

PRÁCTICA 19

TEMPERATURA DE CURIE DE LA ALEACIÓN MONEL

OBJETIVOS

- Introducción a la termodinámica de los sólidos ferromagnéticos.
- Observación de la variación de la permeabilidad magnética de una barra de monel con la temperatura mediante una experiencia de inducción electromagnética.
- Determinación de la temperatura de Curie del monel mediante ajuste de las medidas (de la fem inducida en el secundario a distintas temperaturas) a la ecuación predicha por la teoría de campo medio (para la variación de la magnetización con la temperatura).

MATERIAL NECESARIO

- | | |
|---------------------------------------|--------------------------------|
| ✓ Barra hueca de monel | ✓ Baño termostático |
| ✓ Dos bobinas de cobre de 500 espiras | ✓ Fuente de alimentación AC 6V |
| ✓ Termómetro digital | ✓ Multímetro digital |
| ✓ Imán permanente | ✓ Pinza |

INTRODUCCIÓN TEÓRICA

La mayoría de nuestras experiencias cotidianas con el magnetismo (imanes permanentes, metales que son atraídos por éstos, núcleos de los transformadores eléctricos, etc.) están relacionadas con el ferromagnetismo. Un sólido ferromagnético tiene átomos con momento dipolar magnético permanente (como, por ejemplo, Fe, Co y Ni). La interacción de los dipolos con un campo magnético H reduce la energía del sólido si éstos se orientan en la misma dirección y sentido del campo. Sin embargo, los dipolos también pueden tener otras orientaciones (Fig. 19.1). De hecho, si el sólido está a una temperatura T finita, los dipolos están continuamente cambiando su orientación debido al movimiento térmico (es decir, a la energía térmica). Ahora bien, las orientaciones de menor energía son más probables que las de mayor energía y el sólido muestra una magnetización que es tanto mayor cuanto mayor es H y menor es T .

La magnetización M es la densidad de momento dipolar magnético en la dirección del campo H . Si el momento de los dipolos es m y hay N de ellos en un sólido de volumen V , la magnetización es máxima cuando todos los dipolos tienen la misma orientación. Este valor máximo $M_s = N\mu_m/V$ se conoce como magnetización de saturación. La magnetización observada siempre es menor y resulta conveniente emplear la magnetización relativa, $m = M/M_s$, como una variable de estado adimensional (que toma valores entre 0 y 1). Su variable conjugada es $h = NA\mu_0\mu_m H$, una magnitud con unidades de energía molar, donde NA es la constante de Avogadro y $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ es la permeabilidad magnética del vacío.

Una de las principales características de los materiales ferromagnéticos es que sus dipolos no sólo interaccionan con el campo H sino que también interaccionan entre ellos. De hecho, un sólido ferromagnético puede estar magnetizado incluso en ausencia de campo magnético H (como ocurre, por ejemplo, en un imán permanente). En las proximidades del cero absoluto, esta interacción domina el comportamiento del sólido y éste muestra la magnetización de saturación. A temperaturas finitas, la

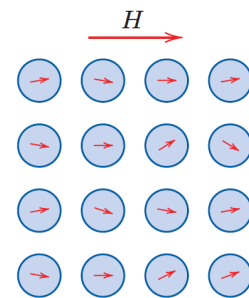


Figura 1. Ilustración de la orientación de dipolos magnéticos permanentes en un campo magnético.

magnetización observada es el resultado de los efectos orientadores de las interacciones entre dipolos y con el campo y del efecto desorientador del movimiento térmico.

La teoría de campo medio del ferromagnetismo describe las interacciones de un dipolo magnético con sus dipolos vecinos de forma aproximada como si fuese una interacción de este dipolo con el campo medio creado por sus dipolos vecinos. La ecuación térmica de estado del sólido ferromagnético que se deduce a partir de esta teoría es (figura 2)

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

donde R es la constante universal de los gases y T_c es la temperatura de Curie. Esta temperatura es proporcional a la intensidad de la interacción entre dipolos vecinos.

