moto di rivoluzione attorno all'atomo da variazioni di assetto orbitale che tenevano conto di effetti relativistici. Pertanto Sommerfeld calcolò una costante adimensionale, oggi chiamata "**Costante di struttura fine** - α -" (o anche costante di Sommerfeld) che teneva conto delle interazioni elettromagnetiche dell'elettrone lungo la sua orbita. Essendo " α " una costante adimensionale essa ha un'importanza fondamentale nella fisica teorica. L'esistenza stessa di questa costante viene interpretata da alcuni ricercatori come un indizio dell'incompletezza del nostro sistema teorico attuale. Infatti, una costante adimensionale è indipendente dall'unità di misura e appare come un fattore arbitrario in una teoria.

La costante di struttura fine dipende a sua volta da alcune costanti fondamentali della fisica e può essere calcolata nel sistema S.I. utilizzando questa formula:

$$\alpha = \frac{\mu_0 \cdot c \cdot e^2}{2 \cdot h} \quad (23.014)$$

Oppure utilizzando quest'altra formula derivata:

$$\alpha = \frac{e^2}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot h \cdot c} \quad (24.014)$$

In termini c.g.s la formula per calcolare questa costante si semplifica riducendosi a:

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar \cdot c} \quad (25.014)$$

Dove “ μ_0 ” e “ ϵ_0 ” sono rispettivamente le costanti di permeabilità magnetica ed elettrica, “ e ” rappresenta la carica elettrica dell'elettrone, “ h ” la costante di Planck “ c ” la velocità della luce nel vuoto e “ \hbar ” la costante di Planck fratto due volte il valore di “ π ” la cosiddetta h tagliata.

È molto interessante notare che le costanti di permeabilità magnetica e permittività elettrica sono entrambi legate alla funzione matematica che determina il valore di “ α ”, legando il fenomeno di perturbazione dell'elettrone lungo la sua orbita alla propagazione della luce. Non è un caso che la velocità dell'elettrone sulla prima orbita elettronica (distanza di Bohr) che noi abbiamo calcolato con la formula 11.01 al Modulo n.1 è esattamente uguale al valore della velocità della luce moltiplicato il valore della costante di struttura fine. Il valore di “ α ” è oggi calcolato prossimo a **0.007297354** ma, più conosciuto come il suo reciproco e cioè pari a **137.03597**. Quindi l'elettrone dell'atomo di idrogeno, nel suo moto di rivoluzione intorno al protone e precisamente alla distanza di 0,053nm dal nucleo, viaggia ad una velocità **137** volte inferiore di quella della luce.

Da un punto di vista della fisica quantistica il valore di “ α ” esprime benissimo la probabilità di accoppiamento di ogni elettrone al suo campo fotonico virtuale. E come se dovessimo effettuare 137 osservazioni per beccare in fragrante un elettrone accoppiato al suo fotone virtuale.

Questa costante, come abbiamo già detto, rappresenta un concetto molto importante, per esempio, se essa fosse anche leggermente diversa dal valore attuale, l'Universo sarebbe sensibilmente diverso da quello che conosciamo o forse non ci sarebbe affatto. In pratica, i valori delle costanti per le quali dipende il valore di “ α ” sono stati ben accordati da rendere possibile la struttura fisica che oggi conosciamo. Se questa costante, per esempio fosse leggermente più grande, non ci sarebbero gli atomi poiché gli elettroni sarebbero “risucchiati” dal nucleo e l'atomo si disintegrerebbe. Se viceversa fosse più piccola, gli atomi sarebbero troppo instabili per poter durare nel tempo. Pare quindi che Dio abbia determinato il giusto valore di tutte le costanti fisiche che maggiormente contano, a loro volta rappresentate dalla costante di struttura fine, per permettere al nostro Universo di esistere così come lo conosciamo.

Non è propriamente giusto per un'opera che vuole essere considerata pulita e corretta da un punto di vista divulgativo, aggiungere a questo punto considerazioni che potrebbero turbare il rigore scientifico fino ad ora raggiunto. Il lettore mi scuserà se faccio questo azzardo dettato unicamente dal vezzoso piacere di farvi notare alcune curiose e bizzarre osservazioni che sono riuscito a trovare in letteratura.

