

Introducción

Las propiedades magnéticas no están limitadas a las sustancias ferromagnéticas, sino que las presentan también todas las sustancias, aunque en mucho menor escala. En esta categoría entran dos tipos de sustancias las paramagnéticas y las diamagnéticas.

Una muestra de sustancia paramagnética situada en un campo magnético es atraída hacia la región donde el campo es más intenso, al contrario de lo que le ocurre a una sustancia diamagnética que es atraída hacia la región donde el campo es más débil.

El paramagnetismo se produce cuando las moléculas de una sustancia tienen un momento magnético permanente. El campo magnético externo produce un momento que tiende a alinear los dipolos magnéticos en la dirección del campo. La agitación térmica aumenta con la temperatura y tiende a compensar el alineamiento del campo magnético. En las sustancias paramagnéticas la susceptibilidad magnética es muy pequeña comparada con la unidad.

En este programa, experimentaremos con un modelo de sustancia paramagnética consistente en un número pequeño, pero suficiente de iones. Distinguiremos entre el comportamiento individual de cada ion y el comportamiento de la muestra en su conjunto.

Los materiales ferromagnéticos son materiales que pueden ser magnetizados permanentemente por la aplicación de un campo magnético externo. Este campo externo puede ser tanto un imán natural o un electroimán. Son los principales materiales magnéticos, el hierro, el níquel, el cobalto y aleaciones de estos.

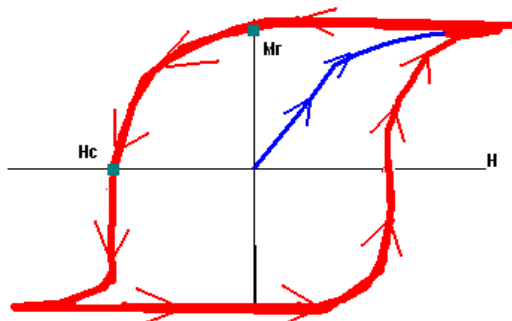
Los materiales paramagnéticos son materiales atraídos por imanes, pero no se convierten en materiales permanentemente magnetizados.

Los materiales diamagnéticos no son atraídos por imanes, son repelidos y no se convierten en imanes permanentes.

Si la temperatura de un material ferromagnético es aumentada hasta un cierto punto llamado temperatura de Curie, el material pierde abruptamente su magnetismo permanente y se vuelve paramagnético

Los materiales ferromagnéticos están caracterizados por curvas de magnetización y curvas de histéresis.

Considerar un material ferromagnético que en principio no este magnetizado (lo cual seria difícil, pues por lo menos fue sometido al campo magnético terrestre. Se le aplica un campo externo que va aumentando paulatinamente su intensidad. La magnetización de l material va aumentando, pero no de forma lineal, hasta llegar a un punto, en que por mas que aumente mucho la intensidad aplicada, la inducción del material prácticamente no cambia. A esta curva original se le suele llamar curva de magnetización.



Ahora, si el campo H es reducido, la inducción también se reduce, pero no sigue la curva de imanación anterior, sino que el material retiene una cierta magnetización residual llamada magnetización remanente M_r . Eventualmente, si se sigue reduciendo el campo H (en realidad, se cambia el sentido del campo H aplicado), la inducción remanente disminuirá a cero, pero a costa de la existencia de una magnitud H_c , llamada coercitividad. El producto $M_r H_c$ se suele llamar fuerza del imán. Siguiendo con el proceso, se repite el mismo fenómeno (pero de signo contrario) y se va formando la curva que muestra el siguiente gráfico.

La línea azul corresponde a la curva de magnetización y la línea roja a la curva de histéresis.

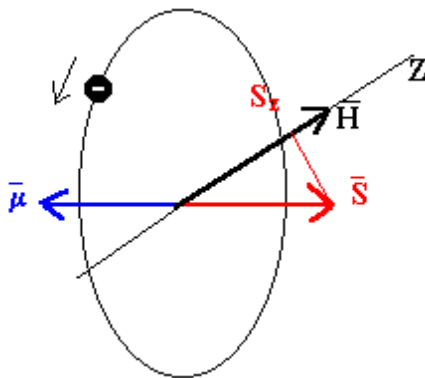
En el caso de grabaciones magnéticas, el medio o soporte magnético, no suele ser llevado al punto de saturación completa (bordea angulosos en el primer y tercer cuadrante de la figura. Los campos aplicados se mantiene por debajo del valor de saturación y la inducción permanente es menor que el valor M_r antes visto.

Las propiedades magnéticas no están limitadas a las sustancias ferromagnéticas, sino que las presentan también todas las sustancias, aunque en mucho menor escala. En esta categoría entran dos tipos de sustancias las paramagnéticas y las diamagnéticas.

Una muestra de sustancia paramagnética situada en un campo magnético es atraída hacia la región donde el campo es más intenso, al contrario de lo que le ocurre a una sustancia diamagnética que es atraída hacia la región donde el campo es más débil.

El paramagnetismo se produce cuando las moléculas de una sustancia tienen un momento magnético permanente. El campo magnético externo produce un momento que tiende a alinear los dipolos magnéticos en la dirección del campo. La agitación térmica aumenta con la temperatura y tiende a compensar el alineamiento del campo magnético. En las sustancias paramagnéticas la susceptibilidad magnética es muy pequeña comparada con la unidad.