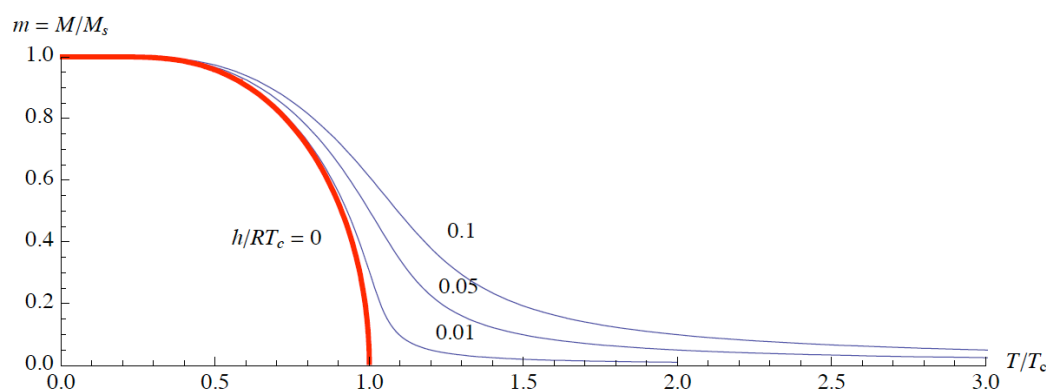


Figura 12. Magnetización relativa de un sólido ferromagnético en función de la temperatura reducida T/T_c para distintos valores h/RT_c (que es proporcional al campo magnético H), según la teoría de campo medio, ec. (1). Se observa que la magnetización es tanto mayor cuanto mayor es H y menor es T . La línea roja de trazo grueso corresponde a los estados ferromagnéticos, en los cuales la magnetización es no nula aunque el campo magnético es nulo.

En ausencia de campo, $h/RT_c \propto H = 0$, la magnetización relativa disminuye progresivamente al aumentar la temperatura y se anula para temperaturas iguales o mayores que la temperatura de Curie, T_c . (Observa que, cuando $h/RT_c = 0$, la ec. (1) sólo tiene solución si $T < T_c$; a temperaturas mayores la fracción en el miembro de la derecha muestra una indeterminación del tipo $0/0$.) Los estados con magnetización no nula, $1 \geq m > 0$, en ausencia de campo se denominan estados ferromagnéticos y los estados con magnetización nula, $m = 0$, en ausencia de campo se denominan estados paramagnéticos. La transición entre los estados ferromagnéticos y los estados paramagnéticos ocurre de modo continuo. Es decir, m varía de modo continuo con T en la vecindad de la temperatura de Curie T_c , por lo que esta transición de fase es de tipo continuo (o de orden superior). Además, la transición entre los estados ferromagnéticos y paramagnéticos (a $T = T_c$ y $H = 0$) no requiere calor de cambio de fase. La temperatura de Curie T_c también se conoce como temperatura crítica de la transición de fase estado ferromagnético-estado paramagnético y es esencialmente la temperatura más alta a la que pueden existir estados ferromagnéticos. Si calentáis un imán permanente por encima de su temperatura de Curie, éste perderá su magnetización.

En presencia de campo, $h/RT_c \propto H \neq 0$, los estados de equilibrio no se denominan ferromagnéticos ni paramagnéticos, sino simplemente estados del sólido ferromagnético. Si aumentamos progresivamente la temperatura desde $T \ll T_c$ hasta $T \gg T_c$, la magnetización cambia desde $m \approx 1$ hasta $m \approx 0$ siguiendo una curva continua monótonamente decreciente pero no hay transición de fase. Por ello, cuando estudiamos un sólido ferromagnético en presencia de campo (como haremos en esta práctica) la temperatura de Curie se debe entender como una propiedad del sólido que caracteriza la importancia de las interacciones entre dipolos pero no como una temperatura de transición de fase.

Las temperaturas de Curie de los elementos puros Fe, Co y Ni son 1043, 1388 y 627 K, respectivamente, pero es posible tener materiales tanto cristalinos como amorfos con temperaturas de Curie cubriendo un amplio rango de valores. Particularmente interesante es el caso de las aleaciones sólidas de Ni y Cu. Los átomos de Ni en estas aleaciones tienen momento magnético no nulo porque su capa electrónica 3d está incompleta. La variación de la temperatura de Curie de la aleación con el porcentaje de Cu es aproximadamente lineal, siendo 627 K para Ni puro y 0 K para la aleación con 40% Ni y 60% Cu, pues en esta proporción los electrones 4s del Cu llenan completamente los estados 3d vacantes del Ni y la aleación deja de ser ferromagnética. En esta práctica trabajaremos con monel, una aleación comercial cuya composición nominal es 65% Ni, 33% Cu y 2% Fe y cuya temperatura de Curie es próxima a los 300 K. Ahora bien, una variación de tan sólo 1% en la composición de esta aleación implica un cambio de unos 10 K en la temperatura de Curie.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El montaje experimental es similar al de un transformador que emplea una barra de monel como núcleo (figura 3). Tanto el primario como el secundario son bobinas de cobre de 500 espiras, las cuales uniremos con ayuda de la pinza para que no se altere la distancia entre ellas. La barra de monel está hueca y por ella circula agua de un baño termostático. El coeficiente de inducción mutua del transformador depende de la permeabilidad magnética del núcleo y, por tanto, de su temperatura, la cual podemos controlar con el baño y medir con un termómetro digital cuya sonda se ha de colocar (con mucho cuidado para no romperla) en el pequeño hueco que queda entre una de las bobinas y la barra de monel.

