

- ⌘ Diamagnetismo e paramagnetismo: cosa si vede e cosa cambia
- ⌘ Il momento magnetico atomico e la sua quantizzazione
- ⌘ Diamagnetismo e paramagnetismo: interpretazione microscopica
- ⌘ Il ferromagnetismo: aspetti quantitativi ed interpretazione
- ⌘ Applicazioni delle leggi sul magnetismo nella materia

V.8 Il magnetismo nella materia

8.1 Diamagnetismo e paramagnetismo: cosa si vede e cosa cambia

8.1.1 COSA SUCCEDDE QUANDO UN CAMPO MAGNETICO INTERAGISCE CON LA MATERIA?

Trattando dei campi elettrici ci siamo ampiamente occupati degli effetti prodotti dal campo elettrico sulla materia e cioè: produzione di correnti elettriche nei conduttori e fenomeni di polarizzazione negli isolanti. Ci occupiamo ora del comportamento dei campi magnetici in presenza della materia. Tale studio è importante per due ragioni:

- ha portato a scoprire importanti proprietà della materia sul piano microscopico: momenti magnetici degli elettroni e degli atomi e ruolo che essi giocano nella costruzione della tabella degli elementi;
- ha permesso di scoprire l'esistenza di materiali (i materiali ferromagnetici, ma non solo) che hanno la capacità di potenziare in maniera molto elevata gli effetti magnetici

È ben noto che su di un pezzo di ferro posto in vicinanza di un anello percorso da corrente si esercita una forza attrattiva e che la forza di interazione tra due spire percorse da corrente aumenta notevolmente se si inserisce tra esse un nucleo di ferro. Proprietà simili sono possedute anche dall'acciaio, dal nichel, dal cobalto e da altre leghe contenenti questi metalli. Tutte queste combinazioni di elementi vengono dette *materiali ferromagnetici* insieme ad alcune *terre rare* quali il gadolinio.

Per quanto riguarda la intensità della interazione con un campo magnetico tutte le sostanze si dividono in due categorie:

- i materiali *paramagnetici* e *quelli diamagnetici* che sono *debolmente magnetici* e possiedono tale proprietà a qualsiasi temperatura
- i materiali *ferromagnetici* che *interagiscono fortemente* con il campo magnetico ma lo fanno solo *al di sotto di una ben definita temperatura*.

La classificazione che si utilizza ancora oggi è dovuta ad una serie di lavori sperimentali compiuti da Faraday alla fine degli anni 40 dell'800. In essi Faraday ha dimostrato che tutte le sostanze possiedono proprietà magnetiche ma che il grado e la natura del tipo di interazione con il campo differiscono per le diverse sostanze. Per questa ragione si distingue tra *paramagnetismo*, *diamagnetismo* e *ferromagnetismo*.

Sul piano etimologico *para-* sta per affinità, somiglianza e *dia-* per separazione. Il *paramagnetismo* significherà dunque comportamento affine al magnetismo e *diamagnetismo* indicherà invece un comportamento teso a separarsi dal magnetismo. La terminologia è stata introdotta da Faraday ed è ancora in uso.

8.1.2 IL PARAMAGNETISMO: ASPETTI FENOMENICI

Vengono chiamati *materiali paramagnetici* quelli che vengono risucchiati dal campo magnetico verso la regione di campo più intenso e che hanno

la terminologia introdotta da Faraday e che si usa ancora:

paramagnetismo = affinità

diamagnetismo = separazione

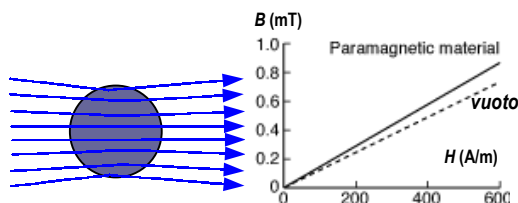
la capacità di attirare verso di sé le linee di forza del campo (cioè di produrre una intensificazione dello stesso).

Se si mette un liquido paramagnetico in un tubo a U collocato tra le espansioni polari di un potente elettromagnete si osserverà che il liquido risale sul lato posto tra le espansioni. Inoltre una sbarretta sottile di materiale paramagnetico, sospesa ad un filo, ruota sino ad orientarsi come le linee di forza.

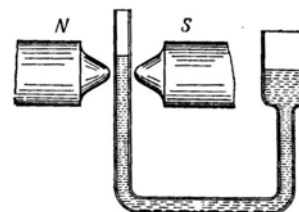
Le proprietà dei materiali paramagnetici sono simili a quelle dei ferromagnetici ma la forza di interazione è molto meno intensa essendo compresa tra un centesimo ed un millesimo di quella dei materiali ferromagnetici. Per questa ragione per osservare fenomeni di tipo paramagnetico, occorrono campi piuttosto intensi.

Hanno proprietà paramagnetiche alcuni metalli quali il platino, l'alluminio, il tungsteno e tutti i metalli alcalini e alcalino-terrosi. Tra i gas hanno proprietà paramagnetiche l'ossigeno e l'azoto e conseguentemente l'aria.

Il paramagnetismo è un fenomeno analogo alla polarizzazione per orientamento. I momenti magnetici già presenti a livello elettronico e atomico che sono normalmente orientati in maniera casuale si orientano nella direzione del campo esterno e lo rafforzano.



i materiali paramagnetici risucchiano debolmente le linee di forza; a destra confronto qualitativo con la situazione nel vuoto



un liquido paramagnetico viene risucchiato da un campo magnetico intenso

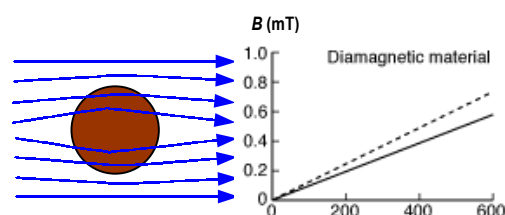
8.1.3 IL DIAMAGNETISMO: ASPETTI FENOMENICI

Si chiamano *diamagnetiche* quelle sostanze che vengono debolmente respinte dal campo magnetico.

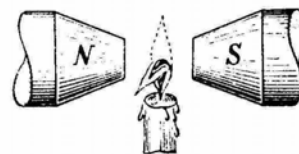
Se si mette una candela tra i poli di un elettromagnete si osserva che la fiamma viene respinta dal campo e questo fenomeno, scoperto da Faraday indica che l'ossido e il biossido di carbonio hanno proprietà diamagnetiche; inoltre se si sospende una sbarretta di materiale diamagnetico in un campo magnetico intenso essa si dispone perpendicolarmente alle linee di induzione (trasversalmente al campo).

Le forze di origine diamagnetica sono di uno o due ordini di grandezza inferiori a quelle che uno stesso campo esercita sui materiali paramagnetici. E' questa la ragione per cui la osservazione di effetti diamagnetici richiede campi magnetici particolarmente intensi. Quasi tutti i gas (tranne l'ossigeno e l'azoto) sono diamagnetici e lo sono pure l'acqua, l'argento, l'oro, il rame, il diamante, la grafite, il bismuto e molti composti di origine organica.

Il diamagnetismo è analogo alla polarizzazione per deformazione: i momenti magnetici di una coppia di elettroni dell'atomo che si facevano equilibrio cambiano sotto l'azione della forza di Lorentz dovuta al campo applicato dall'esterno. Ma mentre quello parallelo diminuisce, quello antiparallelo si rafforza e l'effetto globale è la comparsa di un momento magnetico risultante con verso contrario alle linee di forza del campo esterno.



i materiali diamagnetici respingono debolmente le linee di forza; a destra confronto qualitativo con la situazione nel vuoto



il campo magnetico respinge la fiamma che contiene ossido e biossido di carbonio (entrambi diamagnetici)

8.1.4 DI QUANTO CAMBIA IL VETTORE INDUZIONE MAGNETICA?

Consideriamo un solenoide percorso da corrente e chiediamoci come varia il valore del corrispondente vettore induzione magnetica quando la misura viene eseguita nel vuoto o in presenza di un mezzo materiale.

Sostanze Paramagnetiche	$\frac{B}{B_0}$
Aria (gas)	1.000038
Alluminio	1.000023
Azoto (gas)	1.000013
Ossigeno (gas)	1.000017
Ossigeno (liquido)	1.0034
Platino	1.000253
Sodio	1.0000072
Tungsteno	1.000175
Uranio	1.00040
Tabella V.8.1	

Sostanze Diamagnetiche	$\frac{B}{B_0}$
Acqua	0.999991
Argento	0.999974
Bismuto	0.999824
Idrogeno molecolare	0.999937
Oro	0.999963
Rame	0.999912
Vetro	0.999987
Zinco	0.999991
Tabella V.8.2	

Per le misure quantitative basta confrontare la f.e.m. indotta in uno stesso esperimento condotto nel mezzo di cui si vogliono indagare le proprietà e poi nel vuoto per avere il rapporto tra B e B_0 .¹

Come si vede nelle due tabelle, in generale si hanno o piccoli aumenti o piccole diminuzioni a seconda della sostanza considerata.

