

Dal Quark al Quasar

Pensieri di Fisica, sulla Natura e sull'Universo

Metrologia del campo magnetico statico

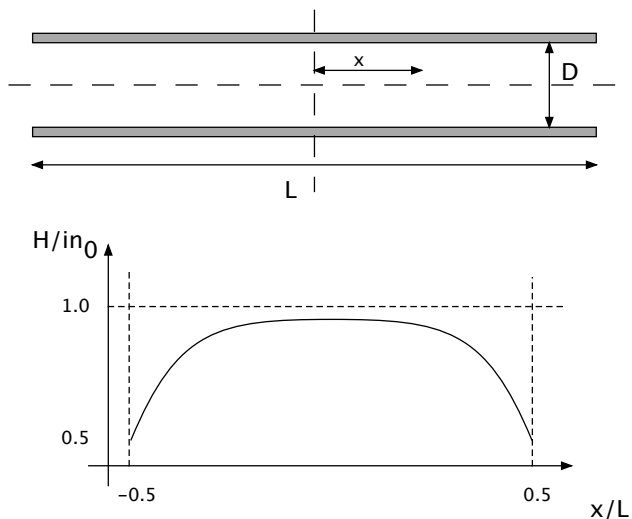
Domenica 18 giugno 2006

Lo studio delle proprietà magnetiche della materia, sia esso di interesse per la ricerca di base, sia esso funzionale alla ricerca applicata, richiede in linea di principio sempre la misura di almeno due grandezze fisiche: il campo magnetico in cui è immerso il materiale oggetto di studio, e la sua magnetizzazione. Queste due necessità si riflettono, rispettivamente, nella metrologia dell'induzione magnetica, e nella metrologia del flusso magnetico. Esse sono due discipline che hanno naturalmente molti punti di contatto, ma si pongono obiettivi diversi e devono affrontare problematiche differenti. Analizzeremo qui nel seguito gli aspetti salienti riguardanti la metrologia dell'induzione magnetica, volta alla misura del campo magnetico statico.

1. Generazione del campo magnetico statico

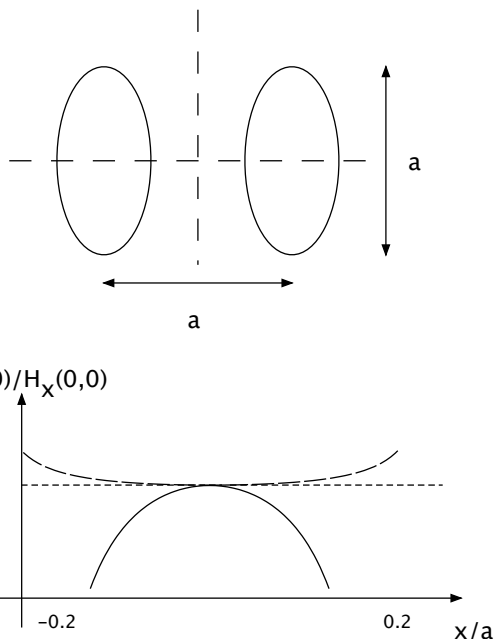
La generazione di un campo magnetico statico può avvenire tramite molteplici tecniche, che sfruttano la legge di Laplace (un conduttore percorso da corrente genera nello spazio circostante un campo magnetico \mathbf{H}) oppure le proprietà magnetiche di un opportuno materiale. Così, nei laboratori e nei dispositivi, si trovano solenoidi e bobine di varia foggia, ma anche magneti permanenti, elettromagneti e gioghi magnetici, o spire, solenoidi e avvolgimenti di materiale superconduttore. Elenchiamone brevemente le caratteristiche salienti:

