

# Lección 9: El magnetismo

## Resumen

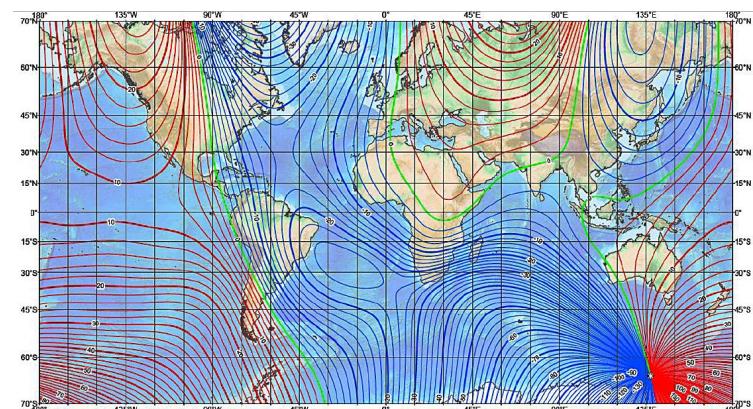
Durante miles de años, los marineros han utilizado la brújula para orientarse. El secreto de la brújula se reveló mucho más tarde. La propia Tierra es un imán y la aguja de la brújula se alinea con el campo magnético. Por un lado, los campos magnéticos se generan cuando las cargas eléctricas se mueven. Por otro lado, el momento magnético de las partículas elementales existe como consecuencia de su espín, lo que da lugar a los imanes permanentes y otras propiedades magnéticas de los sólidos.

## Tabla de contenidos

- Folio 2: La brújula
- Folio 3 – 4: Sustancias magnéticas (1-2)
- Folio 5 – 11: El diamagnetismo (1-7)
- Folio 12: El acelerador de partículas
- Folio 13: El ciclotrón
- Folio 14 – 16: El paramagnetismo (1-3)
- Folio 17: Aplicaciones médicas
- Folio 18: Sensor de oxígeno
- Folio 19 – 20: Resonancia magnética nuclear (1-2)
- Folio 21 – 25: Tomografía de resonancia magnética (1-5)
- Folio 26 – 29: El ferromagnetismo (1-4)
- Folio 30 – 31: El antiferromagnetismo
- Folio 32 – 33: El ferrimagnetismo (1-2)
- Folio 34: Fenómenos magnéticos especiales

# La brújula

Aunque los humanos no tienen sentido de los campos magnéticos, su efecto es conocido desde la invención de la brújula. Esto permite orientarse de la manera más simple sobre toda la superficie de la Tierra. La función se basa en el libre movimiento de una aguja hecho de material ferromagnético. Mediciones más precisas mostraron que la aguja de la brújula no apunta exactamente al Polo Norte geográfico, sino que - variando localmente - usualmente se desvía al oeste o al este de él. Esta desviación se llama declinación. El hecho de que la declinación cambie con el tiempo hace aún más difícil determinar la dirección de forma precisa. El uso de la brújula también mostró que una aguja magnética balanceada se inclina hacia arriba o hacia abajo, dependiendo de su uso en el hemisferio norte o sur. Esto llevó al conocimiento de la inclinación. Por esta razón, las brújulas utilizadas en el hemisferio norte tienen un pequeño peso en la aguja que apunta al sur. Lo contrario es cierto para las brújulas utilizadas en el hemisferio sur.



# Sustancias magnéticas (1)

La unidad física de un campo magnético  $B$  se llama Tesla [T], [1 Vs/m<sup>2</sup> = 1 Tesla]. Además, la intensidad del campo magnético  $H$  [A/m] existe en relación con las ecuaciones de Maxwell.  $B$  y  $H$  se distinguen en el vacío, por la constante del campo magnético  $\mu_0$ .

$$B = \mu_0 \cdot H$$

La intensidad del campo magnético  $H$  se utiliza sobre todo en relación con las corrientes eléctricas,  $B$  en relación con las fuerzas (fuerza de Lorentz) y los voltajes inducidos. La magnetización de un material  $M$  se describe con la susceptibilidad magnética  $\chi$  sin dimensión.

$$M = \chi \cdot H$$

El campo magnético con sustancias también se describe mediante la permeabilidad relativa  $\mu_r$ .

$$B = \mu_0 \cdot (H + M) = \mu_0 \cdot (H + \chi \cdot H) = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \cdot H = \mu_0 \mu_r \cdot H$$

# Sustancias magnéticas (2)

Las corrientes eléctricas están rodeadas por un campo magnético. En el caso de una corriente eléctrica circular  $I$ , que abarca el área  $A$ , se crea un momento dipolar magnético  $\mu_{dipolar}$  con la dimensión [Am<sup>2</sup>].

$$\mu_{dipolar} = I \cdot A$$

La magnetización  $M$  resulta del momento dipolar magnético (respectivamente del número de los momentos dipolares magnéticos elementales) presente por volumen  $V$ .

$$M = \frac{\mu_{dipolar}}{V} = \chi \frac{B}{\mu_0}$$

La susceptibilidad  $\chi$  resulta del momento dipolar magnético de la sustancia.

$$\chi = M \frac{\mu_0}{B} = \frac{\mu_0}{B} \frac{\mu_{dipolar}}{V}$$

# El diamagnetismo (1)

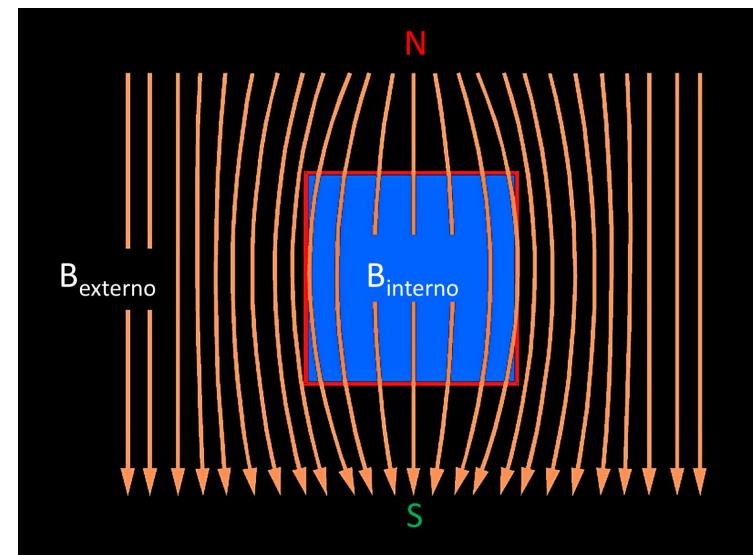
Las sustancias se clasifican según su susceptibilidad  $\chi$ .