Nei materiali paramagnetici si ha un aumento che incide sulla quinta o sesta cifra dopo la virgola. In un solo caso (ossigeno liquido) l'incremento interviene sulla terza cifra. Considerazioni analoghe, anche se in diminuzione si hanno per le sostanze diamagnetiche.

Nei materiali ferromagnetici si verifica invece un aumento di alcuni ordini di grandezza (tra cento e centomila volte), ma il fenomeno perde di linearità, cioè non esiste più proporzionalità tra intensità di corrente e vettore induzione magnetica.

Nei prossimi paragrafi cercheremo di descrivere quantitativamente questi fenomeni e di darne una spiegazione in termini di modelli atomici cercando di verificare la rispondenza delle spiegazioni fornite dai modelli con i risultati sperimentali. In effetti il magnetismo della materia evidenzia l'esistenza di proprietà magnetiche di tipo elementare dovute in parte alla esistenza di correnti su scala atomica e in parte a proprietà magnetiche *intrinseche* delle particelle.

8.1.5 UN RIEPILOGO DELLE COSE ESSENZIALI

In questo paragrafo introduciamo le grandezze che consentono di quantificare gli effetti dovuti alla presenza della materia nella determinazione del campo magnetico creato da un dato insieme di cause (correnti elettriche, magneti permanenti, cariche in moto, ...).

Eseguendo esperimenti di magnetizzazione in presenza della materia si osserva quanto segue:

- la presenza della materia determina sempre una variazione (incremento o diminuzione) rispetto al valore di B che un dato insieme di cause (correnti) determinerebbe nel vuoto.
- continua a valere la proporzionalità tra le cause (le correnti) e gli effetti (il vettore B) che abbiamo già discusso nel capitolo di introduzione al magnetismo. Pertanto il ruolo giocato dalla materia può essere descritto mediante un cambiamento nella costante di proporzionalità presente in quelle relazioni.

Posto che tutte le leggi che consentono di determinare B nel vuoto contengono la costante μ_0 si chiama campo magnetico H la quantità:

$$H = \frac{B_0}{\mu_0}$$

la definizione del campo magnetico H

dipendente da i e dalle caratteristiche geometriche del fenomeno esaminato ma non dal materiale.

A questo punto, poiché anche in presenza della materia, permane la proporzionalità tra B e H si descrive la *magnetizzazione* dovuta alla materia come un cambiamento nel valore di μ . Tale cambiamento può essere

¹ Il fenomeno della induzione elettromagnetica sarà ampiamente analizzato nel prossimo capitolo.

descritto in una tabella attraverso la quantità pari al rapporto tra permeabilità magnetica nella materia e corrispondente valore nel vuoto. Ciò è quanto si è fatto nelle tabelle presentate all'inizio del capitolo. Il rapporto viene ovviamente chiamato *permeabilità magnetica relativa* ed è un numero puro.

$$B = \mu H \quad \mu = \mu_r \mu_0 \quad (\text{V.8.1})$$

la permeabilità magnetica relativa

Il termine permeabilità magnetica richiama terminologicamente l'idea di una disposizione maggiore o minore, del mezzo, a farsi attraversare dalle linee di forza.

Nel passaggio dal vuoto alla materia cambiano le costanti di proporzionalità tra le correnti e i corrispondenti valori del vettore induzione magnetica. Quando un campo magnetico agisce in un mezzo materiale si determina una variazione della induzione che si avrebbe nel vuoto (aumento o diminuzione). Il nuovo valore di induzione magnetica, tranne che per i materiali ferromagnetici è sempre proporzionale a quello che si avrebbe nel vuoto e la costante adimensionale di proporzionalità è la permeabilità magnetica relativa.

Su scala microscopica i due fenomeni di aumento e diminuzione sono sempre presenti. L'aumento è dovuto al fatto che sotto l'azione di un campo esterno i momenti magnetici orbitali degli elettroni ed i momenti di spin tendono ad orientarsi nello stesso verso del campo esterno e ciò determina un aumento dell'induzione magnetica complessiva.

La diminuzione è invece dovuta all'influenza che il campo magnetico ha sulle orbite elettroniche determinando una modifica dei momenti angolari e conseguentemente una modifica dei momenti magnetici. Come vedremo i momenti magnetici paralleli diminuiscono e quelli antiparalleli aumentano e si ha pertanto un effetto globale a favore dei momenti magnetici antiparalleli.

Quando la risultante dei momenti magnetici propri dell'atomo è diversa da zero si ha il prevalere degli effetti di orientamento e si produce il paramagnetismo (anche se si ha comunque un effetto diamagnetico schermato da quello paramagnetico). Quando invece il momento magnetico complessivo è nullo, la applicazione di un campo esterno fa comparire la sola variazione dei momenti magnetici orbitali e si ha il diamagnetismo.

la intensificazione è dovuta all'orientamento dei momenti magnetici microscopici; la diminuzione (meno rilevante) è dovuta all'azione di indebolimento dei momenti magnetici microscopici dovuta al campo esterno

i due effetti sono sempre presenti contemporaneamente ma il primo è trascurabile quando il momento risultante su scala atomica è nullo

8.2 Il momento magnetico atomico e la sua quantizzazione

8.2.1 LE PROPRIETÀ DEL MOMENTO MAGNETICO A LIVELLO ATOMICO

All'inizio del XIX secolo, nel tentativo di spiegare la capacità delle correnti galvaniche di influenzare il comportamento degli aghi magnetici, A. M. Ampère giunse alla conclusione che le proprietà magnetiche della materia potessero essere spiegate supponendo che gli atomi fossero magneti microscopici elementari e che queste proprietà magnetiche fossero dovute all'azione di correnti elettriche elementari.

Il contesto in cui fu elaborata questa teoria risentiva delle scoperte di Oersted ma era invece del tutto estraneo alla moderna teoria atomica cui siamo abituati.

Oggi si afferma che la presenza di proprietà magnetiche su scala elementare è comprensibile se si tiene conto del fatto che, in ultima analisi, un'orbita elettronica può essere assimilata ad una spira percorsa da corrente e, una spira percorsa da corrente, a sua volta, presenta proprietà comparabili a quelle di un ago magnetico (momento magnetico orbitale) e del fatto che l'elettrone presenta una proprietà magnetica intrinseca detta spin^2 evidenziabile come un momento magnetico proprio dell'elettrone.

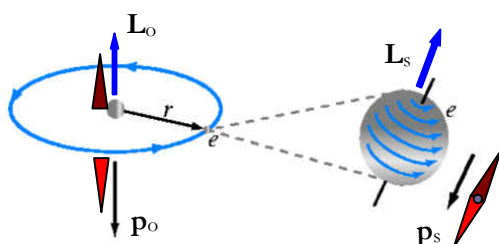
Il momento magnetico di un atomo può essere pensato come la somma vettoriale dei momenti magnetici degli elettroni che ruotano intorno al nucleo e del momento magnetico del nucleo stesso. I dati sperimentali indicano però che il momento magnetico del nucleo è da mille a duemila volte minore di quello dell'elettrone e, per questa ragione, nello studiare le proprietà magnetiche della materia si trascura il momento magnetico del nucleo e si assume che il momento magnetico dell'atomo sia la somma vettoriale dei momenti magnetici degli elettroni che circolano intorno al nucleo.

Ci occuperemo per ora dell'aspetto orbitale: in effetti l'elettrone che ruota entro l'atomo corrisponde ad una corrente elettrica elementare dotata di momento magnetico p_o . Ma l'elettrone, percorrendo la sua orbita, risulta dotato di un momento angolare chiamato *momento angolare orbitale* L_o . Nel capitolo introduttivo sul magnetismo si è visto che:

$$p_o = \frac{e}{2m_e} L_o$$

e dunque esiste una semplice proporzionalità di carattere vettoriale tra la grandezza meccanica legata al fenomeno di rotazione (il momento angolare) e la grandezza magnetica connessa alla circolazione di una corrente elettrica (il momento magnetico).

² Ci si rappresenta classicamente lo spin come l'effetto di una rotazione dell'elettrone su se stesso. Il termine inglese *spin* richiama l'idea di un elettrone che ruoti su se stesso come una trottola e in questo modo produca un nuovo momento angolare e magnetico. Si tenga presente che questa idea, così come altre idee di visualizzazione delle proprietà del mondo microscopico attraverso modelli ripresi da quello macroscopico, non va intesa diversamente da una pura e semplice analogia. Non abbiamo elementi per parlare degli elettroni come sferette che girano come una trottola, ma possiamo semmai affermare che: *se ci raffiguriamo l'elettrone come un corpo macroscopico, allora possiamo pensare al momento di spin come all'effetto di una rotazione della sfera su se stessa.*



il **momento magnetico** e il **momento angolare** sono **proporzionali** (paralleli od antiparalleli a seconda che la carica sia positiva o negativa); il **momento magnetico su scala atomica** è associato a quello **orbitale** e a quello **intrinseco** (spin) dell'elettrone



Ricordiamo ancora che dalla conoscenza del momento magnetico si risale agevolmente sia al vettore $\mathbf{B}$ sia alla forza di interazione tra l'entità dotata di momento magnetico ed un campo di induzione esterno.