- **solenoidi:** realizzati avvolgendo un filo conduttore su un supporto rigido cilindrico, i solenoidi sono in grado di generare campi magnetici dell'ordine di $\approx 10^3 - 10^4$ A/m; il solenoide ideale, di lunghezza infinita, garantisce una perfetta uniformità del campo magnetico al suo interno, su tutto il volume; il solenoide reale, invece, presenta disomogeneità del campo magnetico tanto maggiori quanto minore è il rapporto tra la sua lunghezza e il suo diametro; la disomogeneità del campo magnetico aumenta se l'avvolgimento di filo elettrico è realizzato su più strati. Se è realizzato in materiale superconduttore, il solenoide può generare campi magnetici dell'ordine di $10^6 - 10^7$ A/m ma necessita naturalmente di essere mantenuto a temperature criogeniche. Gli effetti indesiderati dovuti alla lunghezza finita del solenoide possono essere parzialmente compensati aumentando il numero di spire per unità di lunghezza verso le estremità del solenoide, oppure suddividendo l'avvolgimento in porzioni distinte che possono essere alimentate con correnti di diversa intensità. La figura mostra schematicamente un solenoide sottile (a strato singolo) di lunghezza L e diametro D e avente il rapporto delle spire per lunghezza pari a n_0 . L'uniformità del campo magnetico generato è migliore del 5% nella metà centrale del solenoide, mentre il campo alle estremità grosso modo si dimezza rispetto al valore calcolato per un solenoide ideale di lunghezza infinita.



- **bobine di Helmholtz:** si tratta di due avvolgimenti di una o più spire di materiale conduttore, collegati in serie, aventi un diametro pari alla distanza dei centri delle loro spire; questa particolare configurazione consente la generazione di campi magnetici dell'ordine di 10^3 A/m discretamente omogenei su

un volume facilmente accessibile e relativamente grande. L'omogeneità del campo magnetico generato può essere incrementata aggiungendo alle bobine di Helmholtz un'altra coppia di bobine di diametro minore, in asse con le precedenti, poste a distanza maggiore ed opportunamente dimensionate. La figura mostra schematicamente delle bobine di Helmholtz con un grafico qualitativo dell'andamento del campo magnetico da esse generato sul loro asse. L'omogeneità è migliore dello 0.1% nella metà centrale (curva continua), ma può essere sensibilmente migliorata (curva tratteggiata) aggiungendo due ulteriori bobine esterne coassiali (non mostrate in figura).



- *magneti permanenti*: si tratta di oggetti materiali dotati di una magnetizzazione residua non nulla; il loro vantaggio è quello di poter fornire un campo magnetico, usualmente dell'ordine di $10^4 - 10^5$ A/m, senza necessità di far passare corrente all'interno di un conduttore. Gli svantaggi stanno naturalmente nel fatto che il campo che essi generano non può essere fatto variare, se non a mezzo di complicate realizzazioni meccaniche (cilindri di Halbach), e che si tratta di oggetti massivi le cui prestazioni possono inoltre essere fortemente dipendenti dalla temperatura.
- *elettromagneti e gioghi magnetici*: realizzati con un nucleo di materiale ferromagnetico (usualmente ferro dolce o leghe di FeCo) opportunamente avvolto da spire di materiale conduttore, sono in grado di generare campi fino a 10^6 A/m richiedendo una potenza di alimentazione relativamente modesta; gli ingombri e il peso sono naturalmente i loro principali svantaggi. Se le espansioni polari dell'elettromagnete sono sufficientemente grandi e vicine, il campo generato è piuttosto uniforme; lo si può rendere più intenso rastremando le espansioni polari, ma a discapito dell'uniformità del campo.