$\chi < 0$     sustancias diamagnéticas

$\chi > 0$     sustancias paramagnéticas

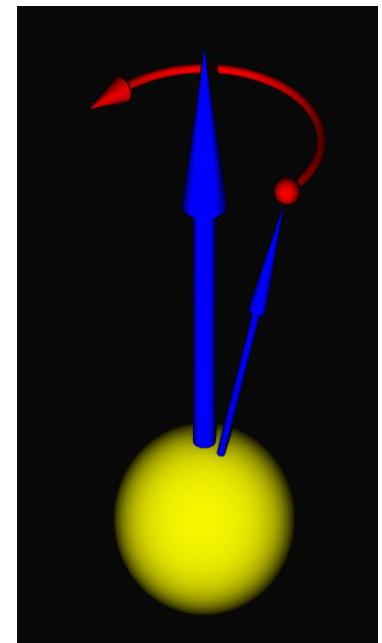
$\chi \gg 0$     sustancias ferromagnéticas

Material	Susceptibilidad $\chi$
Bismuto	$-1.7 \cdot 10^{-4}$
Carbono pirolítico	$-4.5 \cdot 10^{-4}$
Oro	$-3.4 \cdot 10^{-5}$
Plata	$-2.4 \cdot 10^{-5}$
Plomo	$-1.6 \cdot 10^{-5}$
Agua	$-9.1 \cdot 10^{-6}$



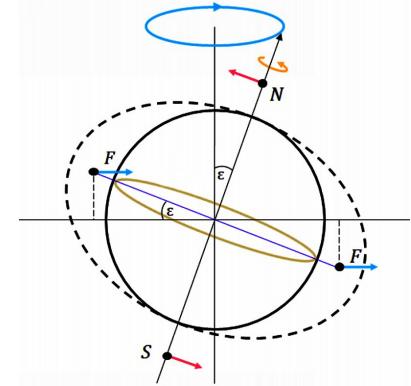
# El diamagnetismo (2)

La causa del comportamiento magnético reside en el propio átomo. El momento dipolar magnético de un átomo se compone de la contribución de la capa de electrones y, mucho menor, del núcleo atómico. Si los orbitales atómicos están todos doblemente ocupados con electrones, la suma de los momentos dipolares magnéticos de los electrones es cero. Esto caracteriza a las sustancias diamagnéticas, que no tienen campo magnético propio en ausencia de un campo magnético externo. Sin embargo, bajo la influencia de un campo magnético externo, una fuerza actúa sobre el momento dipolar magnético de la órbita de ambos electrones. Debido a la ley de conservación del momento angular, existe un movimiento de precesión de los átomos o moléculas en torno a la dirección del campo magnético externo. El movimiento adicional genera un campo magnético de baja intensidad en una dirección que, según la regla de Lenz, es opuesta al campo magnético externo. Esto conduce a una atenuación del campo magnético.



# El diamagnetismo (3)

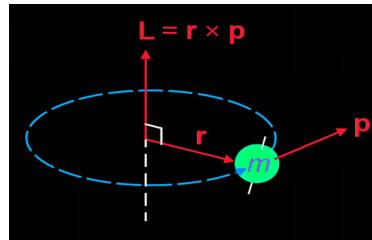
El movimiento del eje giroscópico sobre una superficie cónica se llama precesión. En la astronomía, la precesión representa el cambio de dirección del eje de la Tierra, que es una consecuencia de la atracción gravitacional de la Luna y el Sol, combinada con la desviación de la figura de la Tierra de la forma esférica. Se manifiesta por la progresión del equinoccio de primavera a lo largo de la eclíptica.



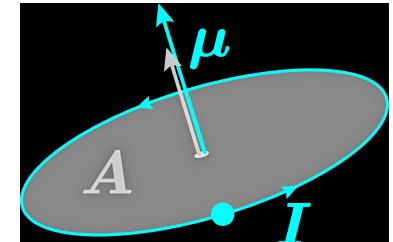
Las partículas elementales cargadas (carga  $q$ ) de los átomos tienen un momento angular  $L$  y un momento dipolar magnético  $\mu_{dipolar}$ .

$$L = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = \mathbf{r} \cdot \mathbf{m} \cdot \mathbf{v} \quad ; \quad \mathbf{v} = \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{r}$$

$$I = \frac{q}{T} = q \cdot \mathbf{v} = q \frac{\boldsymbol{\omega}}{2\pi} \quad ; \quad \mu_{dipolar} = I \cdot A = I \cdot r^2 \pi$$



$$\mu_{dipolar} = \frac{q}{2m} L$$



# El diamagnetismo (4)

El momento magnético del protón es unas 2000 veces menor por su mayor masa.  
Para un electrón en su órbita, el momento dipolar magnético es:

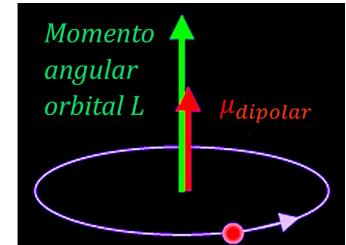
$$\mu_{dipolar} = \frac{-e}{2m_{el}} L$$

Para el momento angular intrínseco del electrón (espín) el momento dipolar magnético es:

$$\mu_{dipolar} = \frac{-e}{m_{el}} S$$

Por lo general, se aplica la siguiente relación:

$$\mu_{dipolar} = g \cdot \frac{-e}{2m_{el}} J$$



El factor  $g$  se denomina factor Landé. En el caso del acoplamiento  $L - S$ , vale:

$$J = L \rightarrow g = 1$$

$$J = S \rightarrow g = 2$$

$$J = L + S \rightarrow g = \frac{3J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

# El diamagnetismo (5)

Un campo magnético genera un torque sobre un dipolo magnético.

$$Torque = \mu_{dipolar} \times B$$

El torque produce un cambio del momento angular  $\Delta J$  en el tiempo  $\Delta t$ . Debido a la conservación del momento angular, precede alrededor del campo magnético aplicado con un ángulo  $\varphi$ .

$$\frac{dJ}{dt} = J \cdot \sin \varphi \cdot \frac{d\varphi}{dt} = J \cdot \sin \varphi \cdot \omega_{Larmor}$$

La velocidad angular del movimiento de precesión se llama precesión de Larmor.

$$Torque = \frac{dJ}{dt} = \mu_{dipolar} \cdot B \cdot \sin \varphi$$

El movimiento de precesión es independiente del ángulo de inclinación.

$$\omega_{Larmor} = \frac{\mu_{dipolar} \cdot B}{J}$$

# El diamagnetismo (6)

Para los electrones orbitales vale ( $g = 1$ ):

$$\omega_{Larmor} = \frac{-e}{2m_{el}} B$$

Para una consideración más detallada, hay que tener en cuenta la cuantización del momento angular. Sin embargo, el modelo clásico facilita el entendimiento.

