الفصل السادس : الخواص المغناطيسية للمواد

عرفت المواد المغناطيسية منذ زمن بعيد, واول ما عرف منها حجر المنغايت (Fe_3O_4) في مقاطعة مغنيسيا.

وتم استخدام الصفة المغناطيسية بخيط من قبل البحارة لتحديد الاتجاه, وذلك بتعليقهم قطعة مغناطيسية بخيط في الهواء فتتجه باتجاة القطب الشمالي والقطب الجنوبي للمجال المغناطيسي الارضي.

وتطلق اليوم كلمة المغناطيسية على المواد التي تظهر استجابة واضحة للمجال المغناطيسي الخارجي المسلط عليها. ومن اهم المواد المغناطيسية المعروفة الحديد والنيكل والكوبلت ومادة المنغايت. وقد وجد بان الخاصة المغناطيسية تتأثر كثيراً بدرجات الحرارة.

التأثرية المغناطيسية

Magnetic Susceptibility(χ)

تعرف التأثرية المغناطيسية على انها نسبة المغناطيسية او العزم المغناطيسي لوحدة الحجم الى المجال المغناطيسي المؤثر (H), أي ان

$$\chi = \frac{M}{H} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

وتعد التأثرية المغناطيسية مقياساً لمدى استجابة المادة المغناطيسية الى المجال المغناطيسي المسلط عليها. ان العلاقة بين العزم المغناطيسي لوحدة الحجم M والمجال المغناطيسي المؤثر H علاقة غير خطية للكثير من المواد المغناطيسية وعليه فان قيم التأثرية المغناطيسية لا تعتمد على شدة المجال المغناطيسي المؤثر فحسب بل تعتمد على عوامل اخرى منها

التركيب المغناطيسي للمادة وعلى درجة الحرارة. تتوزع قيم التأثرية المغناطيسية على مدى واسع يتراوح من 10^{-6} للمواد ضعيفة المغناطيسية الى حوالي 10^{6} أو أكثر للمواد ذات المغناطيسية القوية, فضلاً عن ان قيمها تكون سالبة لبعض انواع المواد المغناطيسية.

تصنيف المواد المغناطيسية Classification of Magnetic Materials

اعتماداً على قيم التأثرية المغناطيسية للمواد وعلاقتها بدرجة الحرارة يمكن تصنيف المواد المغناطيسية الى الاصناف الريئسية الآتية:

1- المواد الدايامغناطيسية.
2- المواد البارامغناطيسية.
3- المواد الفيرومغناطيسية.
4- المواد ضديدة الفيرومغناطيسية.
5- المواد الأخرى.

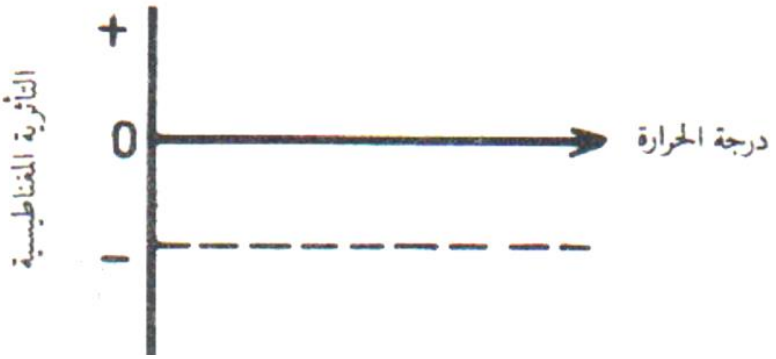
المواد الدايامغناطيسية Diamagnetic Materials

وهي المواد التي تكون تأثريتها المغناطيسية

1- سالبة
2- قليلة جداً (10^{-5}).