Ognuno dei dispositivi appena elencati per la generazione di campi magnetici statici è modellizzabile in maniera relativamente semplice da consentire di *calcolarne* le proprietà, ovvero il campo magnetico generato e la sua uniformità, a patto che la realizzazione del dispositivo non lo discosti troppo dall'idealità. Le condizioni critiche riguardano in genere il filo conduttore, che idealmente dovrebbe avere sezione nulla, i vincoli geometrici (sezioni perfettamente circolari o rettangolari di solenoidi e bobine, rapporto lunghezza/diametro quanto più grande possibile per i solenoidi), la risposta lineare della curva di magnetizzazione col campo in un elettromagnete, il rapporto diametro/distanza (che deve essere il più grande possibile) dei poli liberi di un elettromagnete, ecc. Anche quando si pone grande cura nella realizzazione di questi dispositivi, il campo magnetico da essi generato e la sua uniformità possono essere calcolati generalmente con precisione insufficiente per applicazioni di metrologia fondamentale, salvo particolari realizzazioni finalizzate proprio ad avere un campione materiale *calcolabile* di campo o induzione magnetica. In tutti gli altri casi è necessario procedere alla *misura* del campo magnetico generato da tali dispositivi.

II. Misura del campo magnetico statico

Esiste una gran varietà di dispositivi impiegabili per la misurazione di un campo magnetico statico. Senza pretesa di completezza, elenchiamo nel seguito i dispositivi più comunemente utilizzati:

- *flussometri*: si tratta di avvolgimenti di filo conduttore molto sottile realizzati su un supporto rigido e caratterizzati dall'aver uno spessore il più ridotto possibile; sfruttando la legge di Faraday-Neuman-Lenz ai capi del filamento conduttore viene indotta una forza elettromotrice pari alla derivata temporale, cambiata di segno, del flusso del campo magnetico concatenato con l'avvolgimento. Tale variazione di flusso nel tempo può essere realizzata facendo variare il campo magnetico nel tempo (ad esempio invertendolo periodicamente di segno), oppure allontanando il flussometro dalla regione in cui si trova il campo magnetico e portandolo là dove, idealmente, il campo magnetico da misurare è nullo, oppure

ruotando attorno al suo asse il flussometro stesso. Tipicamente i flussometri sono in grado di misurare induzioni magnetiche fino a 1 nT (limite inferiore), corrispondenti (in aria) a campi di 10^{-3} A/m.

- *fluxgate*: simili ai flussometri, i fluxgate sono in grado di misurare campi magnetici più deboli grazie all'effetto di amplificazione offerto dalla presenza, all'interno delle spire di filo conduttore, di un materiale magnetico dolce dotato di elevata permeabilità magnetica, che funge da concentratore di flusso; come nel caso dei flussometri, è necessario generare una variazione nel tempo del flusso concatenato col fluxgate in modo da avere una forza elettromotrice indotta ai capi dell'avvolgimento di filo conduttore. Un sensore fluxgate può guadagnare un ordine di grandezza rispetto ai flussometri per quanto riguarda il limite inferiore di campo misurabile, ma è fortemente limitato superiormente dal campo a cui il materiale magnetico impiegato raggiunge la saturazione.
- *sonde ad effetto Hall*: realizzate in materiale semiconduttore opportunamente drogato, e sotto forma di film sottili, tali sonde sfruttano l'effetto Hall ordinario, ovvero la tensione trasversale che si manifesta in un materiale percorso da una corrente elettrica quando esso sia immerso in un campo magnetico ad essa perpendicolare. Particolarmente adatte alla misurazione di campi magnetici intensi (fino a 10^6 A/m), e limitate inferiormente a campi dell'ordine di 10 A/m, le sonde ad effetto Hall sono sensibili direttamente ai campi magnetici statici, a differenza di flussometri e fluxgate.
- *sonde magnetoresistive o a magnetoimpedenza*: realizzate con materiali magnetici conduttori opportuni, queste sonde sfruttano la proprietà di alcuni materiali magnetici di variare significativamente la loro resistenza o la loro impedenza elettrica al variare del campo magnetico in cui sono immersi. Possono guadagnare uno o due ordini di grandezza rispetto alle sonde ad effetto Hall per quanto riguarda il limite inferiore di campo misurabile, e possono misurare campi intensi anche di 10^7 A/m, ma in genere l'intera finestra di valori misurabili di campo magnetico non può essere coperta con un solo sensore di questo tipo.
- *SQUID*: dispositivi quantistici realizzati mediante giunzioni Josephson e necessitanti di temperature criogeniche per lavorare, gli SQUID consentono la misura di campi magnetici estremamente deboli (10 pT, ovvero, in aria, 10^{-5} A/m) grazie alle proprietà quantistiche delle giunzioni Josephson stesse, ma sono fortemente limitati in alto (10^3 A/m).