La precesión de Larmor genera una corriente adicional que se orienta en sentido contrario a su causa.

$$\Delta I = -e \cdot \frac{\omega_{Larmor}}{2\pi} = \frac{-e^2 \cdot B}{4\pi \cdot m_{el}}$$

Esto implica un momento dipolar magnético.

$$\Delta\mu_{dipolar} = \Delta I \cdot A = \frac{-e^2 \cdot B}{4\pi \cdot m_{el}} \cdot r^2 \pi = \frac{-e^2 \cdot B}{4 \cdot m_{el}} \cdot r^2$$

De ahí se puede calcular la susceptibilidad  $\chi$  con un signo negativo para el diamagnetismo.

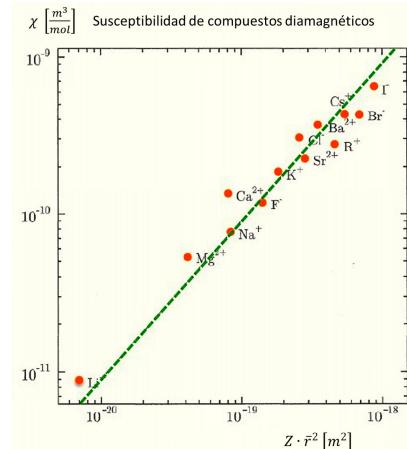
# El diamagnetismo (7)

$$\chi = M \frac{\mu_0}{B} = \frac{\mu_0 \mu_{dipolar}}{B V} = \frac{-e^2 \cdot \mu_0}{4 \cdot m_{el} \cdot V} \cdot r^2$$

Para una órbita de electrones esféricamente simétrica (orbital s) sigue un factor  $2/3$  por un  $r^2$  promedio. Teniendo en cuenta el número efectivo de electrones de valencia  $Z$ , se puede calcular la susceptibilidad diamagnética  $\chi$  a partir de la teoría.

$$\chi = \frac{-e^2 \cdot \mu_0 \cdot Z}{6 \cdot m_{el} \cdot V} \cdot \bar{r}^2 ; \quad \chi \sim Z \cdot \bar{r}^2$$

El diamagnetismo existe en todas las sustancias. Las sustancias con electrones no emparejados tienen un momento dipolar magnético permanente que supera el diamagnetismo. Los materiales con esta propiedad son paramagnéticos.



# El acelerador de partículas

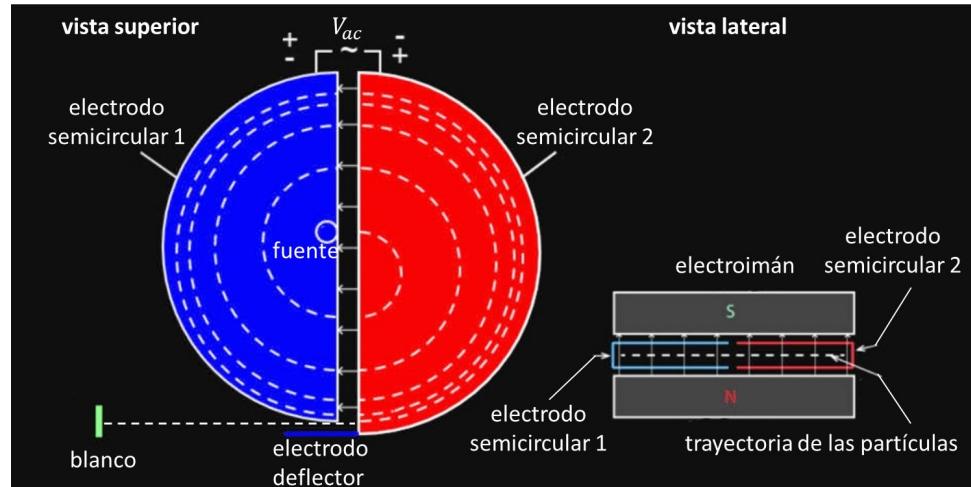
Algo parecido se encuentra en el principio de un acelerador de partículas, el ciclotrón. Un campo magnético dirige las partículas cargadas (iones o electrones) a lo largo de una trayectoria circular en forma de espiral, aceleradas por un campo eléctrico alterno. El radio orbital  $r$  se calcula a partir del equilibrio de la fuerza centrífuga y la fuerza de Lorentz debida al campo magnético.

$$F_{\text{centrífuga}} = m\omega^2 r = qv \times B = F_{\text{Lorentz}}$$

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} \quad \rightarrow \quad r \sim v$$

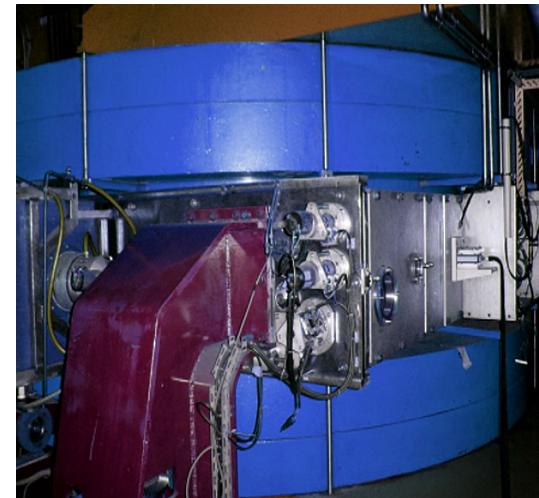
El tiempo  $t$  para  $\frac{1}{2}$  revolución de una partícula se obtiene por

$$t = \frac{\frac{1}{2} 2\pi r}{v} = \text{constante}$$



# El ciclotrón

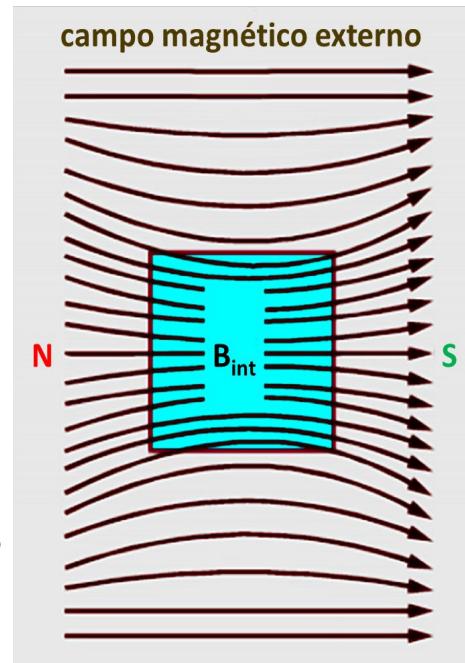
El tiempo  $t$  para invertir la polaridad de los electrodos del semicírculo es constante, es decir, la frecuencia de la fuente de voltaje alterno es una frecuencia fija. Esta frecuencia no es la frecuencia de Larmor porque no hay movimiento de precesión y, por lo tanto, no hay un momento dipolar magnético adicional. Si la velocidad orbital de las partículas se acerca a la velocidad de la luz, la masa en movimiento aumenta según la teoría de la relatividad de Einstein. Para las llamadas partículas relativistas, la masa de la partícula hay que ajustar con el factor de Lorentz  $\gamma$  y la frecuencia de excitación tiene que reducirse en consecuencia (véase Lección 7).



