

PRÀCTICA 19

TEMPERATURA DE CURIE DE L'ALIATGE MONEL

OBJECTIUS

- Introducció a la termodinàmica dels sòlids ferromagnètics.
- Observació de la variació de la permeabilitat magnètica d'una barra de monel amb la temperatura mitjançant un experiment d'inducció electromagnètica.
- Determinació de la temperatura de Curie del monel a partir de l'ajust de les mesures de la f.e.m. induïda en el circuit secundari, a distintes temperatures, a l'equació predita per la teoria de camp mitjà per a la variació de la magnetització amb la temperatura.

MATERIAL NECESSARI

- | | |
|--|----------------------------|
| ✓ Barra buida de monel | ✓ Bany termostàtic |
| ✓ Dues bobines de coure de 500 espines | ✓ Font d'alimentació AC 6V |
| ✓ Termòmetre digital | ✓ Multímetre digital |
| ✓ Imant permanent | ✓ Pinça |

INTRODUCCIÓ TEÒRICA

La majoria de les nostres experiències quotidianes amb el magnetisme (imants permanents, metalls que són atrets per estos, nuclis dels transformadors elèctrics, etc.) estan relacionades amb el ferromagnetisme. Un sòlid ferromagnètic (p. e., Fe, Co i Ni) està format per àtoms amb moment dipolar magnètic μ_m . La interacció dels dipòls amb un camp magnètic H redueix l'energia del sòlid si estos s'orienten en la mateixa direcció i sentit del camp. Tanmateix, els dipòls també poden tindre altres orientacions (Fig. 1). De fet, si el sòlid està a una temperatura T finita, els dipòls estan continuament canviant la seua orientació degut al moviment tèrmic (és a dir, a l'energia tèrmica). Ara bé, les orientacions de menor energia són més probables que les de major energia i el sòlid mostra una magnetització que és tant major com gran és H i menor és T .

La magnetització M és la densitat de moment dipolar magnètic en la direcció del camp H . Si el moment dels dipòls és m i hi ha N d'ells en un sòlid de volum V , la magnetització és màxima quan tots els dipòls tenen la mateixa orientació. Este valor màxim $M_s = N\mu_m/V$ és coneix com magnetització de saturació. La magnetització observada sempre és menor i resulta convenient emprar la magnetització relativa $m = M/M_s$ com una variable d'estat adimensional (que pren valors entre 0 i 1). La seua variable conjugada és $h = N_A\mu_0\mu_m H$, una magnitud amb unitats d'energia molar, on N_A és la constant d'Avogadro i $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ és la permeabilitat magnètica del buit.

Una de les principals característiques dels materials ferromagnètics és que els seus dipòls no sols interaccionen amb el camp H sinó que també ho fan entre ells. De fet, un sòlid ferromagnètic pot estar magnetitzat en absència de camp magnètic H (com ocorreix en un imant permanent). En les proximitats del zero absolut, esta interacció domina el comportament del sòlid i s'assoleix la magnetització de saturació. A temperatures finites, la magnetització observada és el resultat dels efectes orientadors de les interaccions entre dipòls i el camp i de l'efecte desorientador del moviment tèrmic.

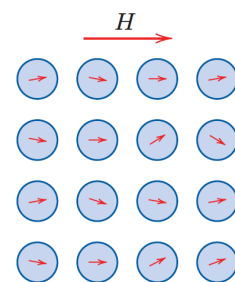


Fig. 1. Il·lustració de l'orientació de dipòls magnètics permanents en un camp magnètic.