Qualunque sia il dispositivo impiegato per la misura del campo magnetico, esso necessita innanzitutto di un'opportuna taratura; infatti, la risposta di ogni tipologia di sensore dipende da caratteristiche difficilmente calcolabili e difficilmente riproducibili da un esemplare all'altro: ad esempio flussometri e fluxgate dipendono sensibilmente dalla sezione efficace degli avvolgimenti di filo conduttore, mentre fluxgate, sonde ad effetto Hall, sonde magnetoresistive o a magnetoimpedenza e SQUID dipendono sensibilmente dalle proprietà del materiale (magnetico o semiconduttore) con cui sono realizzati. La conoscenza preliminare di queste proprietà, sensore per sensore, è indispensabile qualora si voglia *tentare* di calcolare la risposta del sensore al campo magnetico applicato; oppure, mancando (come in genere manca) una conoscenza sufficientemente affidabile su tali proprietà, il sensore va tarato per confronto con un riferimento di campo magnetico.

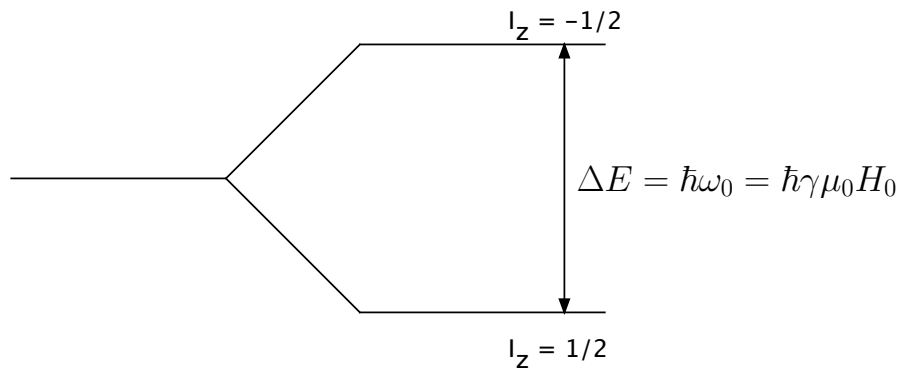
Il problema della metrologia primaria del campo magnetico, e della sua riferibilità alle grandezze fondamentali del Sistema Internazionale delle Unità di Misura, risulta allora correttamente inquadrato:

1. i dispositivi per la generazione di campi magnetici raramente sono calcolabili con precisione sufficiente per poterli impiegare come riferimenti di campo magnetico;
2. i dispositivi per la misurazione di campi magnetici non sono praticamente mai calcolabili con precisione sufficiente per poterli impiegare senza una taratura per confronto con uno standard di campo magnetico o con un dispositivo tarato su di questo.

III. Tracciabilità del campo magnetico al secondo

I nuclei atomici dotati di un numero dispari di nucleoni presentano un momento angolare intrinseco, identificato dal numero quantico I , diverso da zero. Esso è dovuto alla combinazione del momento di spin dei protoni e dei neutroni di cui è costituito, e varia naturalmente da specie atomica a specie atomica. Limitiamoci per semplicità al caso del protone, ovvero del nucleo dell'atomo di idrogeno. Esso presenta una terza componente del momento angolare intrinseco I_z pari a $\pm 1/2$, e di conseguenza il numero