$$\nu_{ciclotrón} = \frac{1}{2\pi\gamma} \frac{q}{m} \cdot B \quad ; \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

# El paramagnetismo (1)

En caso de que los átomos o moléculas de un material tengan un momento dipolar magnético, se alinean en paralelo a un campo magnético externo. Esto causa una amplificación del campo magnético en el material. El campo magnético interior es más fuerte que el exterior. Si los momentos dipolares magnéticos no están acoplados, el campo magnético interior cae a cero al retirar el campo magnético exterior debido al movimiento térmico de las partículas. Sin un campo magnético externo, los materiales paramagnéticos no muestran ningún orden magnético. Los materiales con este comportamiento se denominan paramagnéticos. Su susceptibilidad  $\chi$  es ligeramente positiva. El paramagnetismo sólo aparece en sustancias cuyos átomos o moléculas tienen electrones no en pares y, por tanto, queda un momento angular. El momento angular total de un estado atómico está siempre relacionado con un momento dipolar magnético.



# El paramagnetismo (2)

El momento angular total resulta de 3 componentes:

el espín de los electrones,

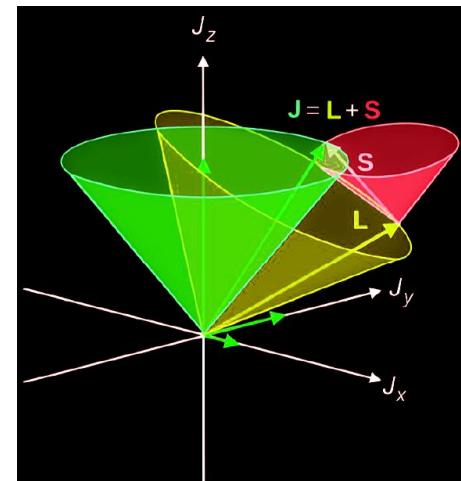
el momento angular orbital de los electrones,

el espín nuclear de los nucleones.

La contribución más importante a la susceptibilidad paramagnética  $\chi$  consiste del momento angular orbital de los electrones  $L$  y de su espín  $S$ . Estos se acoplan a un momento angular total  $J$ . La imagen ilustra la adición vectorial del momento angular orbital  $L$  (amarillo) y del espín  $S$  (rojo) al momento angular  $J$  (verde). El momento angular total  $J$  de un estado atómico siempre lleva un momento dipolar magnético. Ya que la orientación de los momentos dipolares magnéticos atómicos individuales está perturbada por el calor, la susceptibilidad depende de la energía térmica  $kT$ . Esto se expresa en la ley de Curie.

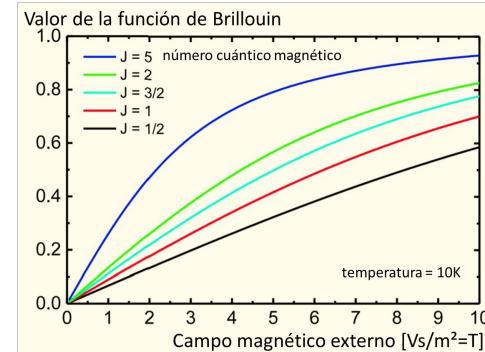
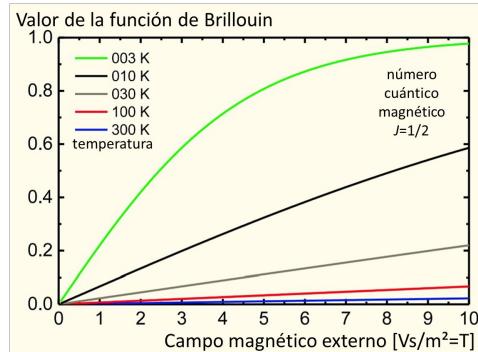
$$\chi = C/T$$

$C$ : constante de Curie



# El paramagnetismo (3)

Una descripción básica de la susceptibilidad de los materiales paramagnéticos se consigue con la función de Langevin. Concretamente, hay que considerar la mecánica cuántica. De este modo, el momento angular total sólo puede asumir determinados valores con su correspondiente momento dipolar magnético. El cálculo de la susceptibilidad  $\chi$  como función del número cuántico magnético, del valor del momento dipolar, de la temperatura y del campo magnético externo se puede calcular con la función de Brillouin. Un resultado es que una saturación magnética solo está indicada para grandes números cuánticos, una temperatura muy baja y un campo magnético externo bastante fuerte. Es decir, en condiciones normales, el campo paramagnético aumenta linealmente con el campo magnético externo.



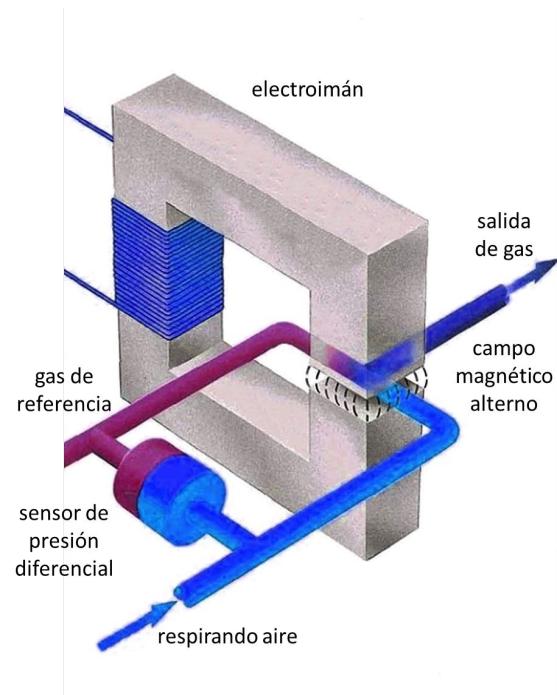
# Aplicaciones médicas

Material	Susceptibilidad $\chi$
Aluminio	$2.3 \cdot 10^{-5}$
Platino	$1.9 \cdot 10^{-5}$
Titanio	$7 \cdot 10^{-5}$
Hidrógeno	$8 \cdot 10^{-9}$
Oxígeno	$1.4 \cdot 10^{-5}$
Aire	$10^{-6}$

Un método de análisis se basa en las propiedades paramagnéticas de las moléculas de oxígeno. El oxígeno tiene una susceptibilidad  $\chi$  mucho mayor que otros gases. Las sustancias paramagnéticas siguen al campo magnético externo en su magnetización, de modo que son atraídas hacia intensidades más altas. Es decir, en una mezcla de gases, solo las moléculas de  $O_2$  sienten una fuerza adicional en un campo magnético no homogéneo. Esta propiedad se utiliza en el análisis del aire inhalado o exhalado.