Come sapete la Cabalà o Cabbalà è la dottrina segreta degli ebrei, trasmessa nei secoli dai grandi maestri ai propri discepoli. In ebraico il termine corretto è “**Qabbàlàh**” e significa semplicemente “Tradizione” e designa i testi profetici e agiografici della Bibbia quindi non ha alcuna connotazione mistica o esoterica. Fu solo nel Medioevo che tale pratica cominciò ad assumere un significato esoterico. La Qabbalah è anche chiamata “La saggezza celeste”, “L'Aritmetica sacra”, in ogni caso essa esprime i concetti di “ricezione” o “accettazione”. Ebbene, non volendo disturbare il lettore, già ampiamente distratto e forviato da queste argomentazioni molto distanti dal contesto in cui ci troviamo, vengo subito al dunque. Un aspetto molto noto della Qabbàlàh è la “corrispondenza” dei caratteri ebraici con i numeri. Il lettore potrà divertirsi a

trovare libri, articoli o tabelle anche in rete che mostrano come i simboli dell'alfabeto ebraico sono associati ai numeri (gematria). Ora il termine Qabbalàh in ebraico si scrive esattamente come viene mostrato nella figura 28.014. Ricordiamo che le vocali ebraiche non vengono trascritte. Infatti, leggendo da destra verso sinistra, abbiamo la lettera "Qof o Quf" che si pronuncia come una "Q" aperta, la lettera "Beit o Bet" che si legge "bà", la lettera "Lamed" di valore fonetico "L" ed infine la lettera "Hey". La scritta andrebbe quindi letta **QaBaLaH**.



Fig. 28.014 - Rappresentazione in caratteri ebraici della parola Cabbalà e significati numerici -

In base al parallelismo numerico di cui prima parlavamo, alcuni autori molto fantasiosi fanno osservare come inserendo il valore numerico corrispondente ad ogni lettera ebraica otteniamo il numero $100+2+30+5=137$. Non saprei dirvi se l'astuzia di aver eliminato una "B" di troppo possa essere stata fondamentale per raggiungere tale risultato, oppure la mia personale ignoranza in questo argomento non mi permette di osservarne la logica e apprezzarne l'arcana essenza.

NOTE 4: (Riferimento allo spin degli elettroni di pag 643)

In nessun testo di elettromagnetismo che si rispetti è contenuta un'affermazione in tal senso. Il campo magnetico prodotto da un conduttore attraversato da corrente elettrica è l'effetto del solo movimento degli elettroni che fluiscono al suo interno. La teoria dell'elettromagnetismo non tiene conto del fatto che ogni elettrone è dotato di momento di spin, poiché quest'effetto si considera nullo a causa del grande numero di elettroni che fluiscono nel filo conduttore e dell'orientazione casuale di quest'ultimo. Le stesse equazioni di Maxwell non includono il momento di spin per spiegare le leggi dell'elettromagnetismo.

Tuttavia, l'autore con la sua ardita e personale affermazione costringe la nostra mente a farci una domanda. È veramente sufficiente il solo movimento ordinato degli elettroni a creare un campo magnetico? Cosa accadrebbe se in un filo conduttore attraversato da elettroni si orientasse anche gli spin di ogni elettrone facente parte del flusso elettrico? È stato mai osservato un effetto del genere? Non sarebbe più semplice pensare che il campo magnetico è sempre e solo originato dall'orientamento dello spin dell'elettrone? Potrebbero essere incomplete le equazioni di Maxwell? Il lettore consideri che questo punto ha originato molte discussioni ed ha anche prodotto risentimento e indignazioni fra alcuni cattedratici. L'autore si sente molto sereno poiché avendo dedicato quest'opera al docente, è ben conscio del fatto che eventuali discussioni su queste affermazioni (per quanto non nocive alla salute della mente anzi, certamente foriere di nuove riflessioni e nuovi spunti) potranno avvenire solo fra competenti e professionisti e quindi lo studente verrebbe automaticamente tutelato dal filtro posto in tal senso dal suo docente. Certamente non si pretende che tutti i contenuti che abbiamo discusso in questo volume debbono essere

raccontati ai nostri studenti. Il docente potrà avvalersi addirittura, anche del suo dissenso su questa specifica argomentazione, del suo marcato distacco e disaccordo su queste considerazioni, per far leva maggiormente con quegli stimoli (pertanto altamente didattici ed educativi) che porterebbero gli studenti a valutare saggiamente e concretamente tali curiose argomentazioni rispetto alle teorie concrete e reali esistenti. L'autore ringrazia ed incoraggia fin d'ora ogni altro futuro dibattito su questo punto che costituirebbe elemento di confronto necessario ed accrescerebbe la sua umile ed esigua preparazione.