quantico l varrà $\sqrt{3}/2$. Poiché $l > |l_z|$, l'applicazione di un campo magnetico \mathbf{H}_0 lungo la direzione che identificheremo come l'asse z non porterà all'allineamento del momento magnetico nucleare lungo tale direzione, ma genererà piuttosto una sua precessione attorno ad essa (precessione di Larmor). L'applicazione del campo magnetico, inoltre, romperà la degenerazione dei livelli energetici nucleari sul numero quantico l_z , determinando una differenza ΔE tra l'energia del livello con numero quantico l_z pari a $+1/2$ e $-1/2$. ΔE , pari ad $\hbar\omega_0$, corrisponde esattamente alla frequenza di precessione di Larmor, ed è tanto più grande quanto più è intenso il campo magnetico applicato.



Se la separazione dei livelli energetici possiamo immaginarla come istantanea quando applichiamo il campo magnetico, così non sarà per la redistribuzione dei momenti magnetici nucleari (inizialmente equamente distribuiti sui due livelli energetici aventi l_z pari a $\pm 1/2$), che solo dopo un tempo caratteristico t_1 (fortemente dipendente dal materiale scelto, e pari ad alcuni secondi ad esempio per i nuclei di idrogeno delle molecole di acqua pura) si distribuiranno preferenzialmente sul livello energetico più basso secondo la statistica di Boltzmann (valida all'equilibrio):

$$e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}}$$

dove k_B è la costante di Boltzmann e T è la temperatura assoluta a cui si trovano i nuclei. L'equilibrio sarà mantenuto dinamicamente da nuclei che transiranno dal livello ad energia maggiore a quello ad energia minore, rilasciando energia all'ambiente, e nuclei che per effetto del trasferimento di energia (termica) dall'ambiente al sistema transiranno nel verso opposto. In condizioni stazionarie l'ampiezza di probabilità delle due transizioni è identica e il campo magnetico applicato mantiene un differente livello di occupazione sui due livelli.

Immaginiamo ora di applicare un campo magnetico \mathbf{H}_1 di intensità molto minore di \mathbf{H}_0 (così da non perturbarlo significativamente), diretto ortogonalmente a quest'ultimo, ed oscillante nel tempo con pulsazione ω_1 . L'effetto di questo campo sarà praticamente trascurabile a tutte le frequenze, tranne per $\omega_1 = \omega_0$, in corrispondenza della quale un fenomeno di risonanza, detto di Risonanza Magnetica Nucleare (NMR), si manifesta sotto forma di un picco di assorbimento di energia: a questa frequenza, corrispondente alla frequenza di precessione di Larmor del momento angolare intrinseco dei nuclei (protoni), infatti, si ha la transizione stimolata di nuclei da un livello ad un altro, in misura proporzionale al numero di occupazione dei livelli; poiché il livello inferiore è tanto più occupato quanto più è intenso il campo \mathbf{H}_0 , l'applicazione del campo \mathbf{H}_1 con una pulsazione pari a ω_0 risulterà in un assorbimento di energia che modificherà lo stato di equilibrio precedentemente raggiunto dal sistema. In una descrizione semiclassica, il fenomeno della NMR è equivalente alla precessione sostenuta e coerente del momento angolare intrinseco dei nuclei attorno alla direzione del campo \mathbf{H}_0 , in opposizione ai fenomeni (essenzialmente di natura termica) che porterebbero nel tempo alla perdita di coerenza di tali movimenti di precessione in un tempo caratteristico t_2 (usualmente minore di t_1).