# Sensor de oxígeno

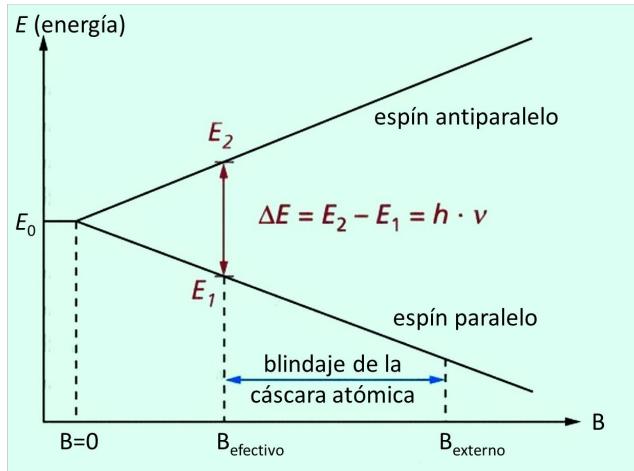
El gas de muestra – un flujo respiratorio – se expone a un fuerte campo electromagnético junto con un gas de referencia. Mientras se enciende y se apaga el campo magnético rápidamente, se crea una diferencia de presión que cambia con el mismo ritmo en las 2 líneas de suministro como reacción de las moléculas de  $O_2$  a las fuerzas magnéticas. Un sensor de presión convierte las fluctuaciones en una señal eléctrica. El voltaje medido es proporcional a las diferentes presiones parciales de oxígeno en ambas líneas de suministro de gas. El proceso de medición funciona continuamente al mismo tiempo y, por lo tanto, es adecuado para la calorimetría indirecta, es decir, la medición del consumo de  $O_2$  y las emisiones de  $CO_2$ . De esto se puede derivar el cociente respiratorio y el gasto energético. Tal sistema es una parte importante de la vigilancia y el cuidado médicos intensivos de los pacientes.



# Resonancia magnética nuclear (1)

La contribución del momento dipolar magnético de los nucleones del núcleo atómico al paramagnetismo es muy pequeña, pero los mismos principios se aplican al momento angular del núcleo atómico en un campo magnético externo. Como los núcleos llevan una carga eléctrica y las cargas en rotación generan un campo magnético, todos los núcleos atómicos con un momento angular poseen su propio momento dipolar magnético. Sin un campo magnético externo, los estados energéticos de los núcleos magnéticos muestran la misma energía , pero son diferentes en la dirección de su momento angular. En un campo magnético externo homogéneo, los núcleos interactúan con el campo a través de sus momentos dipolares magnéticos. En este proceso, los núcleos asumen estados energéticos discretos como función de sus números cuánticos de espín  $S$ . Para los núcleos con espín  $1/2$  hay 2 orientaciones de los momentos magnéticos, los espines pueden alinearse paralelos o antiparalelos al campo magnético externo. La diferencia entre los 2 niveles de energía resultantes ( $E1$  y  $E2$ ) es proporcional a la intensidad del campo magnético externo y al momento magnético del nucleón investigado.

# Resonancia magnética nuclear (2)



Si se aplica un campo electromagnético alterno de alta frecuencia con la cantidad exacta de energía (frecuencia de Larmor) correspondiente a la distancia entre los niveles de energía, se produce una resonancia entre el campo alterno irradiado y los núcleos. Esto hace que las transiciones entre niveles adyacentes de los núcleos se produzcan en ambas direcciones, es decir, del nivel inferior al superior (absorción) y del superior al inferior (emisión inducida). Debido a la ocupación algo más densa del nivel de energía inferior, la absorción predomina en el experimento de resonancia.

# Tomografía de resonancia magnética (1)

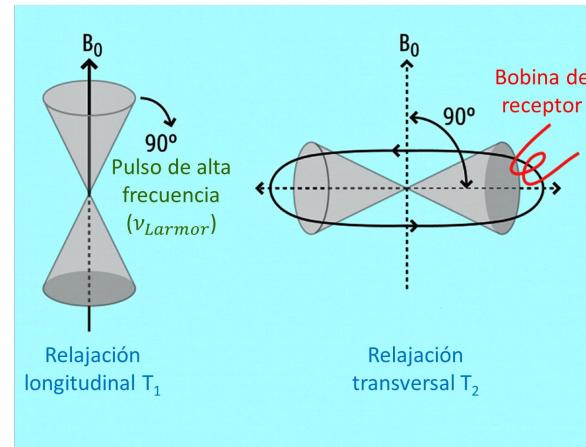
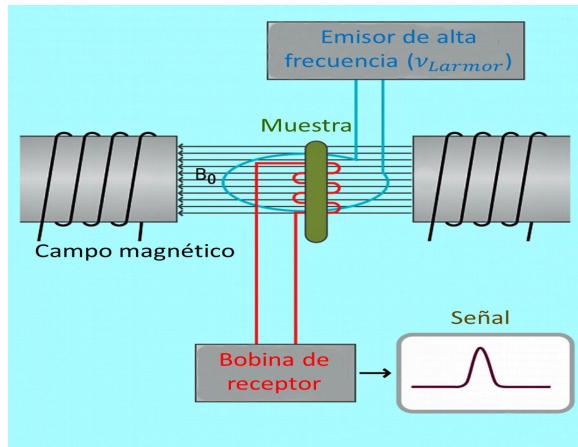
La aplicación médica de la espectroscopia de resonancia magnética nuclear (NMR) es la tomografía de resonancia magnética (MRT).

Núcleo atómico	Espín [ $\frac{\hbar}{2\pi}$ ]	Relación giromagnética [ $10^8/T.s$ ]	Frecuencia de resonancia magnética nuclear (Larmor) [MHz] $B_{externo} = 2.3488 [T]$	Intensidad de señal normalizada
Hidrógeno	$\frac{1}{2}$	2.6752	100	1.000
Carbón	$\frac{1}{2}$	0.6725	25.144	0.0159
Fósforo	$\frac{1}{2}$	1.0829	40.481	0.0663

La señal más grande es causada por el hidrógeno, es decir, los protones. Esto aprovecha el efecto de que más de dos tercios del cuerpo humano están formados por agua.