In particolare se si inserisce un oggetto dotato di momento magnetico $\mathbf{p}_m$ in un campo magnetico variabile lungo una direzione z l'oggetto subisce una interazione proporzionale al momento magnetico ed al gradiente del campo magnetico

$$F_z = p_{mz} \frac{\Delta B}{\Delta z}$$

8.2.2 LA QUANTIZZAZIONE DEL MOMENTO ANGOLARE E IL MAGNETONE DI BOHR

Agli albori della meccanica quantistica risultò necessario, per dare conto delle caratteristiche dello spettro di righe emesso dalle sostanze più complesse del semplice atomo di idrogeno, introdurre una regola di quantizzazione dei momenti angolari orbitali.

Tale regola equivale a prendere in esame accanto alle orbite elettroniche circolari (le prime originariamente considerate) anche orbite ellittiche di uguale energia e di diverso momento angolare.

La quantizzazione di Bohr dei momenti angolari, inizialmente assunta, perché *faceva tornare i conti*, viene oggi dedotta nell'ambito della teoria quantistica e afferma che il momento angolare orbitale è quantizzato e può assumere solo valori discreti secondo la relazione:

$$L = l\hbar \quad (\text{V.8.2})$$

dove $\hbar$ è la *costante di Planck ridotta* che i fisici chiamano *h tagliato* ($\hbar/2\pi$) = 1.05459×10^{-34} J·s; l è un generico numero intero compreso tra 0 e $n-1$ dove n rappresenta il primo numero quantico (indicatore della energia o equivalentemente della dimensione orbitale).

Se teniamo conto della proporzionalità tra momento magnetico orbitale e momento angolare otteniamo:

$$p_o = \frac{e}{2m_e} L_o = l \frac{e\hbar}{2m_e} = l\mu_B \quad (\text{V.8.3})$$

La quantità:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = (9.274096 \pm 0.000065) \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \quad (\text{V.8.4})$$

è chiamata *magnetone di Bohr* e poiché è ottenuta combinando tre costanti fondamentali, carica e massa dell'elettrone e costante di Planck, è essa stessa una costante fondamentale.

Il magnetone di Bohr è il valore minimo, diverso da zero, che può assumere il momento magnetico dell'elettrone e può dunque essere considerato come l'unità elementare naturale di momento magnetico quanto lo è l'elettrone per la carica elettrica, una sorta di *granulo di magnetismo*.

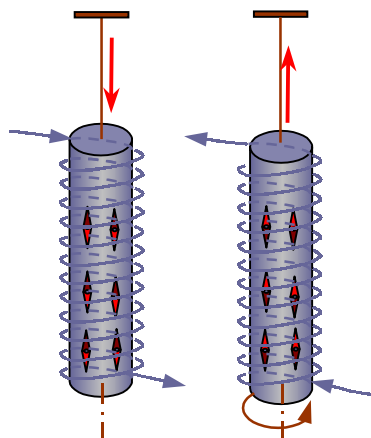
8.2.3 PROVE SPERIMENTALI DEL LEGAME TRA MOMENTO MAGNETICO E MOMENTO ANGOLARE

Il legame tra momento angolare e momento magnetico è stato fatto oggetto di indagine sperimentale. L'idea, per un esperimento del genere che si trova già negli scritti di Maxwell, venne avanzata da Einstein nel



il **magnetone di Bohr** può essere considerato una specie di **granulo di magnetismo**

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$$



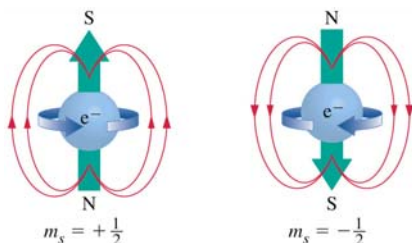
L'esperimento di Einstein De Haas

L'inversione del campo macroscopico fa invertire i momenti magnetici orbitali e con essi i momenti angolari microscopici; poiché il sistema è isolato e non può cambiare il momento magnetico macroscopico la sbarra si deve mettere in rotazione in modo di annullare la variazione del momento angolare microscopico



Uhlenbeck, Kramers e Goudsmit ai tempi della proposta dello spin

$$L_{\text{spin}} = \pm \frac{1}{2} \hbar$$



1915 e tale esperimento venne realizzato nello stesso anno insieme al genero di Lorentz W. J. de Haas (1878-1960).

L'esperimento consiste nel sospendere una sbarretta di materiale ferromagnetico ad un filo sottile all'interno di un solenoide in modo che l'asse della sbarretta, il filo e la direzione del campo magnetico del solenoide siano coincidenti. Il filo di sospensione consente di valutare i momenti torcenti dovuti all'effetto indagato.

Si fa passare nel solenoide una corrente in grado di portare la sbarretta alla saturazione e successivamente si inverte il senso della corrente in modo di determinare una nuova saturazione in verso contrario. Poiché la inversione di magnetizzazione determina una inversione nel momento magnetico microscopico ne consegue che si deve invertire anche il momento angolare degli elettroni orbitali.

Ma poiché il sistema costituito dal reticolo ionico e dagli elettroni è un sistema chiuso deve rimanere costante il momento angolare del sistema.

Dunque, se cambia il momento angolare degli elettroni per effetto della inversione di magnetizzazione, deve cambiare il momento angolare della sbarretta in modo che il momento angolare complessivo non cambi e la sbarretta si mette a ruotare intorno ad un asse parallelo al campo.

Questa è stata la prova sperimentale del fatto che la presenza di elettroni orbitanti fosse compatibile con una condizione di stabilità (come aveva previsto Bohr nel 1913), che gli atomi possiedono un momento magnetico dovuto al movimento degli elettroni e che il momento magnetico è associato ad un momento angolare meccanico.

Nello stesso anno S. J. Barnett (1873-1956) mostrò che esiste anche l'effetto inverso dell'effetto Einstein de Haas e cioè che se si fa ruotare rapidamente una sbarra di ferro essa si magnetizza.

I due esperimenti non sono stati significativi sul piano quantitativo nonostante sia Einstein sia Barnett abbiano cercato di determinare la costante di proporzionalità tra momento magnetico e momento angolare. Gli errori sperimentali erano molto elevati e la teoria di sostegno al modello adottato era del tutto insoddisfacente rispetto alla spiegazione del fenomeno.

Una attenta analisi dei dati sperimentali relativi ad entrambi gli esperimenti rivela che il rapporto tra il momento magnetico e il momento angolare ha il segno atteso corrispondente al segno negativo della carica dell'elettrone, ma il valore sperimentale risulta essere doppio di quello atteso, come se si avesse l'azione di un ulteriore momento magnetico a parità di momento angolare; si ha cioè: $\frac{\mu_0}{L} = \frac{e}{m_e}$

Per spiegare tale risultato, oltre che per dare ragione di alcune anomalie relative all'esperimento di Stern e Gerlach di cui si tratta nel prossimo paragrafo, Uhlenbeck e Goudsmit avanzarono l'ipotesi dello spin.

Con questa ipotesi si suppone che l'elettrone, oltre al momento magnetico orbitale previsto, possieda anche un *momento magnetico proprio detto di spin* che sommato a quello orbitale soddisfa le equazioni e che, quando viene misurato, possa pertanto corrispondere ad un valore di momento angolare pari a $\frac{1}{2} \hbar$.

8.2.4 COSA SONO E DA DOVE VENGONO I 4 NUMERI QUANTICI DELLA CHIMICA

Dagli studi di chimica generale si sono apprese alcune *regole magiche* che sembrano governare la struttura degli elementi. La tavola degli elementi di Mendeleev viene costruita utilizzando una strana numerologia che porta a collocare gli elettroni (in numero pari al numero di protoni presenti nel nucleo e il cui numero rappresenta il *numero atomico*) entro gli atomi rispettando il *principio di esclusione di Pauli*; secondo questo principio in uno stesso sistema fisico (l'atomo) non possono essere presenti due elettroni dotati degli stessi numeri quantici. Gli elettroni vengono collocati a partire dai numeri quantici più bassi nel rispetto dei vincoli di valore dei numeri stessi.

I numeri quantici sono stati introdotti nella fase iniziale della meccanica quantistica come *ipotesi ad hoc* in grado di spiegare alcuni risultati sperimentali relativi al mondo microscopico. Essi sono stati poi dedotti dalla struttura assiomatica della meccanica quantistica come previsioni della teoria.

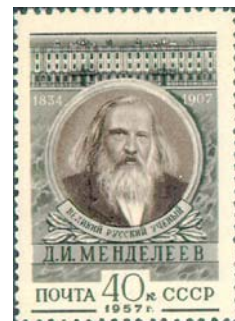
- Il primo numero quantico n compare per la prima volta nel modello di Bohr dell'atomo (1913) ed è un numero naturale che rappresenta, in opportune unità, la energia dell'orbitale elettronico considerato. I valori corrispondono al fatto che i diversi livelli energetici sono quantizzati. Ovvero non tutte le orbite sono possibili, ma risultano stabili solo quello con energia (o raggio atomico) derivanti dalla condizione di quantizzazione del primo numero quantico.
- Il secondo numero quantico l può assumere valori compresi tra 0 e $n-1$ ed esprime, in una opportuna unità di misura, il momento angolare dell'orbitale elettronico.