La teoria de camp mitjà del ferromagnetisme descriu les interaccions d'un dipol magnètic amb els seus dipols veïns de forma aproximada, com si fos una interacció d'este dipol amb el camp mitjà creat per els seus dipols veïns. L'equació tèrmica d'estat del sòlid ferromagnètic que es dedueix a partir d'esta teoria és (Fig. 2)

$$\frac{T}{T_c} = \frac{(h/RT_c) + m}{\operatorname{arctanh} m} = 2 \frac{(h/RT_c) + m}{\ln[(1+m)/(1-m)]} \quad (1)$$

on R és la constant universal dels gasos i T_c és la temperatura de Curie. Esta temperatura és proporcional a la intensitat de la interacció entre dipols veïns.

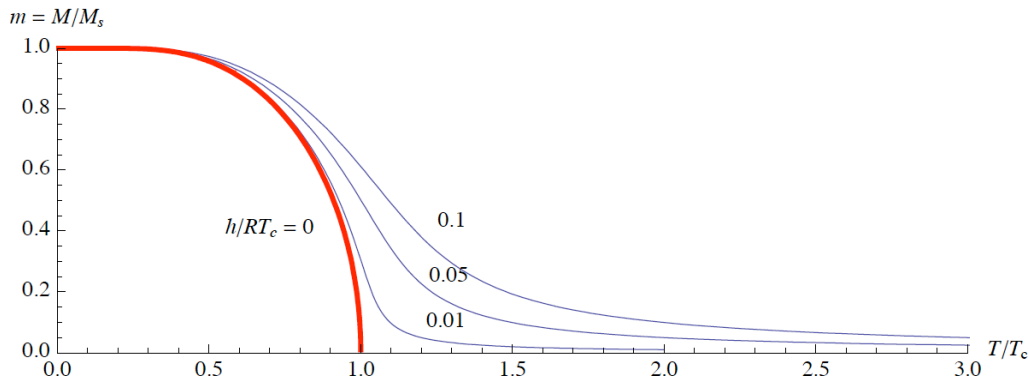


Fig. 12. Magnetització relativa d'un sòlid ferromagnètic en funció de la temperatura reduïda T/T_c per a distints valors h/RT_c (quantitat que és proporcional al camp magnètic H), d'acord amb la teoria de camp mitjà, eq. (1). S'observa que la magnetització és tant major quanto més gran és H i menor és T . La línia roja de traç gort correspon als estats ferromagnètics, en els quals la magnetització és no nul·la tot i que el camp magnètic és nul.

En absència de camp, $h/RT_c \propto H = 0$, la magnetització relativa disminueix progresivament en augmentar la temperatura i s'anula per a temperatures iguals o majors que la temperatura de Curie, T_c . (Observa que quan $h/RT_c = 0$, l'eq. (1) sols té solució si $T < T_c$; a temperatures majors la fracció en el membre de la dreta mostra una indeterminació del tipus 0/0.) Els estats amb magnetització no nul·la ($1 \geq m > 0$) en absència de camp es denominen ferromagnètics i els de magnetització nula ($m = 0$) en absència de camp es denominen paramagnètics. La transició entre els estats ferromagnètics i els estats paramagnètics ocorreix de manera continua, és a dir, m varia de manera continua amb T prop de la temperatura de Curie T_c . Esta transició de fase és de tipus continu o d'ordre superior. A més a més, la transició entre els estats ferromagnètics i paramagnètics (a $T = T_c$ i $H = 0$) no requereix calor de canvi de fase. La temperatura de Curie T_c també es coneix com temperatura crítica de la transició de fase estat ferromagnètic-estat paramagnètic i és essencialment la temperatura més alta a la que poden existir estats ferromagnètics. Si calenteu un imant permanent per damunt de la seua temperatura de Curie, este perdrà la seua magnetització.

En presència de camp, $h/RT_c \propto H \neq 0$, els estats d'equilibri no es denominen ferromagnètics ni paramagnètics, sinó simplement estats del sòlid ferromagnètic. Si augmentem progresivament la temperatura des de $T \ll T_c$ fins $T \gg T_c$, la magnetització canvia des de $m \approx 1$ fins $m \approx 0$ seguint una corba continua monòtonament decreixent però no hi ha transició de fase. Per això, quan estudiem un sòlid ferromagnètic en presència de camp (com farem en esta pràctica), la temperatura de Curie es deu entendre com una propietat del sòlid que caracteritza la importància de les interaccions entre dipols, però no como una temperatura de transició de fase.