La maggiore o minore probabilità di occupazione dei due livelli energetici, o se si preferisce semiclassicamente la maggiore o minore tendenza dei momenti angolari intrinseci nucleari ad allinearsi col campo \mathbf{H}_0 , determina la risposta paramagnetica del materiale, caratterizzabile da una *permeabilità magnetica* μ (costante per i valori di campo magnetico raggiungibili in laboratorio) che è il coefficiente (dimensionato) di proporzionalità tra il campo applicato e l'induzione magnetica del materiale (ad esempio acqua pura). Al variare della frequenza del campo \mathbf{H}_1 , μ , che è una grandezza complessa, vedrà la sua parte reale an-

nullarsi per $\omega = \omega_0$, e la sua parte immaginaria raggiungere un valore massimo alla stessa pulsazione. La potenza assorbita dal sistema sarà proporzionale a

$$P \propto \Im \mu \omega_0 H_1^2$$

mentre l'energia assorbita dal sistema, per unità di volume, sarà data da

$$E_V = \frac{2\pi P}{\omega_0}$$

e sarà massima per $\omega = \omega_0$.

Nelle condizioni di risonanza, i protoni transiscono tra due livelli spazati di

$$\Delta E = \hbar \gamma \mu_0 H_0 = \hbar \gamma B_0$$

dove γ è il fattore giromagnetico del protone (o del nucleo il cui momento magnetico intrinseco risuona).

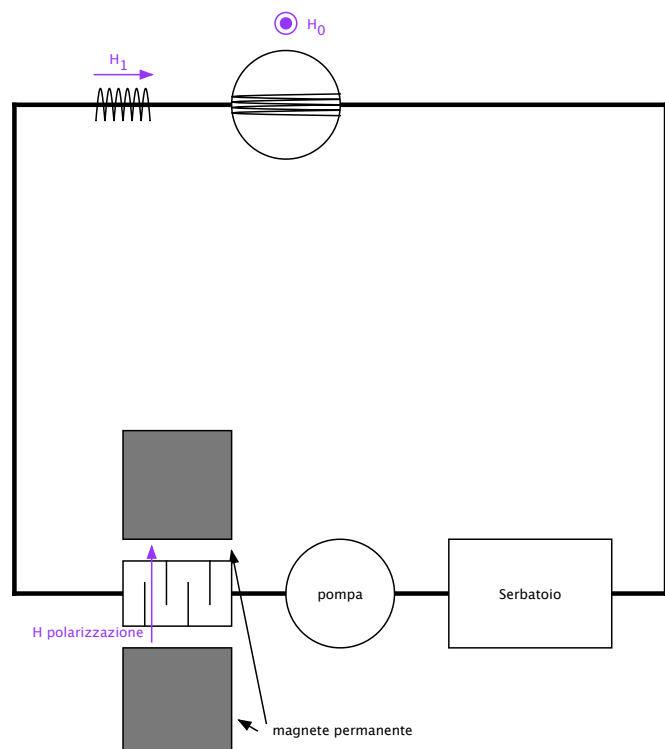
Ecco allora che:

1. mantenendo fisso H_0 e variando la frequenza di H_1 , oppure mantenendo fissa la frequenza di H_1 e variando l'intensità di H_0 , si determina la frequenza a cui si manifesta il fenomeno di risonanza (massimo assorbimento di energia). È fondamentale che il materiale usato per l'effetto di risonanza si trovi in una regione il più omogenea possibile di campo per rendere quanto più stretto possibile, in frequenza, il picco di risonanza. Il materiale da far risuonare viene scelto sulla base del suo fattore γ in modo che, per i campi magnetici applicati, la frequenza di risonanza sia attorno a $10^6 - 10^8$ Hz.
2. poiché $\Delta E = \hbar \gamma \mu_0 H_0 = \hbar \gamma B_0$ ma è anche $\Delta E = \hbar \omega_0$ si ricava facilmente l'induzione $B_0 = \frac{\omega_0}{\gamma}$.
3. l'induzione magnetica B è allora direttamente riferita alla misura di una frequenza, operazione che può essere effettuata con grande accuratezza e precisione, una volta conosciuto il fattore giromagnetico dei nuclei usati nell'esperimento di risonanza magnetica nucleare.