Ad un dato valore di energia corrispondono, in una visione classica, diverse forme di orbita, tra cui la *forma assurda* costituita da un segmento che passa per il nucleo e che corrisponde al momento angolare nullo. Abbiamo già visto che, a ciascun valore del momento angolare corrisponde un equivalente momento magnetico orbitale. Il secondo numero quantico è stato introdotto da Sommerfeld (1915) per spiegare la cosiddetta *struttura fine* dello spettro dell'atomo di idrogeno. Osservando lo spettro ad alta risoluzione si era infatti scoperto sin dalla fine dell'800 erano presenti righe molto ravvicinate. Sommerfeld le interpreta come orbite con piccole differenze di energia dovute a differenze di momento angolare.

- Il terzo numero quantico m_l può assumere i $2l + 1$ valori compresi tra $-l$ e l e viene di solito spiegato dicendo che l'orbitale, all'interno di un campo magnetico dato, non può possedere qualsiasi componente di momento angolare (momento magnetico) lungo quella direzione, ma può assumere solo i valori discreti dati da m_l .

Ciò significa che quando si fissa una particolare direzione nello spazio (in questo caso quella definita dal campo magnetico) lungo tale direzione sia il momento magnetico, sia il momento angolare, possono presentare solo valori discreti e non tutta la gamma degli infiniti valori compresi tra il modulo e il suo opposto.

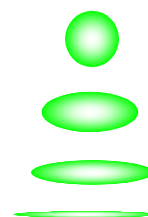
Il terzo numero quantico è stato introdotto per spiegare l'*effetto Zeeman anomalo* (1897) e soprattutto i risultati dell'esperimento di Stern e



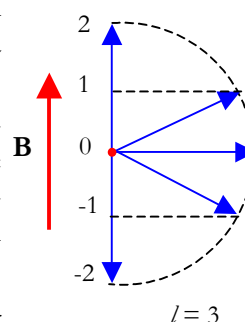
Dmitri Ivanovich Mendeleev e Wolfgang Pauli: il primo ordina gli elementi nella **tabella** che porta il suo nome, il secondo ne dà una **spiegazione** attraverso i numeri quantici



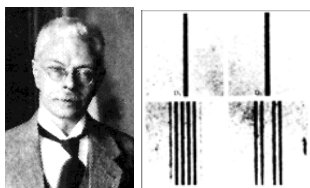
Il **primo numero quantico** indica la quantizzazione dei livelli energetici; sono ammissibili e stabili solo taluni **raggi orbitali** e le corrispondenti **energie**



Sommerfeld associa il **secondo numero quantico** alla **quantizzazione** della **forma dell'orbita** legata al **momento angolare**



Il **terzo numero quantico** sostiene che la **componente del momento magnetico** rispetto ad una direzione privilegiata (per esempio un campo esterno) può assumere solo valori discreti (**le orbite si orientano a scatti**)

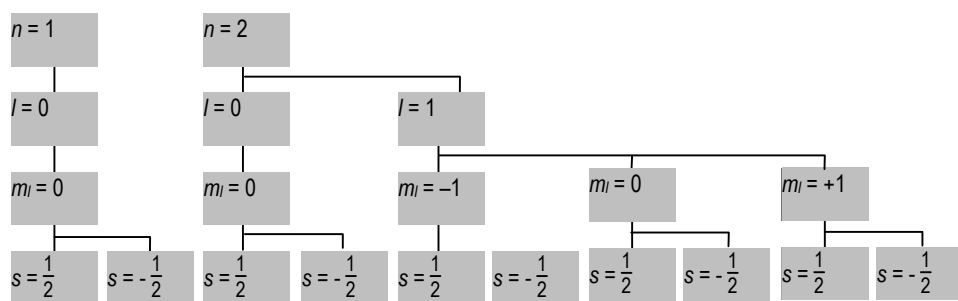


Peter Zeeman e l'immagine dello spargimento delle righe spettrali dovuto all'azione di un campo magnetico

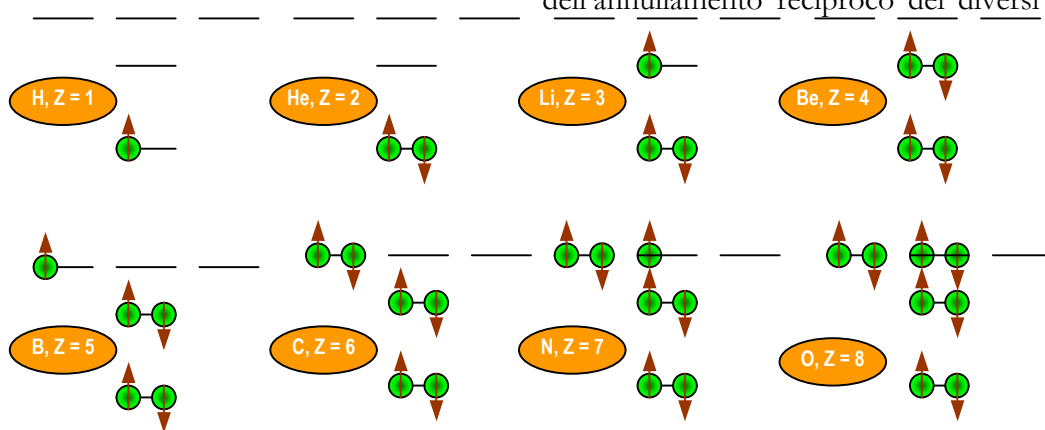
Gerlach (vedi). Zeeman osservò che le righe spettrali emesse dai diversi elementi subivano un leggero sparpagliamento quando questi elementi venivano immersi in un campo magnetico. Era la dimostrazione non solo del fatto che il campo esterno interagisce con i momenti magnetici orbitali modificandone le caratteristiche, ma anche del fatto che sotto l'effetto del campo le orbite assumevano solo alcune configurazioni spaziali. Per una prima spiegazione classica dell'effetto Zeeman si veda la citazione di De Broglie a fine capitolo.

- Infine il quarto numero quantico corrisponde allo spin e ad un corrispondente momento angolare con due soli possibili valori $\pm \frac{1}{2}$

Dunque gli elementi vengono costruiti collocando gli elettroni entro livelli energetici tali per cui non si trovano mai, in uno stesso atomo elettroni dotati degli stessi 4 numeri quantici. I 4 numeri quantici costituiscono una sorta di carta di identità di ogni elettrone all'interno dell'atomo.



la tabella degli elementi costruita nel rispetto delle regole sui numeri quantici e del principio di esclusione dall'idrogeno sino all'ossigeno



tabola periodica tenendo conto dei numeri quantici.

Dalla tabella possiamo osservare che la dislocazione elettronica è tale per cui alcuni elementi avranno un momento magnetico proprio mentre altri in condizioni normali potranno non averlo a causa dell'annullamento reciproco dei diversi momenti orbitali ed intrinseci.

Queste sostanze daranno luogo al diamagnetismo.

Si tenga inoltre presente che il riempimento non è di tipo progressivo perché, a causa delle piccole differenze di energia connesse ai diversi numeri quantici secondari, quando la situazione si fa complessa incominciano a presentarsi sottolivelli energeticamente più convenienti

che vengono occupati prima che si sia completato il livello precedente

8.2.5 QUANTIZZAZIONE DELLE COMPONENTI DEL MOMENTO MAGNETICO: L'ESPERIMENTO DI STERN & GERLACH

Secondo la fisica classica se gli atomi sono dotati di un momento magnetico proprio ci si aspetta, inviando casualmente atomi attraverso un campo magnetico dotato di elevato gradiente in una determinata direzione, che gli atomi stessi interagiscano in maniera diversa con quel campo magnetico.

Alcuni (che presentano un momento parallelo al campo) saranno attirati dalle zone a maggiore intensità. Altri (che presentano un momento antiparallelo) finiranno alla estremità opposta. Tra i due estremi saranno possibili tutte le condizioni intermedie.

Il tutto sarà governato dal fatto che se indichiamo con F_z la componente della forza lungo l'asse z e con p_z la componente del momento magnetico atomico lungo quell'asse si ha: $F_z \propto p_z$. Si tratta dello stesso fenomeno per cui le particelle di polvere di ferro si orientano lungo le linee di forza andando a disporsi verso le zone di gradiente massimo.

Nel 1921 O. Stern (1888-1969) e W. Gerlach (1889-1979) condussero una serie di esperimenti tesi a misurare il momento magnetico di atomi di elementi chimici diversi. A tale scopo venne fatto passare un fascio di atomi attraverso un campo magnetico con elevato gradiente lungo una direzione e tale gradiente fu ottenuto attraverso una particolare sagomatura delle espansioni polari.