# Tomografía de resonancia magnética (2)

Como la separación de niveles es relativamente pequeña, hay que aplicar un fuerte campo magnético externo de 1 Tesla o más. Una bobina de alta frecuencia ajustable emite un campo electromagnético alterno. Si la frecuencia de emisión corresponde a la energía de los niveles  $E1$  y  $E2$  separada en el campo magnético, se consigue la resonancia de espín nuclear. La mayoría de los núcleos cambian al nivel de energía más alto por la absorción de energía. Tras la entrada de energía, las bobinas de alta frecuencia se apagan y pueden utilizarse como receptores o la bobina receptora se dispone por separado.



# Tomografía de resonancia magnética (3)

Después de la desconexión, el movimiento de precesión cede con diferentes tiempos de relajación,  $T_1$  (*relajación longitudinal*),  $T_2$  (*relajación transversal*), hasta que se alcanza de nuevo el estado inicial. Durante este tiempo de relajación, se induce una voltaje alterna de alta frecuencia en la bobina del receptor, que proporciona la señal de medición de la densidad de los protones  $\rho_{proton}$ .

$$\text{Señal} \sim \rho_{proton} \cdot \left(1 - e^{\frac{t_{repetición}}{T_1}}\right) \cdot e^{\frac{t_{eco\ de\ espín}}{T_2}}$$

La intensidad de la señal se muestra codificada en valores grises. Mediante una valoración diferente de los tiempos de relajación y de la densidad de protones, se pueden mostrar distintas informaciones en una imagen. En la valoración  $T_1$ , por ejemplo, el tejido graso se muestra de forma brillante. En la valoración  $T_2$  aparecen estructuras llenas de líquido con una gran intensidad. La valoración de la densidad de protones son adecuados para la reproducción del cartílago.

# Tomografía de resonancia magnética (4)

Tejido corporal	Tiempo de relajación $T_1$ [ms]	Tiempo de relajación $T_2$ [ms]
Músculo cardíaco	750	57
Grasa	240	84
Materia cerebral blanca	780	90
Materia cerebral gris	920	100
Líquido cerebral	3000	1400

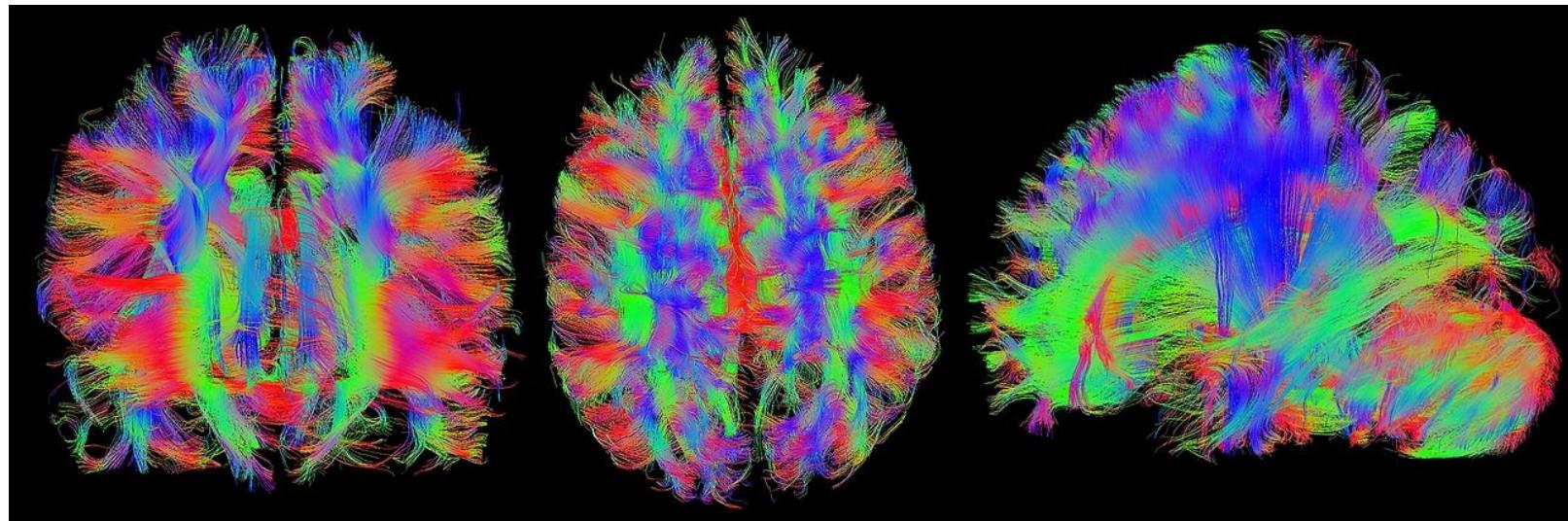
La obtención de imágenes sólo puede realizarse si se aplica un campo magnético dependiente de la posición (campo de gradientes).

$$B(x, y, z) = B_0 + B(x) + B(y) + B(z)$$

Así, se cumple la condición de resonancia entre la frecuencia de Larmor,  $\nu_{Larmor}$ , y el campo magnético  $B$  para los volúmenes parciales. Estos volúmenes parciales se reúnen mediante ordenador con el resultado de imágenes seccionales bidimensionales y tridimensionales.

# Tomografía de resonancia magnética (5)

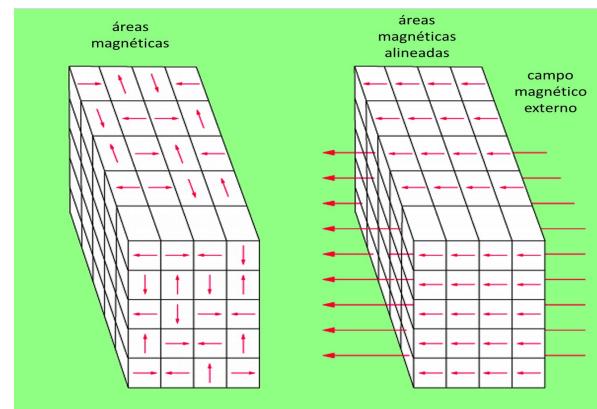
A partir del diferente contenido de agua del tejido se pueden extraer conclusiones sobre posibles cambios patológicos. Este procedimiento de análisis médico es muy exigente en términos de física y matemáticas. La ventaja es que permite obtener imágenes que no pueden captarse con rayo- X y no requiere ninguna radiación de ionización.