IV. Magnetometro NMR ad acqua corrente

Esistono molti tipi di magnetometri che realizzano l'esperimento della risonanza magnetica nucleare. A titolo di esempio, mostriamo brevemente il funzionamento schematico di un magnetometro NMR ad acqua corrente.

Un serbatoio contenente acqua distillata è collegato ad una pompa che mette in circolazione l'acqua, con velocità opportuna, in un circuito chiuso. L'acqua passa inizialmente attraverso il giogo formato da un magnete permanente che fornisce un campo polarizzante per il momento angolare intrinseco dei protoni che costituiscono i nuclei delle molecole d'acqua (l'ossigeno ha un numero pari di nucleoni e ha pertanto un momento magnetico nucleare pari a zero). L'intensità del campo magnetico generato da questo magnete permanente non è importante, purché sia sufficiente a polarizzare i protoni (campi dell'ordine dei 10^5 A/m sono suffi-



cienti) e sia applicato per un tempo sufficientemente lungo ($> t_1$). L'acqua scorre poi lungo la conduttura fino ad arrivare alla sommità della sonda, nella regione in cui è applicato il campo magnetico da misurare. Durante questo percorso, che avviene in tempi sufficientemente brevi, solo una piccola frazione di protoni perde la polarizzazione che era stata inizialmente conferita. Nella regione dove si trova il campo magnetico incognito H_0 un campo alternato in direzione ortogonale ad esso viene applicato tramite delle bobine alimentate da una corrente alternata. Un analizzatore, che consiste di un'altra bobina il cui asse è posto lungo la direzione ortogonale tanto al campo incognito quanto al campo alternato, rileva la forza elettromotrice indotta dal periodico oscillare del momento magnetico nucleare tra i due livelli energetici permessi. Le condizioni di risonanza si raggiungono facendo variare la frequenza del campo alternato e osservando su un oscilloscopio il segnale prelevato dalla bobina analizzatrice, fino a massimizzarlo. Mediante un contatore si può allora misurare con grande precisione la frequenza di risonanza, che divisa per il fattore giromagnetico del protone darà il valore dell'induzione magnetica incognita.

V. Sul coefficiente giromagnetico

La tracciabilità dell'induzione magnetica, o del campo magnetico che dir si voglia che ad essa è proporzionale tramite la permeabilità relativa del vuoto, definita pari a $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$, al secondo è possibile, tramite un esperimento di risonanza magnetica nucleare, solo a patto di conoscere il fattore giromagnetico del nucleo atomico il cui momento angolare intrinseco viene fatto risuonare. Nel caso del protone libero, l'elettrodinamica quantistica consente di effettuare calcoli molto precisi, ma sfortunatamente se il protone è parte di un atomo o di una molecola, il fattore giromagnetico *efficace* è minore di quello del protone libero, per via della schermatura offerta dagli elettroni (a loro volta dotati di spin) dell'atomo o della molecola. Il calcolo del fattore giromagnetico è ancora possibile, sempre con procedure approssimate, per lo meno nei casi più semplici, ma resta il problema di conoscere l'incertezza con cui è noto il fattore giromagnetico per il fluido utilizzato per l'esperimento di NMR. Inoltre, stante la grande variabilità del coefficiente giromagnetico con il fluido utilizzato, è spesso necessaria un'operazione di misura per determinare valore rappresentativo ed incertezza associata a γ . Il problema è che solitamente tale operazione di misura è nuovamente un esperimento di risonanza magnetica nucleare, in cui il campo applicato viene considerato noto, e dalla frequenza di risonanza del sistema si ricava, noto il campo, il coefficiente γ . Il problema, allora, è evidente: la tracciabilità del campo magnetico al secondo è data, previa la conoscenza del fattore giromagnetico del fluido utilizzato; esso è noto grazie ad un esperimento di risonanza magnetica nucleare in cui è necessario conoscere il campo magnetico.