O. Stern & W. Gerlach fornirono la **evidenza sperimentale alla quantizzazione delle direzioni spaziali** e alla necessità di correggere la proporzionalità tra momento angolare e magnetico con la introduzione dello spin

Gli atomi dei metalli da analizzare vengono vaporizzati nel forno ❶ e passano poi attraverso la fenditura ❷ per formare un fascio collimato. In assenza di campo magnetico il fascio colpisce una lastra fotografica nel suo centro. In presenza di un campo magnetico gli atomi che possiedono un momento magnetico proprio vengono deviati verso l'alto o verso il basso a seconda che la componente del momento magnetico sia diretta come l'asse o in verso contrario. Dalla conoscenza del gradiente del vettore induzione e dalla misura della deflessione del fascio è possibile risalire alla proiezione del momento magnetico.

In base alla teoria classica tutte le direzioni del momento magnetico rispetto all'asse- z sono egualmente probabili e pertanto la proiezione del momento magnetico può avere qualsiasi valore compreso tra $-p_m$ e $+p_m$ passando per lo 0 e gli atomi dovrebbero lasciare come segno sulla lastra fotografica una banda, ma il risultato sperimentale è diverso.

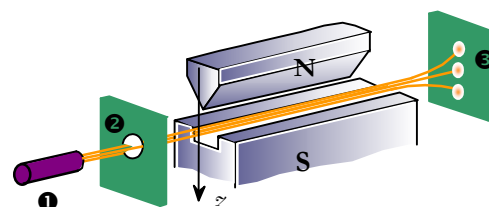
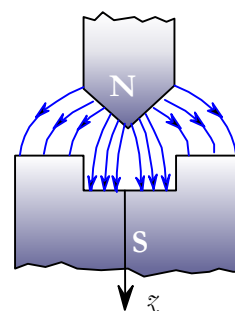
Al posto di una banda continua si osserva una distribuzione a macchie. Pertanto l'ipotesi classica che tutte le orientazioni del momento magnetico siano egualmente possibili è falsa.

Il momento magnetico orbitale di un atomo risulta essere una quantità dotata di componente quantizzata lungo un particolare asse, ma tale asse non è definito; la quantizzazione di p_{mz} si riscontra comunque si orienti l'asse z nello spazio.

Dai risultati sperimentali risulta anche che gli atomi di alcuni elementi, per esempio quelli di mercurio, non vengono deviati da campi magnetici. Ciò significa che non sono dotati di momento magnetico proprio e si tratta proprio dei materiali diamagnetici.

Risultati particolarmente interessanti si ottengono utilizzando i metalli alcalini come litio, sodio e potassio (ma anche alluminio e alcuni altri elementi). In questo caso il fascio atomico si divide in due e la deflessione è la stessa nei due versi opposti. Ciò significa che la proiezione lungo l'asse z del momento magnetico può assumere solo due valori uguali ed opposti. Misurando la deflessione si è trovato inoltre che tale valore corrisponde proprio al valore del magnetone di Bohr:

$$p_{mz} = \pm \mu_B$$



se si inviano atomi in una regione dotata di un gradiente di campo magnetico le posizioni di arrivo indicano che non sono ammesse tutte le orientazioni

8.3 Diamagnetismo e paramagnetismo: interpretazione microscopica

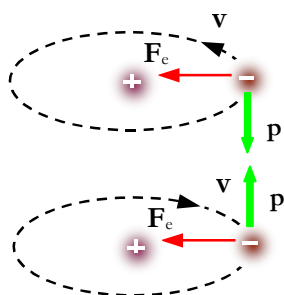
8.3.1 IL FENOMENO E LA SUA SPIEGAZIONE

La materia influisce sui fenomeni magnetici secondo tre modalità: un debolissimo depotenziamento (diamagnetismo) un debole potenziamento (paramagnetismo), un nettissimo potenziamento (ferromagnetismo).

In questo paragrafo esamineremo il più *singolare* dei tre comportamenti cercando di capire come, in determinate circostanze, la presenza della materia possa indebolire il campo magnetico.

La spiegazione sta nella capacità del campo magnetico esterno di influenzare il campo magnetico di origine microscopica presente nella materia a livello elementare.

A seconda della orientazione delle orbite elettroniche rispetto al campo magnetico si possono determinare sia incrementi sia decrementi del momento magnetico orbitale. La applicazione di un campo esterno determina la riduzione del momento magnetico parallelo e l'aumento di quello antiparallelo e nella particolare situazione in cui i momenti magnetici orbitali si fanno equilibrio l'effetto globale è allora la comparsa di un magnetismo nella materia opposto al campo esterno.

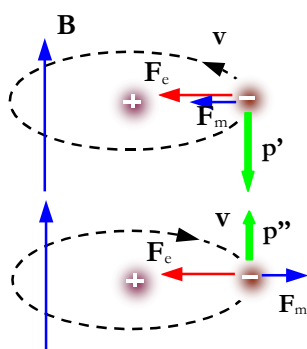


i movimenti orbitali possono determinare momenti magnetici opposti a seconda del verso di rotazione

8.3.2 COME SI ORIGINA, A LIVELLO MICROSCOPICO, IL CAMPO ANTIPARALLELO

Poiché la forza di Lorentz che agisce su una carica in moto circolare ha un verso che dipende dal senso di rotazione della carica stessa il campo magnetico determina nei due casi effetti diversi sul momento angolare della carica.

Supponiamo di guardare l'immagine dall'alto: nel caso di moto antiorario il momento magnetico orbitale è rivolto verso il basso (regola del cavatappi e carica negativa) e nel caso di moto orario il momento magnetico è verso l'alto.



applicando un campo magnetico esterno si modificano i momenti orbitali e si potenzia quello antiparallelo

Supponiamo ora di applicare un campo magnetico esterno perpendicolare al piano dell'orbita e rivolto verso l'alto. Sull'elettrone compare la forza magnetica che, essendo perpendicolare sia alla velocità sia al campo magnetico, risulta diretta come la forza elettrica; ma mentre nel caso di rotazione antioraria essa è orientata verso il protone, nel caso di rotazione oraria essa risulta centrifuga.

La situazione, per effetto della forza di Lorentz si modifica come in figura: le due forze magnetiche hanno verso contrario e determinano conseguentemente una variazione nei moduli delle due velocità che, essendo ora diverse, vengono a corrispondere a momenti angolari diversi e, conseguentemente, a momenti magnetici orbitali diversi.

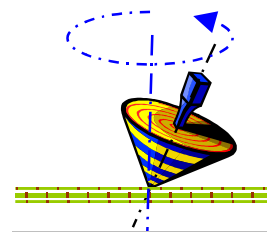
Mentre l'elettrone che ruota in verso orario (e che ha un momento magnetico equiverso al campo esterno) subisce una diminuzione di forza a causa del carattere centrifugo della forza di Lorentz, accade il contrario a quella che ruota in senso antiorario.

Ma la modifica della forza fa variare nello stesso senso le velocità e ciò determina una corrispondente modifica sia del momento angolare sia del momento magnetico (ad esso proporzionale).

Si ottengono così due momenti magnetici orbitali $\mathbf{p}'$ e $\mathbf{p}''$ diversi; quello antiparallelo aumenta e quello parallelo diminuisce.

Poiché in un atomo sono presenti sia elettroni con momento parallelo, sia elettroni con momento antiparallelo la applicazione di una campo magnetico esterno determina complessivamente una diminuzione dei momenti magnetici atomici e quindi un indebolimento del campo magnetico complessivo.

L'ipotesi che abbiamo fatto che i piani orbitali fossero ortogonali al campo magnetico serviva a semplificare i ragionamenti ma non può essere assunta in generale. Quando ciò non si verifica accade un fenomeno più complesso simile alle rotazioni dell'asse della trottola ben noto dalla meccanica e detto di precessione delle orbite. Questo moto di precessione modifica i momenti angolari originari e produce nuovamente l'indebolimento complessivo dei momenti magnetici orbitali.



Quando il campo magnetico non è perpendicolare al piano dell'orbita la forza di Lorentz determina la **precessione** che modifica il momento angolare e il momento magnetico

8.3.3 I RAPPORTI TRA PARAMAGNETISMO E DIAMAGNETISMO

Il meccanismo di magnetizzazione dei materiali diamagnetici consiste nella creazione di un momento magnetico antiparallelo a quello esterno dovuto alla interazione del campo esterno con i movimenti elettronici orbitali. Questo fenomeno avviene in tutti gli atomi anche quando i momenti magnetici delle orbite non si fanno reciprocamente equilibrio in assenza di campo esterno e pertanto tutte le sostanze possiedono proprietà diamagnetiche. Ma allora come si spiega il paramagnetismo, cioè il fenomeno per cui l'induzione magnetica aumenta?