Les temperatures de Curie dels elements purs Fe, Co i Ni són 1043, 1388 i 627 K, respectivament, pero és possible tindre materials, tant cristal·lins com amorfs, amb temperatures de Curie cobrint un ampli rang de valors. Particularment interesant és el cas de les aliatges sòlides de Ni i Cu. Els àtoms de Ni en estos

al·liges tenen moment magnètic no nul perquè la seua capa electrònica 3d està incompleta. La variació de la temperatura de Curie de l'al·ligatge amb el percentage de Cu és aproximadament lineal, sent 627 K per a Ni pur i 0 K per a l'al·ligatge amb 40% Ni i 60% Cu (en esta proporció els electrons 4s del Cu omplien completament els estats 3d vacants del Ni i l'al·ligatge deixa de ser ferromagnètica). En esta pràctica treballarem amb monel, un al·ligatge comercial la composició nominal del qual és 65% Ni, 33% Cu i 2% Fe, amb temperatura de Curie pròxima als 300 K. Ara bé, una variació de tan sols el 1% en la composició d'esta al·ligatge implica un canvi d'uns 10 K en la temperatura de Curie.

PROCEDIMENT EXPERIMENTAL

El muntatge experimental és similar al d'un transformador que fa ús d'una barra de monel com a nucli (Fig. 3). Tant el circuit primari com el secundari són bobines de coure de 500 espire, les quals unirem amb ajuda de la pinça per a que no s'altere la distància entre elles. La barra de monel està buida i per ella circula aigua d'un bany termostàtic. El coeficient d'inducció mútua del transformador depèn de la permeabilitat magnètica del nucli i, per tant, de la seua temperatura, que podem controlar amb el bany i mesurar amb un termòmetre digital. La sonda del termòmetre s'ha de col·locar, amb molta cura per a no trencar-la, en el xicotet forat situat entre una de les bobines i la barra de monel.

El muntatge inclou també un imant permanent que s'ha d'adherir a la part inferior de la barra de monel. Conforme es progressa en el desenvolupament de la pràctica i s'augmenta la temperatura de la barra, s'assolirà una temperatura a la que este imant es desprèn. Heu d'anotar la dita temperatura i realitzar una discussió sobre què determina el seu valor.

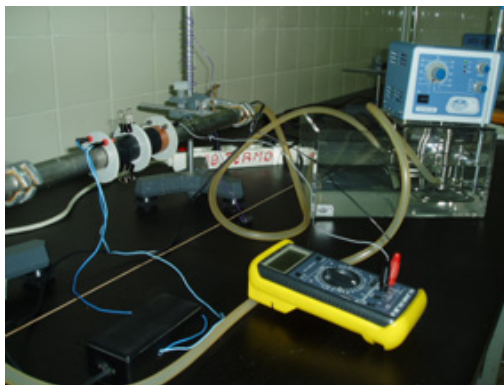


Fig. 3. Fotografia del muntatge experimental. La barra de monel està buida i per ella circula aigua d'un bany termostàtic. Sobre la barra n'hi ha montades dues bobines. La que fa de primari està connectada a la font d'alimentació alterna de 6V. La que fa de secundari està connectada a un milivoltímetre (AC).