La soluzione usuale al dilemma consiste nel rompere questo circolo realizzando ad esempio un solenoide dalle caratteristiche tali da essere calcolabile con precisione sufficiente, e con uniformità di campo sufficiente, da realizzare un esperimento di risonanza magnetica nucleare in cui il campo magnetico è calcolato a partire dalle caratteristiche geometriche del solenoide e dalla corrente elettrica che in esso viene fatta circolare. Tramite di esso, il fattore giromagnetico del fluido viene determinato (con la sua incertezza), ed esso va a costituire la curva di taratura del magnetometro NMR (ad esempio ad acqua corrente) che verrà poi impiegato per determinare il campo incognito generato da un altro solenoide o bobina o elettromagnete ecc.

VI. Standard di induzione magnetica

Presso gli Istituti Metrologici Primari, un sistema campione per la generazione del campo magnetico viene realizzato. Ad esempio presso l'INRIM si trovano delle bobine di Helmholtz la cui realizzazione è stata effettuata con grande cura: il calcolo assicura un'uniformità sufficiente ($\approx 1.5 \cdot 10^{-5}$) del campo magnetico nel volume investigato dalla sonda di un magnetometro NMR ad acqua corrente ($\approx 10 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$), e i materiali impiegati per la costruzione sono stati scelti così da minimizzare le variazioni geometriche delle bobine al variare di temperatura ed umidità. Queste sono costantemente mantenute entro limiti ritenuti accettabili all'interno del laboratorio in cui si trovano le bobine campione. Tali bobine di Helmholtz sono poste all'interno di un sistema di ulteriori bobine, triassiali, che assicurano la compensazione attiva in tempo reale del campo magnetico terrestre e dei campi magnetici statici ambientali.

Un magnetometro NMR ad acqua corrente, di cui è nota la curva di taratura (con l'incertezza associata) che mette in corrispondenza la frequenza misurata col campo magnetico applicato alla sonda, viene impiegato per misurare il campo magnetico presente all'interno delle bobine campione. Queste vengono alimentate in corrente continua mediante un generatore; in serie alle bobine è posta una resistenza cam-

pione, ai cui capi si misura la caduta di tensione al fine di determinare la corrente che circola nelle bobine stesse. È così possibile determinare il coefficiente k delle bobine a partire dalla conoscenza del campo magnetico al loro interno (determinato col magnetometro NMR ad acqua corrente), della resistenza campione (determinata dal suo certificato di taratura) e dalla tensione ai capi di essa (determinata con un voltmetro tarato).

Il coefficiente k delle bobine campione viene stimato ripetendo n volte la misura del campo magnetico, avendo cura che la temperatura resti all'interno di un intervallo ritenuto accettabile. La procedura viene ripetuta per intervalli differenti di temperatura.

L'incertezza di k è determinata componendo l'incertezza di tipo A proveniente dalle n misure del campo magnetico, e le incertezze di tipo B relative alla resistenza campione e alla lettura del voltmetro. La determinazione di k con la sua incertezza in un intervallo di temperature adiacente deve assicurare la compatibilità delle due misure di k , se non è necessario restringere l'intervallo in cui si consente alla temperatura di variare durante la misura, oppure bisogna tenere conto in maniera esplicita della temperatura (e della sua incertezza) nella determinazione di k .

Una volta nota la k delle bobine di riferimento, esse verranno impiegate per generare un campo magnetico noto (a partire da k , dal valore della resistenza collegata in serie e dalla caduta di tensione ai suoi capi misurata col voltmetro) che servirà per la taratura di sensori di campo quali sonde ad effetto Hall, flussometri, fluxgate, sonde magnetoresistive ecc.

L'incertezza relativa dello standard di induzione magnetica (campo magnetico) presente presso l'INRIM è attualmente di $1.5 \cdot 10^{-4}$, per valori di induzione magnetica compresi da 1 mT e 1.5 T, adeguata per la taratura di dispositivi e sensori di campo correntemente impiegati in laboratori di ricerca e dell'industria.

Marco Coisson