Semplicemente *i materiali paramagnetici sono quelli che possiedono un proprio momento magnetico non bilanciato a causa della mancanza di condizioni di particolare simmetria nella struttura degli orbitali elettronici.*

Quando si applica un campo magnetico esterno a dei materiali paramagnetici il momento magnetico degli atomi tende ad allinearsi con le linee del campo esterno come accadrebbe a tanti aghi magnetici immersi in un campo esterno mentre, ovviamente, il movimento di agitazione termica tende ad opporsi a questo allineamento e punta a ripristinare la condizione di massimo disordine.

Inoltre il fenomeno di orientamento è di almeno due ordini di grandezza superiore alla diminuzione di magnetizzazione dovuta al diamagnetismo. Ciò spiega come mai le sostanze paramagnetiche non presentino anche proprietà diamagnetiche: le proprietà paramagnetiche si sovrappongono, annullandole, alle proprietà diamagnetiche che risultano essere più blande.

Il meccanismo di magnetizzazione dei materiali paramagnetici è abbastanza simile a quello di polarizzazione dei dielettrici dotati di molecole polari. Mediante considerazioni di natura termodinamica si può dimostrare che per i materiali paramagnetici la magnetizzazione è proporzionale al quadrato del momento magnetico atomico ed inversamente proporzionale alla temperatura e tale legge oltre che essere confermata sperimentalmente, è piuttosto evidente almeno dal punto di vista qualitativo: maggiore è la temperatura e maggiore risulta il potere scompaginante del moto disordinato.

Sia il diamagnetismo, sia il paramagnetismo hanno origine microscopica e pertanto entrambi sono proporzionali alla concentrazione atomica.

i materiali paramagnetici sono quelli che possiedono un proprio momento magnetico atomico che si orienta sotto l'azione del campo esterno se però il momento atomico è nullo (**materiali diamagnetici**) prevale l'azione di modifica dei momenti orbitali con potenziamento del momento antiparallelo e conseguente indebolimento di **B**

8.3.4 LA SPIEGAZIONE DI LORENTZ DELL'EFFETTO ZEEMAN

Nei capitoli dedicati alla fisica moderna ritroveremo l'effetto Zeeman perché l'indagine delle righe spettrali ha costituito storicamente un modo per indagare sulla struttura degli atomi. Ecco come nel parla Louis De Broglie, uno dei padri della meccanica quantistica.³



Abbiamo visto in che modo la teoria di Lorentz spiega il fenomeno della rifrazione e della dispersione. Questo però non fu il suo solo successo; altri essa ne ebbe, e, uno dei più notevoli fu quello di aver previsto l'effetto Zeeman. Si abbia una sorgente luminosa monocromatica in un campo magnetico omogeneo. Secondo la teoria di Lorentz, l'emissione della luce è dovuta ai movimenti periodici compiuti da alcuni elettroni racchiusi nella sorgente luminosa ed aventi lo stesso periodo della luce emessa.

In mancanza di campo magnetico questi elettroni hanno un periodo proprio, al quale corrisponde la lunghezza d'onda della luce emessa. Se stabiliamo un campo magnetico uniforme, questo, come sappiamo, eserciterà una forza del genere di quella di Laplace⁽⁴⁾ modificando così il movimento degli elettroni. Il calcolo mostrerà allora che il periodo del movimento degli elettroni può essere modificato d'una quantità dipendente dall'intensità del campo magnetico applicato, dalla carica e dalla massa dell'elettrone ed anche dall'orientamento del moto dell'elettrone rispetto alla direzione del campo magnetico.

Per essere più precisi, a seconda dell'orientamento il periodo può essere modificato d'una certa quantità, in più o in meno. L'irraggiamento emesso dalla sorgente non sarà più monocromatico, ma si comporrà di tre righe: una della stessa lunghezza d'onda della riga primitiva, le altre due d'una lunghezza d'onda leggermente diversa da quella dell'onda primitiva e situate simmetricamente rispetto ad essa. L'unica riga esistente in assenza di campo magnetico è divenuta un *tripletto*, il tripletto di Lorentz che Zeeman ha effettivamente osservato. La sua apparizione costituisce l'*effetto Zeeman normale*.

In realtà l'effetto Zeeman è spesso *anomalo*, cioè molto più complesso di quello previsto da Lorentz. Tuttavia la previsione dell'effetto Zeeman normale costituiva già un bellissimo successo per la teoria degli elettroni, un successo però quantitativo. Difatti, dallo scarto delle componenti del tripletto si può dedurre il valore del rapporto fra la carica e la massa dell'elettrone, valore che è in perfetto accordo con quanto d'altra parte sappiamo dei caratteri del corpuscolo elementare di elettricità negativa. Questo apparve quindi come l'agente essenziale delle emissioni luminose.



³ L. De Broglie: *Onde, corpuscoli e meccanica ondulatoria*

⁴ E' il nome che si dava alla forza magnetica e che oggi porta il nome di forza di Lorentz.

8.4 Il ferromagnetismo

8.4.1 ASPETTI FENOMENICI DEL FERROMAGNETISMO

Nei materiali ferromagnetici le differenze di comportamento rispetto ai materiali para e dia magnetici sono molto rilevanti:

- i fenomeni sono molto più intensi (da 3 a 5 ordini di grandezza rispetto a quelli che si presentano nel vuoto)
- non c'è più proporzionalità tra cause ed effetti: e dunque una corrente doppia, in presenza di ferro non produce in generale un valore doppio di induzione magnetica
- compaiono fenomeni di saturazione, cioè condizioni per le quali aumenti di corrente non determinano corrispondenti variazioni di B .

A differenza di quanto avviene per i materiali paramagnetici e diamagnetici nei materiali ferromagnetici il fenomeno della magnetizzazione è legato all'azione magnetizzante da una funzione non lineare. Il vettore induzione cresce dapprima molto rapidamente al crescere della corrente i e quindi, raggiunta la saturazione, non dipende praticamente più da essa tendendo ad assumere un andamento quasi orizzontale.

Poiché la induzione dei materiali ferromagnetici non è proporzionale alla corrente che la genera non ha senso parlare di permeabilità magnetica relativa di una sostanza ferromagnetica come se si trattasse di una costante tipica del materiale; per i materiali ferromagnetici il suo valore dipende dallo stato di magnetizzazione del materiale medesimo.

Un'altra differenza importante che caratterizza i materiali ferromagnetici è che il fenomeno del ferromagnetismo si osserva solo allo stato cristallino mentre il paramagnetismo e il diamagnetismo si osservano in qualsiasi stato di aggregazione.

Allo stato liquido e gassoso i materiali ferromagnetici possiedono solo proprietà paramagnetiche e dunque il ferromagnetismo non dipende da particolari proprietà degli atomi delle sostanze ferromagnetiche, che non differiscono in nulla da quelli delle sostanze paramagnetiche, ma da particolari caratteristiche del loro reticolo cristallino durante la fase solida. Inoltre le proprietà ferromagnetiche dovrebbero cambiare al mutare della struttura del reticolo cristallino e questa congettura è confermata dalla esperienza.

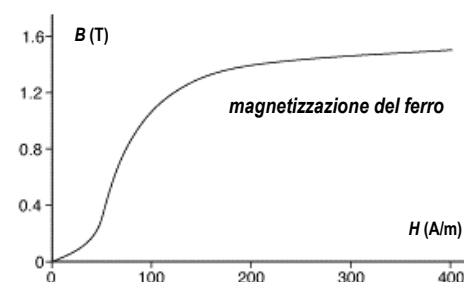
Ogni materiale ferromagnetico possiede una ben definita temperatura, detta *temperatura di Curie*, al di sopra della quale il materiale perde le proprietà ferromagnetiche e la sostanza si comporta paramagneticamente. La temperatura di Curie è di 770 °C per il ferro, di 360 °C per il nichel e di soli 70 °C per il Permalloy (un acciaio composto dal 70 % di ferro e dal 30 % di nichel).

8.4.2 I MATERIALI FERROMAGNETICI HANNO MEMORIA: L'ISTERESI

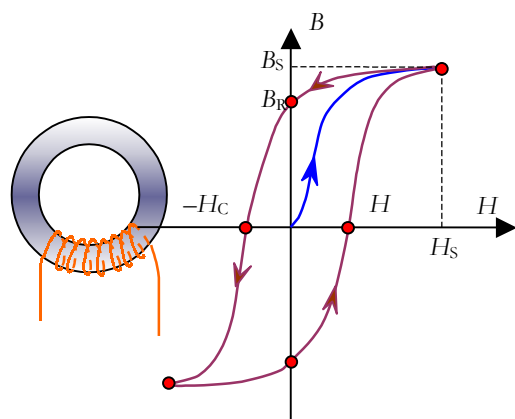
Una proprietà caratteristica dei materiali ferromagnetici è quella della cosiddetta *isteresi magnetica*. In buona sostanza si tratta di ciò: la magnetizzazione di un dato materiale non dipende solo dal valore del campo magnetico H in quell'istante, ma anche dalla stato iniziale di magnetizzazione del materiale. Ovviamente accade altrettanto per quanto riguarda i valori di permeabilità.



un elettromagnete utilizzato come organo di presa per lo spostamento di materiali ferrosi



curva di magnetizzazione di un materiale ferromagnetico; μ ha un valore molto più elevato di μ_0 e inoltre si perde la linearità; si noti la saturazione



ciclo di isteresi di un materiale ferromagnetico con la magnetizzazione residua

Ciò significa che i processi di magnetizzazione dei materiali ferromagnetici sono processi con *memoria*. Il ferro si ricorda la sua storia magnetica precedente.