Descripción



Un átomo o un ion de momento magnético $\vec{\mu}$ en un campo magnético H tiene una energía $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{H}$

. El momento magnético es proporcional al momento angular $\vec{\mu} = g \mu_B \vec{S}$

. Donde μ_B es el magnetón de Bohr y g es un factor del orden de dos. Si H apunta en la dirección del eje Z , la energía del dipolo vale

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{H} = -g \mu_B S_z H$$

En la descripción mecánico-cuántica los valores de S_z son discretos, y van desde $-S$ a $+S$, en total $2S+1$ valores. Por tanto, las componentes del momento magnético a lo largo de la dirección del campo tienen $2S+1$ valores.

Utilizando la imagen de la descripción clásica, esta restricción nos viene a decir que todas las orientaciones del momento magnético no son posibles, solamente aquellas tales que sus componentes a lo largo de la dirección del campo tienen el valor dado por la fórmula anterior.

Tenemos un sistema de iones paramagnéticos a una temperatura T , que pueden ocupar $2S+1$ niveles de energía. La estadística clásica nos dice que la probabilidad de que una partícula ocupe un nivel de energía U es proporcional a $\exp(-U/kT)$.

El valor medio de la componente del momento magnético a lo largo de la dirección del campo vale.

$$\langle \mu_z \rangle = \frac{\sum \mu_z \exp\left(\frac{-U}{kT}\right)}{\sum \exp\left(\frac{-U}{kT}\right)} \quad (1)$$

donde la suma se extiende a los $2S+1$ posibles valores de S_z .

Casos particulares:

Cuando $u \ll 1$ el valor medio de la componente del momento magnético a lo largo del campo se puede aproximar a

$$\langle \mu_z \rangle = \frac{g^2 \mu_B^2 S(S+1) H}{3kT}$$

que es una función lineal del cociente campo/temperatura, a esta fórmula se le conoce como ley de Curie.

Cuando $u \gg 1$, es decir, para grandes valores del campo o bajas temperaturas

$$\langle \mu_z \rangle = g \mu_B S$$

la mayor parte de los momentos magnéticos están orientados según el campo, el valor medio de la componente del momento magnético tiende hacia un valor constante que es su valor máximo.

Para explicar el paramagnetismo hemos supuesto que los espines de los átomos no interaccionaban entre sí. Para explicar el ferromagnetismo hemos de suponer que un espín dado interacciona con sus vecinos más próximos. En el modelo de Weiss el efecto medio de los átomos vecinos a uno dado se reemplaza por la acción de un campo magnético molecular o interno

Debido a la interacción entre espines, el estado de menor energía se consigue cuando todos los espines apuntan en la misma dirección. A medida que se incrementa la temperatura más espines tienden a cambiar su orientación disminuyendo el momento magnético medio, hasta que se anula a una determinada temperatura T_c , denominada temperatura crítica. Por encima de dicha temperatura, el sistema de espines se comporta como un material paramagnético.

Se ha de tener en cuenta que aunque se representa los espines en una región rectangular, la geometría adoptada en la simulación es toroidal en el sentido de que la fila superior es contigua a la fila inferior y la columna más a la izquierda es contigua a la columna situada en el extremo derecho.

Para producir la simulación se ha empleado el algoritmo de Metrópolis que se puede resumir en los siguientes pasos:

- Se establece la configuración inicial
- Se hace un cambio al azar de la configuración inicial. Por ejemplo, se escoge un espín al azar y se intenta cambiar su orientación.
- Se calcula el cambio ΔE de energía del sistema debido al intento de cambio en la orientación del espín seleccionado.
- Si ΔE es menor o igual que cero, se acepta la nueva configuración y se va al paso 8.
- Si ΔE es positiva, se calcula la probabilidad de transición
$$P = \exp\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right)$$
- Se genera un número al azar r en el intervalo $[0, 1)$
- Si $r \leq P$, se acepta la nueva configuración, de otro modo se mantiene la configuración previa, es decir, el espín no cambiaría de orientación.
- Se determina el valor de las magnitudes físicas de interés.
- Se repite los pasos del 2 al 8 para obtener el suficiente número de configuraciones
- Se calculan promedios de las distintas configuraciones que son estadísticamente independientes una de otra.

Para el caso del Diamagnetismo; si aplicamos un campo magnético externo a una sustancia de este tipo (diamagnética), como Bismuto o Plata, un momento de dipolo magnético débil se induce en la dirección opuesta al campo aplicado. Si bien el efecto del diamagnetismo está presente en toda la materia, es débil comparado con el paramagnetismo o el ferromagnetismo.

Podemos obtener cierta comprensión del diamagnetismo, considerando dos electrones de un átomo orbitando el núcleo en direcciones opuestas pero con la misma velocidad. Los electrones permanecen en estas orbitas circulares debido a la fuerza electrostática atractiva (la fuerza centrípeta) del núcleo cargado positivamente. Debido a que los momentos magnéticos de los dos electrones son iguales en magnitud y opuestos en dirección, se cancelan entre sí y el momento del dipolo del átomo es cero. Cuando se aplica un campo magnético externo, los electrones experimentan una fuerza adicional $\mathbf{q}\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Esta fuerza agregada modifica la fuerza centrípeta hasta aumentar la velocidad orbital del electrón cuyo momento magnético es antiparalelo al campo. Como consecuencia, los momentos magnéticos de los electrones ya no se cancelan, y la sustancia adquiere un momento de dipolo neto que se opone al campo aplicado.

Bibliografía

VAN VLACK, Lawrence H, Materiales de Ingeniería, Editorial Continental(1977), México

SERWAY, Raymond Física, Mac Graw Hill (1998) tomo II.

FISHBANE, Paul Física para Ciencia e Ingeniería. Prentice Hall, (1996) tomo II.