El montaje incluye también un imán permanente que se ha de adherir a la parte inferior de la barra de monel. Conforme se progresa en el desarrollo de la práctica y se aumenta la temperatura de la barra, se alcanzará una temperatura a la que este imán se desprende. Debéis anotar dicha temperatura y realizar una discusión acerca de qué determina su valor.

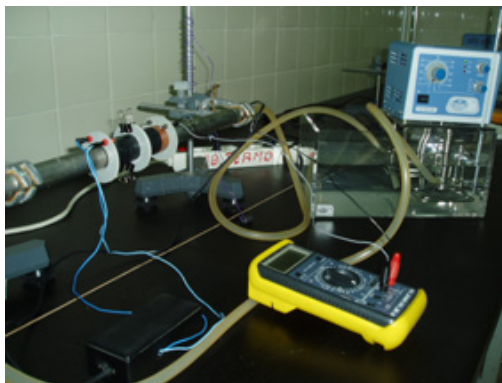


Figura 3. Fotografía del montaje experimental. La barra de monel está hueca y por ella circula agua de un baño termostático. Sobre la barra hay montadas dos bobinas. La que hace de primario está conectada a la fuente de alimentación alterna de 6V. La que hace de secundario está conectada a un milivoltímetro (AC).

El objetivo final de la práctica es la determinación de la temperatura de Curie del monel empleando la ec. (1). Esta ecuación describe la variación de la magnetización relativa con la temperatura. Como nuestro montaje experimental no mide la magnetización m de la barra sino sólo la fem V inducida en el secundario, admitiremos que se cumple la siguiente relación lineal entre estas magnitudes

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

donde k es una constante de proporcionalidad desconocida y V_{∞} se puede interpretar como la fem inducida que hipotéticamente se observaría a muy alta temperatura ($T \rightarrow \infty$), cuando la magnetización de la barra sería prácticamente nula ($m \rightarrow 0$). La justificación de esta relación lineal se basa en que el coeficiente de inducción mutua entre las bobinas aumenta con la permeabilidad magnética de la barra y, por tanto, con su magnetización.

Por debajo de la temperatura de Curie, la magnetización de la barra y la fem inducida en el secundario son grandes. Por encima de la temperatura de Curie, la magnetización de la barra es mucho menor y también lo es la fem inducida en el secundario. La mayor variación de la fem inducida con la temperatura se da alrededor de la temperatura de Curie y, por ello, es importante concentrar las medias en dicha región.

Comenzaremos a medir circulando agua por la barra a una temperatura ligeramente inferior a los 20 °C. Si la temperatura del laboratorio fuese mayor, comenzaríamos añadiendo unos cubitos de hielo al agua. La primera medida se realiza encendiendo la circulación del agua del baño pero no su calefacción. Se espera unos minutos a que se estabilice (con una precisión de 0.1 mV) la lectura de la fem inducida en el secundario y se anota ésta y la temperatura que indica el termómetro digital. A continuación se deben realizar medidas con incrementos de 1 °C aprox. hasta llegar a los 30 °C, encendiendo para ello la calefacción del baño y regulando su termostato. Entre los 30 °C y los 50 °C las medidas se pueden hacer a intervalos de temperatura mayores, de unos pocos grados Celsius.

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

- (a) Dí a qué temperatura se ha desprendido el imán y comenta de qué depende esta temperatura (peso y magnetización del imán, susceptibilidad magnética de la barra, etc.).
- (b) Prepara una tabla con la fem inducida en el secundario V (mV) y la temperatura t (°C). Representa gráficamente los datos experimentales y ajústalos a la ecuación no lineal

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

donde T_c , (h/RT_c) , k y V_∞ son cuatro parámetros de ajuste.

Si el ajuste lo realizas en Kaleida Graph debes seleccionar en el menú *Curve Fit* la opción *General* y crear un *New Fit* que debes editar con el siguiente contenido:

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

Aquí $m0$ es V y los parámetros $m1$, $m2$, $m3$ y $m4$ son t_c , (h/RT_c) , k y V_∞ , respectivamente.

Si el ajuste lo realizas en Mathematica debes descargar el correspondiente notebook del menú de guiones de prácticas en la web www.uv.es/labtermo, reemplazar los datos experimentales que hay en dicho notebook por los vuestros, y ejecutar los comandos.

Tanto con *Kaleida Graph* como con *Mathematica*, obtendrás los parámetros de ajuste y sus estimaciones de error. Anota la información que corresponde a la temperatura de Curie.

- (c) Una vez hecho el ajuste, presenta la gráfica como V (mV) vs. t (°C) intercambiando las variables dependiente e independiente (en *Kaleida Graph*: opción *"Exchange X and Y Axis"* del submenú *"Position"* en la ventana de *"Axis options"* bajo el menú *"Plot"*).

La gráfica deberá contener los datos experimentales y la curva de ajuste.