Se si avvolge un solenoide intorno ad un blocco toroidale di materiale ferromagnetico e si traccia il diagramma $B = f(H)$ partendo da un materiale precedentemente smagnetizzato (per esempio riscaldandolo) si ottiene una curva come quella qui a lato.

Variando la corrente nell'avvolgimento, cambia di conseguenza il valore del campo magnetizzante H . Supponiamo di aumentare tale valore sino ad H_S che corrisponde alla magnetizzazione di saturazione B_S e, successivamente diminuiamo la corrente, e di conseguenza il campo. Osserveremo che la induzione è del tutto diversa e maggiore di quella che si aveva durante la fase di prima magnetizzazione. Quando la corrente arriva a zero, si annulla anche il campo magnetizzante, ma non sparisce la induzione e il nucleo conserva una *magnetizzazione residua* B_R . Solo se inverte il verso della corrente e si raggiunge un valore del campo $-H_C$ la magnetizzazione sparisce; tale valore del campo è chiamato *forza coercitiva* mentre il diagramma è detto *ciclo di isteresi*.

8.4.3 DIVERSI TIPI DI CICLI DI ISTERESI

I materiali ferromagnetici possiedono proprietà diverse a seconda della composizione chimica e a seconda del trattamento termico e di lavorazione che subiscono (indurimento, tempera, trafilatura, pressatura, etc.). Le sostanze con bassa forza coercitiva sono chiamati materiali magnetici *soft* mentre quelli di alta forza coercitiva materiali magnetici *hard*.

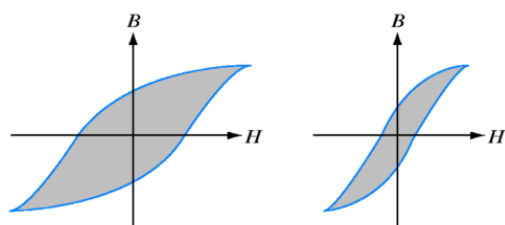
In base alla forma del ciclo di isteresi si determina il campo di applicazione del materiale ferromagnetico. I materiali ferromagnetici *soft* sono utilizzati per costruire i nuclei degli elettromagneti in cui è importante avere un elevato valore massimo di B e un basso valore di *forza coercitiva*. Vengono utilizzati anche per i nuclei dei trasformatori e delle macchine a corrente alternata (generatori e motori) in cui si frutta il basso valore di forza coercitiva per agevolare la inversione del campo. Gli stessi requisiti si richiedono per i nuclei degli acceleratori di particelle.

I materiali magnetici *hard* sono usati per la realizzazione di magneti permanenti perché sfruttando gli elevati valori di magnetizzazione residua e di forza coercitiva consentono di mantenere forti magnetizzazioni per lunghi periodi di tempo.

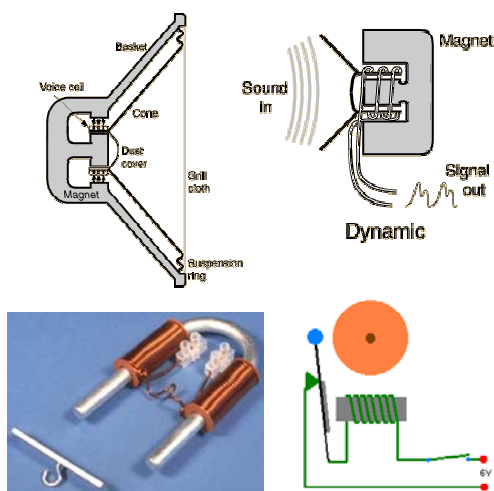
I magneti permanenti con acciai ad elevata forza coercitiva sono utilizzati per la costruzione degli strumenti di misura a bobina mobile, per microfoni ed altoparlanti di tipo elettrodinamico, nei piccoli generatori (come per esempio in quelli da bicicletta) e per la realizzazione di piccoli motori elettrici.

Nel secondo dopoguerra, soprattutto a partire dagli anni 60 lo studio delle proprietà magnetiche del ferro e dei materiali ferromagnetici ha subito un nuovo impulso dapprima legato alla realizzazione di memorie per i primi calcolatori e successivamente alla realizzazione dei film di materiale magnetico che stanno alla base della produzione di video cassette e *hard disk* per computer.

Si tenga presente che nel processo di percorrenza del ciclo di isteresi si ha sempre una dissipazione di energia e che tale energia è proporzionale, in prima approssimazione, all'area del ciclo stesso. Pertanto, nelle mac-



a sinistra un materiale *hard* usato per magneti permanenti e memorie e a destra un materiale *soft* usato per macchine elettriche che lavorino in corrente alternata



Applicazioni tecnologiche dei materiali ferromagnetici: altoparlante, microfono a bobina mobile, elettromagnete e sua applicazione ad un campanello

chine che operano in corrente alternata e che percorrono, di conseguenza, 50 cicli di isteresi al secondo, si fa in modo di utilizzare materiali con curve di isteresi strette per minimizzare le cosiddette *perdite nel ferro*.

8.4.4 SPIEGAZIONE DEL FERROMAGNETISMO: I DOMINII DI WEISS

Il comportamento dei materiali magnetici viene spiegato dalla teoria classica del ferromagnetismo avanzata da P. Weiss (1865-1940). In base a questa teoria, a temperature inferiori alla temperatura di Curie, le sostanze ferromagnetiche sarebbero caratterizzate dalla presenza di regioni microscopiche dette *dominii*. In ciascun dominio gli atomi presentano i momenti magnetici allineati lungo un particolare asse del microcristallo detto *asse di facile magnetizzazione* e pertanto il dominio si trova già in condizioni di saturazione indipendentemente dalla presenza di un campo magnetico esterno e dalla sua intensità.

Un dominio ha dimensioni variabili tra 10^{-4} e 10^{-5} m e dunque, viste le dimensioni atomiche, si può affermare che per ogni lato di un dominio siano disposti circa centomila atomi tutti con il momento magnetico orientato lungo una stessa direzione.

Per osservarli è sufficiente cospargere il materiale con una goccia d'olio contenente in sospensione polveri di materiale ferromagnetico. Le particelle si concentrano in corrispondenza dei confini dei domini perché lì il campo risulta essere particolarmente intenso a causa della discontinuità che determina una sorta di doppia polarità sui due lati.

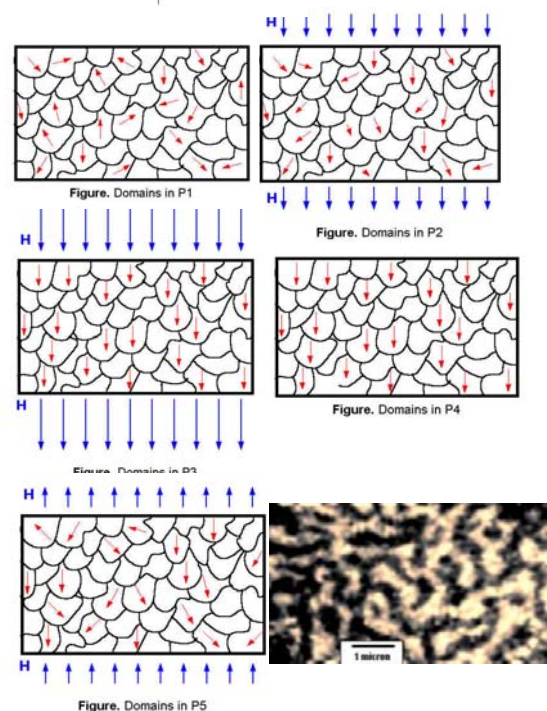
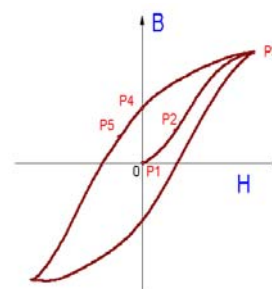
In assenza di un campo magnetico esterno i domini di un monocristallo sono disposti in maniera di annullare reciprocamente la magnetizzazione come in figura. In essa le frecce indicano la magnetizzazione all'interno dei diversi domini.

L. D. Landau e E. M. Lifshitz hanno evidenziato che tale configurazione di domini di un monocristallo corrisponde ad un minimo di energia del campo magnetico e ciò, dal punto di vista della termodinamica, assicura una configurazione di equilibrio stabile per il sistema.

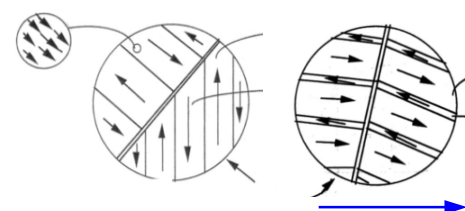
Sulla base di questa congettura è possibile spiegare il meccanismo di magnetizzazione di un campione policristallino. Un policristallo consiste infatti di granuli aventi direzioni di facile magnetizzazione orientate in maniera casuale e ciascuno di questi granuli è formato da diversi domini orientati lungo le direzioni di facile magnetizzazione.