# El ferromagnetismo (1)

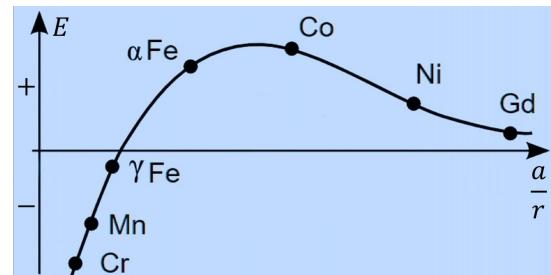
Se llama ferromagnético a un material que, por debajo de la temperatura de Curie, los momentos magnéticos de los átomos se alinean en paralelo. La alineación de los imanes elementales conduce a una magnetización espontánea de áreas más grandes donde los imanes elementales están alineados en paralelo. Esto distingue los ferromagnéticos de los paramagnéticos, en los cuales los momentos magnéticos son normalmente desordenados. Cuando el material se expone a un campo magnético externo, las áreas que se magnetizan en sentido contrario al campo magnético externo se someten y se alinean con las demás. Esto genera una magnetización macroscópica cuyo campo se superpone al externo.

Los elementos hierro, cobalto y níquel son ferromagnéticos a temperatura del ambiente. A temperaturas más bajas, algunos lantánidos también son ferromagnéticos, por ejemplo Gadolinio hasta 19.3 ° C.



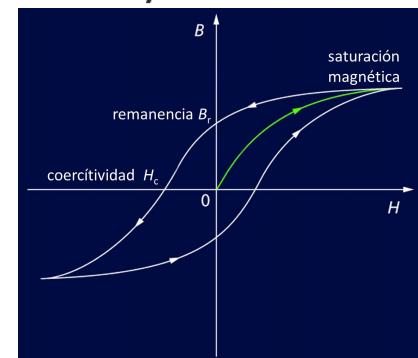
# El ferromagnetismo (2)

Los momentos magnéticos son causados por los espines de los electrones. En el ferromagnetismo, la interacción magnética dipolo-dipolo no es suficiente para ser responsable del ordenamiento de los espines. En el caso del ordenamiento ferromagnético, existe el hecho adicional de que la alineación paralela de los momentos magnéticos es energéticamente desfavorable para la interacción dipolo-dipolo. La responsable del orden de espín paralelo del ferro-magneto es la llamada interacción de intercambio. La posición paralela espontánea de los espines y, por tanto, un orden ferromagnético sólo se produce si la disminución de la energía potencial (interacción de intercambio) compensa el aumento de la energía cinética (interacción dipolo-dipolo). Por ello, sólo unos pocos elementos, compuestos químicos o aleaciones son ferromagnéticos. Se puede graficar la energía de la interacción de intercambio como función del cociente entre la distancia de átomos adyacentes  $a$  y el diámetro de la capa ( $3d$ ) de electrones  $r$  que no está completamente llena.



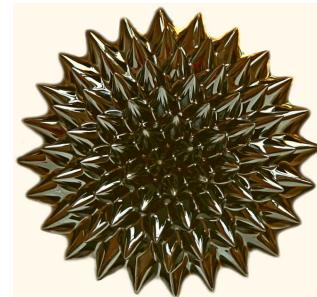
# El ferromagnetismo (3)

Los materiales ferromagnéticos se clasifican según el comportamiento que presentan cuando se alejan de un campo magnético. Por lo general, queda un magnetismo residual, la llamada remanencia. En los materiales magnéticos blandos la remanencia es baja, es decir, la magnetización se pierde cuando el objeto se retira del campo magnético externo o cuando se aplica un campo alterno. Estos muestran una pequeña pérdida de energía durante la desmagnetización, que se expresa en una estrecha curva de histéresis. Por lo tanto, estos materiales son adecuados para transformadores, motores y todo tipo de aparatos eléctricos. Los materiales magnéticos duros son más difíciles de magnetizar, pero conservan una mayor magnetización permanente y son adecuados como imanes permanentes. La permeabilidad relativa  $\mu_r$  de las sustancias ferromagnéticas está entre 300 y 300000. Los imanes permanentes de acero logran una intensidad del campo magnético  $B$  de 0.1 T, mientras que los imanes especiales, como los materiales sinterizados de NdFeB, son capaces de alcanzar 1.5 T.



# El ferromagnetismo (4)

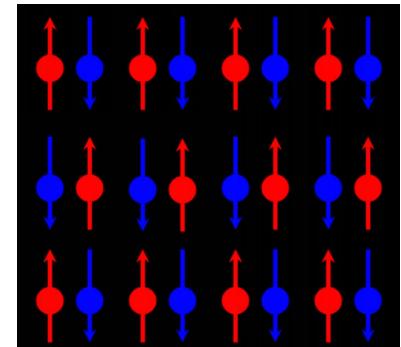
Sustancia	Temperatura de Curie [K]
Hierro	1040
Cobalto	1400
Níquel	627
Gadolinio	292
Óxido de cromo ( $\text{CrO}_2$ )	390
Óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	948
Bismuto de manganeso	630
NdFeB	~ 610
Aleación Heusler Cu <sub>x</sub> MnAl	630



Existen muchos descubrimientos relacionados con el ferromagnetismo que han originado importantes aplicaciones técnicas. Uno de ellos es la magnetorresistencia gigante, que permitió aumentar enormemente la densidad de almacenamiento de los discos duros. Otra es la realización de fluidos ferromagnéticos, que pueden utilizarse como pasamuros herméticos al aire y al vacío. Hay mucho más que explorar en estas áreas.

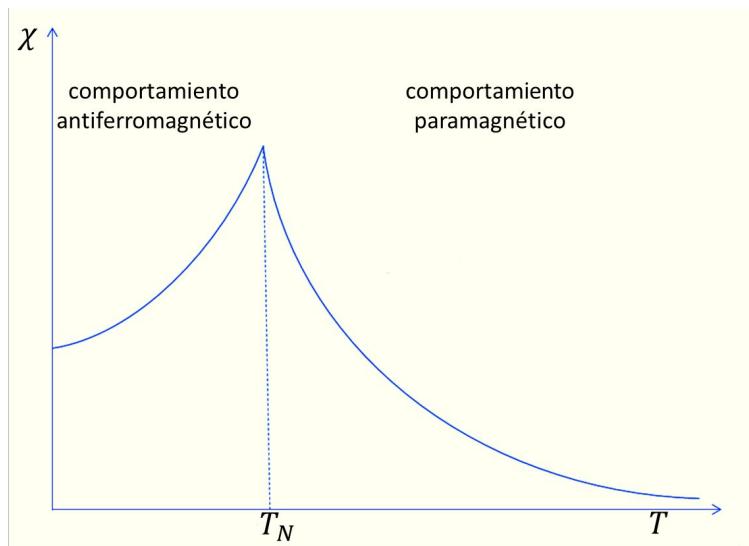
# El antiferromagnetismo (1)