L'objectiu final de la pràctica és la determinació de la temperatura de Curie del monel fent ús de l'eq. (1). Esta equació descriu la variació de la magnetització relativa amb la temperatura. Com el muntatge experimental no mesura la magnetització m de la barra sinó sols la f.e.m. V induïda en el secundari, admitirem que es compleix la següent relació lineal entre estes magnituds:

$$m = k(V - V_{\infty}) \quad (2)$$

on k és una constant de proporcionalitat desconeguda i V_{∞} es pot interpretar com la f.e.m. induïda que hipotèticament s'observaria a temperatura molt alta ($T \rightarrow \infty$), quan la magnetització de la barra seria pràcticament nul·la ($m \rightarrow 0$). La justificació d'esta relació lineal està basada en que el coeficient d'inducció mútua entre les bobines augmenta amb la permeabilitat magnètica de la barra i, per tant, amb la seua magnetització.

Per baix de la temperatura de Curie, la magnetització de la barra i la f.e.m. induïda en el secundari són altes. Per dalt de la temperatura de Curie, la magnetització de la barra és molt menor i també ho és la f.e.m. induïda en el secundari. La major variació de la f.e.m. induïda amb la temperatura es dona al voltant de la temperatura de Curie i, per això, és important concentrar les mesures en la dita regió. Començarem les mesures fent circular aigua per la barra a una temperatura lleugerament inferior als 20 °C. Si la temperatura del laboratori fos major, començaríem afegint uns glaçons de gel al aigua. La primera mesura es realitza connectant la circulació de l'aigua del bany però no la calefacció. S'espera uns minuts a que s'estabilitze (amb una precisió de 0.1 mV) la lectura de la f.e.m. induïda en el secundari i s'anota esta i la

temperatura que indique el termòmetre digital. A continuació, es deuen realitzar mesures amb increments de 1 °C aprox. fins arribar als 30 °C, connectant la calefacció del bany i regulant el seu termostat. Entre els 30 °C i els 50 °C les mesures es poden fer a intervals de temperatura majors (uns pocs graus Celsius).

PRESENTACIÓ DE RESULTATS

- (a) Digues a quina temperatura s'ha després l'imant i comenta de qué depèn esta temperatura (pes i magnetització del imant, susceptibilitat magnètica de la barra, etc.).
- (b) Prepara una taula amb la f.e.m. induïda en el secundari V (mV) i la temperatura t (°C). Representa gràficament les dades experimentals i el seu ajust a la equació no lineal

$$T = 2T_c \frac{(h/RT_c) + k(V - V_\infty)}{\ln[(1 + k(V - V_\infty))/(1 - k(V - V_\infty))]} \quad (3)$$

on T_c , (h/RT_c) , k i V_∞ són quatre paràmetres d'ajust.

(b1) Si l'ajust es realitza amb l'aplicació *Kaleida Graph* (recomanat) has de seleccionar en el menú *Curve Fit* l'opció *General* i crear un *New Fit* que hauràs d'editar amb el següent contingut:

$-273.15 + 2 * (273.15 + m1) * (m2 + m3 * (m0 - m4)) / \ln((1 + m3 * (m0 - m4)) / (1 - m3 * (m0 - m4)))$;
 $m1 = 24; m2 = 0.0007; m3 = 0.004; m4 = 15$

Aquí $m0$ és V i els paràmetres $m1$, $m2$, $m3$ i $m4$ són t_c , (h/RT_c) , k i V_∞ , respectivament.

(b2) Si l'ajust el realitzes amb el programa *Mathematica* deus descarregar el corresponent *Notebook* del menú de guions de pràctiques en la web www.uv.es/labtermo, reemplaçar les dades experimentals que trobareu en el dit *Notebook* per les vostres, i executar els comandos.

Tant amb *Kaleida Graph* com amb *Mathematica*, obtindràs els paràmetres d'ajust i les seues estimacions d'error. Anota la informació que correspon a la temperatura de Curie.

- (c) Una vegada fet l'ajust, presenta la gràfica com V (mV) vs. t (°C), intercanviant les variables dependent i independent (en *Kaleida Graph*: opció "Exchange X and Y Axis" del submenú "Position", finestra de "Axis options" sota el menú "Plot").

Nota: la gràfica haurà de contenir les dades experimentals i la corba d'ajust.