Se sottoponiamo il nostro campione ad un campo magnetico di debole intensità esisteranno sempre molti domini orientati come il campo magnetico esterno. Questi domini possiedono energia potenziale minima e dunque si trovano in condizioni di equilibrio stabile.

Adiacenti ad essi si troveranno dei domini di energia potenziale massima e pertanto alcuni degli atomi che li compongono saranno agevolati ad invertire l'orientamento dei loro momenti magnetici e ad unirsi a quelli dotati di energia potenziale minima. Questo fenomeno è detto *spostamento delle pareti dei domini* ed è tipico dei processi di magnetizzazione temporanea dei materiali ferrosi. In presenza del campo esterno i domini più favorevoli si espandono a danno dei meno favorevoli ma, al cessare del campo esterno la situazione si ripristina. Capita così quando una calamita appare in grado di sollevare una successione di chiodi.



Comportamento dei domini di Weiss nelle diverse fasi del processo di magnetizzazione; al termine fotografia dei domini eseguita al microscopio a scansione



lo spostamento della parete dei domini in presenza di un campo esterno con l'allargamento dei domini paralleli e la riduzione di quelli antiparalleli

Al crescere del campo magnetico esterno i confini dei domini si spostano sempre più e le pareti incominciano a venire a contatto con le imperfezioni nella struttura cristallina quali dislocazioni della struttura o presenza di atomi interstiziali. Questi difetti ostacolano i cambiamenti di direzione dei momenti magnetici degli atomi collocati nelle loro vicinanze perché impediscono la ulteriore traslazione delle pareti.

Se il campo magnetico esterno continua ad aumentare, aumenta anche la energia potenziale degli atomi (in realtà dei momenti magnetici di dipolo) nelle vicinanze dei difetti fino a superare il valore di energia di attivazione. A questo punto, improvvisamente i momenti magnetici cambiano di verso o, in altre parole, le pareti del dominio si espandono di colpo sino al difetto successivo. Dunque la magnetizzazione di un policristallo non avviene gradualmente, ma a salti e questo fenomeno è detto *effetto Barkhausen*.

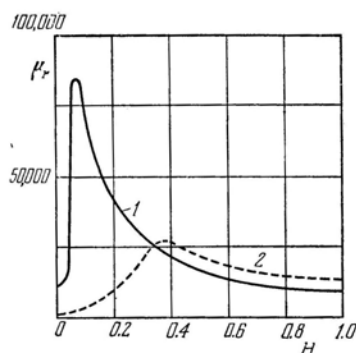
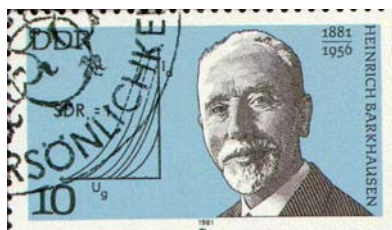
Il fatto che in un materiale ferromagnetico policristallino la magnetizzazione avvenga a salti fa sì che si determini una perdita di energia di tipo irreversibile (le dislocazioni e la presenza dei difetti determinano la comparsa di onde elastiche che si trasformano in energia interna). Dunque la magnetizzazione dovuta a campi intensi è un processo irreversibile. Quando il campo magnetico esterno viene a cessare non si ripristina la situazione originaria e i domini smagnetizzati presentano forme e dimensioni diverse rispetto a quelle originali; tutto ciò consente di spiegare la isteresi magnetica e le *perdite nel ferro*.

Se il campo esterno è sufficientemente intenso le pareti dei domini traslano sino ai confini delle strutture granulari del policristallo e ogni granulo risulta magnetizzato lungo la direzione di facile magnetizzazione che presenti il minimo angolo con la direzione del campo magnetico esterno. A questo punto, al crescere del campo esterno i momenti magnetici dei granuli incominciano ad allinearsi al campo esterno, ma questo processo richiede campi magnetici molto intensi e, di conseguenza, in questa regione la magnetizzazione cambia molto lentamente e la pendenza della curva di magnetizzazione diminuisce.

Infine, quando tutti i momenti magnetici dei granuli si sono allineati con il campo esterno si verifica la saturazione e la magnetizzazione non aumenta più.

Dunque tutte le caratteristiche dei processi di magnetizzazione dei materiali ferromagnetici possono essere spiegate attraverso la teoria dei domini e la temperatura di Curie è quella in corrispondenza della quale la struttura dei domini si rompe.

Sapendo che il momento magnetico massimo di un atomo di ferro è pari a circa 2.2. volte il magnetone di Bohr dimostrare che la massima magnetizzazione che il ferro può determinare è pari a 2.18 T.



Permeabilità magnetica relativa per il permalloy (1) e per il ferro (2) al variare di H . Si notino i valori elevati e la diminuzione che si ha una volta raggiunta la saturazione

8.5 Applicazione delle leggi sul magnetismo nella materia

Il valore massimo di induzione nel ferro

Determinare il valore massimo di induzione magnetica che si può realizzare idealmente nel ferro sapendo che il momento magnetico di un atomo di ferro è pari a 2.2 volte il magnetone di Bohr. Il reticolo cristallino del ferro così come quello di molti metalli è di tipo cubico a facce centrate.



La densità del ferro δ e il numero di massa A ci consentono di determinare la concentrazione atomica:

$$\frac{N}{V} = \frac{n \mathcal{N}}{V} = \frac{m 10^3 \mathcal{N}}{AV} = \frac{\delta 10^3 \mathcal{N}}{A} = \frac{7.87 \cdot 10^6 \cdot 6.02 \cdot 10^{23}}{55.85} = 8.49 \cdot 10^{28} \text{ atomi/m}^3$$

La dimensione a disposizione dell'atomo di ferro è dunque pari alla radice cubica dell'inverso della concentrazione:

$$d = \frac{1}{\sqrt[3]{8.49 \cdot 10^{28}}} = 2.28 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Possiamo ora calcolare la corrente equivalente a produrre il momento magnetico atomico $p_a = 2.2 \mu_B = 2.2 \cdot 9.274 \cdot 10^{-24} = 2.04 \cdot 10^{-23} \text{ A m}^2$

$p_a = i_e d^2$ e pertanto:

$$i_e = \frac{p_a}{d^2} = 3.92 \cdot 10^{-4} \text{ A}$$

A questa corrente equivalente corrisponde un valore di campo magnetico equivalente:

$$H_{eq} = \frac{i_{eq}}{d} = 1.72 \cdot 10^6 \text{ A/m}$$

e un valore equivalente di induzione:

$$B_{eq} = \mu_0 H_{eq} = 1.72 \cdot 10^6 \cdot 12.56 \cdot 10^{-7} = 2.16 \text{ T}$$



Leggere le curve di magnetizzazione

Data la curva di magnetizzazione del ferro qui a lato determinare il valore massimo di permeabilità magnetica assoluta, relativa ed i valori di B e di H a cui si realizzano. Determinare in fine le caratteristiche che deve avere un solenoide avvolto su un nucleo toroidale di ferro per produrre una induzione magnetica $B = 1.2 \text{ T}$ quando viene percorso da una corrente di 2.00 A .



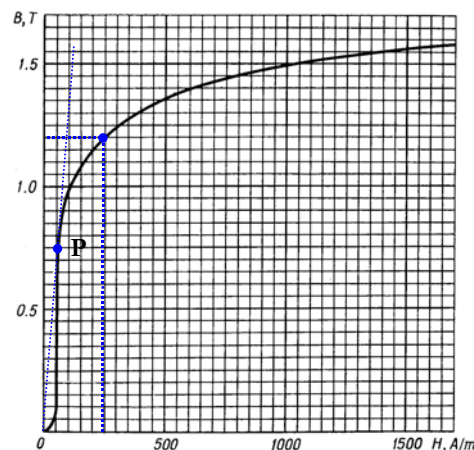
La permeabilità massima corrisponde alla massima inclinazione della retta secante tracciata per l'origine e ciò si verifica in corrispondenza della retta tangente.

Dal diagramma si determina il punto P cui corrispondono i valori:

$$B_P = 0.75 \text{ T e } H_P = 50 \text{ A/m}$$

$$\text{Dunque } \mu = \frac{B_P}{H_P} = 0.015 \text{ T m / A}$$

Il valore corrispondente di μ_r risulta



$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{0.015}{12.56 \cdot 10^{-7}} = 12 \cdot 10^3$$

Al valore di induzione di 1.2 T corrisponde un campo di 250 A/m
e pertanto se teniamo presente che in un nucleo toroidale ci si trova nelle condizioni del solenoide a spire infinitamente ravvicinate:

$$B = \mu n i = \mu_0 \mu_r n i = \mu_0 \mu_r H$$

si ha:

$$n = \frac{H}{i} = 125 \text{ spire/metro}$$