Existe antiferromagnetismo cuando los respectivos imanes elementales adyacentes tienen el mismo momento dipolar magnético en términos de magnitud, pero su orientación es opuesta entre sí. Los materiales ordenados antiferromagnéticamente no tienen momento dipolo magnético permanente externo debido a la orientación antiparalela de los imanes elementales. Al igual que en los ferromagnetos, se forman áreas antiferromagnéticas dentro de las cuales los momentos magnéticos tienen la misma posición espacial. Este orden es estable mientras no se supere un límite de temperatura. La temperatura de Néel  $T_N$  marca la transición de fase reversible de los materiales antiferromagnéticos a su forma paramagnética por alta temperatura. Por encima de la temperatura de Néel, la susceptibilidad magnética  $\chi$  sigue la ley de Curie-Weiss en una buena aproximación.



$$\chi = \frac{C}{T + T_N}$$

# El antiferromagnetismo (2)



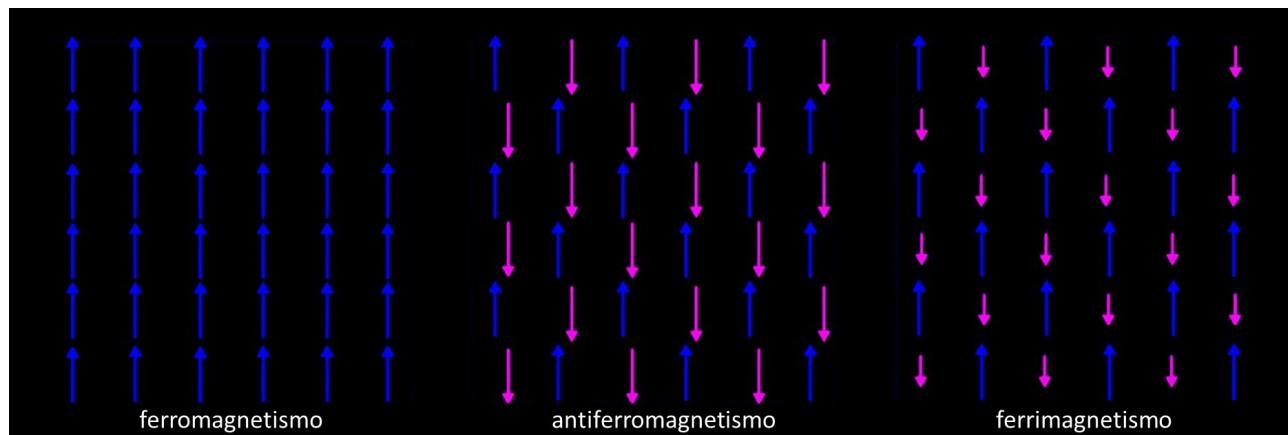
Sustancia	Temperatura de Néel [K]
MnTe	307
FeO	198
MnO	116
NiCl <sub>2</sub>	50
CoCl <sub>2</sub>	25

La estructura antiferromagnética también puede explicarse por una interacción de intercambio.

Los antiferromagnéticos pueden acoplarse a los ferromagnéticos haciendo que los átomos de la superficie del ferromagnético se alineen con los átomos de la superficie del antiferromagnético. Esto fija la orientación de una película ferromagnética, que es la base de los sensores magnéticos.

# El ferrimagnetismo (1)

El ferrimagnetismo se distingue del ferromagnetismo no por la colocación de las áreas magnéticas, sino por el orden magnético de los imanes elementales. Las magnetizaciones de 2 imanes elementales adyacentes se anulan parcialmente, dando lugar a regiones magnetizadas más débiles. El comportamiento macroscópico es una forma más débil del ferromagnetismo.



Los materiales se denominan ferritas y son cerámicas eléctricamente aislantes compuestas por el óxido de hierro hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), o magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y otros óxidos metálicos.

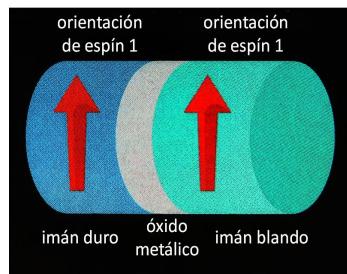
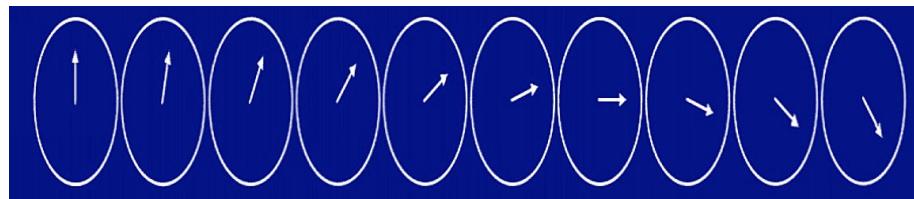
# El ferrimagnetismo (2)

Las ferritas se utilizan principalmente como componentes en la tecnología de alta frecuencia debido a las pérdidas extremadamente bajas (supresión de las corrientes parásitas) en el núcleo de ferrita. Dependiendo de su composición, las ferritas son magnéticas duras o blandas. Las ferritas magnéticas duras ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) se utilizan en motores eléctricos excitados por imanes permanentes y en altavoces. Mezclado con un termoplástico durante la producción, se producen empaquetaduras flexibles y elásticos, por ejemplo, para puertas (refrigerador, ducha y más). Las ferritas magnéticamente blandas ( $\text{Mn}_a\text{Zn}_{(1-a)}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) se encuentran en antenas, reactancias y transformadores de radio, televisión y radar. Una aplicación especial es el revestimiento de ferrita blanda en la tecnología de baja detectabilidad para hacerlos menos visibles a los radares.



# Fenómenos magnéticos especiales

Otra estructura magnética es la hélice. Aquí, la magnetización gira en torno a un ángulo entre planos de red adyacentes en un sólido. La causa es una interacción de intercambio superpuesta (por ejemplo, en los metales con capas de electrones 4f), por lo que una ligera rotación de los espines hacia el siguiente plano de la red puede ser energéticamente más favorable.



En tecnología informática, el efecto túnel magnético se utiliza para almacenar datos digitales en forma de la orientación del espín del electrón. El dispositivo de dimensiones de unos pocos nanómetros consiste en un imán con una magnetización fija (imán duro) que está aislado por un óxido metálico de un imán variable (imán blando). El espín del imán variable puede asumir la orientación uno o cero cuando se pasa una corriente polarizada, dependiendo de su dirección. Esto se llama transferencia de espín y es la base del área de la espintrónica.