ان أصل الخاصية الدايامغناطيسية هو الحركة المدارية لالكترونات الاغلفة المشبعة حول النواة والتي تستحدث نتيجة تسليط مجال مغناطيسي مؤثر على المادة. اذ ان المجال المؤثر يحدث تغيراً في حركة الالكترونات والذي يعني احداث تغير في العزم المغناطيسي لهذه الالكترونات, وهذا معناه ان ذرات المادة الدايامغناطيسية لا تملك عزم مغناطيسية دائمة, بل تمتلك عزوم مغناطيسية محتثة ضعيفة غير دائمية تزول بزوال تأثير المجال المغناطيسي المسلط على المادة. ان اتجاه العزم المغناطيسي المحتث يكون معاكساً لاتجاه المجال المغناطيسي المسلط. ومن أشهر المواد الدايامغناطيسية الغازات الخاملة والمركبات ذات المدارات الالكترونية المغلقة ومعظم المواد الصلبة الايونية والجزيئية والمركبات

العضوية. وان الخاصية الدايامغناطيسية لا تعتمد على اتجاه العزم داخل المادة ولا تعتمد على درجة الحرارة. ان جميع المواد على اختلاف انواعها تمتلك الخاصية الدايامغناطيسية ولكنها قد تكون ضعيفة جداً واقل بكثير من الخواص المغناطيسية الأخرى, فضلاً عن ان جميع المواد تصبح دايامغناطيسية في درجات الحرارة العالية جداً. ان الصفة الدايامغناطيسية صفة مؤقتة تزول بزوال المجال المغناطيسي المؤثر المسلط على المادة, وتظهر مجدداً بوجود المجال المذكور. الشكل (1) يبين علاقة التأثرية المغناطيسية مع درجة الحرارة للمواد الدايامغناطيسية.



الشكل (1) علاقة التأثرية المغناطيسية مع درجة الحرارة للمواد الدايامغناطيسية

الجدول (2) قيم التأثرية المغناطيسية لبعض المواد الدايامغناطيسية

المادة	التأثرية المغناطيسية $\times 10^{-5}$
البزموث Bi	− 16
الزئبق Hg	− 2.9
الكالسيوم Ca	− 2.3
النحاس Cu	− 1.0
السليكون Si	− 0.4
الذهب Au	− 3.6
الماء H_2O	− 9.0
الهيدروجين H_2	− 0.2
النتروجين N_2	− 5.0

المواد البارامغناطيسية Paramagnetic Materials

وهي المواد التي تتصف تأثريتها المغناطيسية بما يأتي:

1- موجبة.
2- قليلة تتراوح بين 10^{-3} الى 10^{-5} .

تظهر الخاصية البارامغناطيسية في الذرات او الجزيئات التي تمتلك عدداً فردياً من الالكترونات التي تعمل على اعطاء عزم مغناطيسي دائم للذرة او الجزيئة. كما تتصف الذرات والجزيئات الحاوية على مدارات غير مشبعة بالخاصية البارامغناطيسية حتى وان امتلكت لعدد زوجي من الالكترونات. وهذا يعني ان الخاصية البارامغناطيسية صفة متأصلة في المادة ولا تستحدث نتيجة لتأثير المجال المغناطيسي الخارجي المؤثر عليها. وفي حالة وجود المجال المذكور فان معدل اتجاهات العزوم سيأخذ اتجاهاً موزازياً لاتجاه المجال المسلط والمؤثر على المادة. ان المغناطيسية الناتجة عن هذا الاصطفاف للعزوم المغناطيسية تكون ضعيفة, والسبب في ذلك يعود الى ان العزوم المذكورة تكون ضعيفة ومتباعدة عن بعضها البعض. الشكل (2) يوضح ترتيب العزوم المغناطيسية للمادة البارامغناطيسية. ان الاتجاهات المبعثرة للعزوم سيجعل المغناطيسية للمادة مساوية للصفر في حالة عدم وجود المادة داخل المجال المغناطيسي المؤثر. تتناسب التأثرية المغناطيسية لهذه المواد تناسباً عكسياً مع درجة الحرارة, أي ان:

$$\chi \ \alpha \ \frac{1}{T}$$

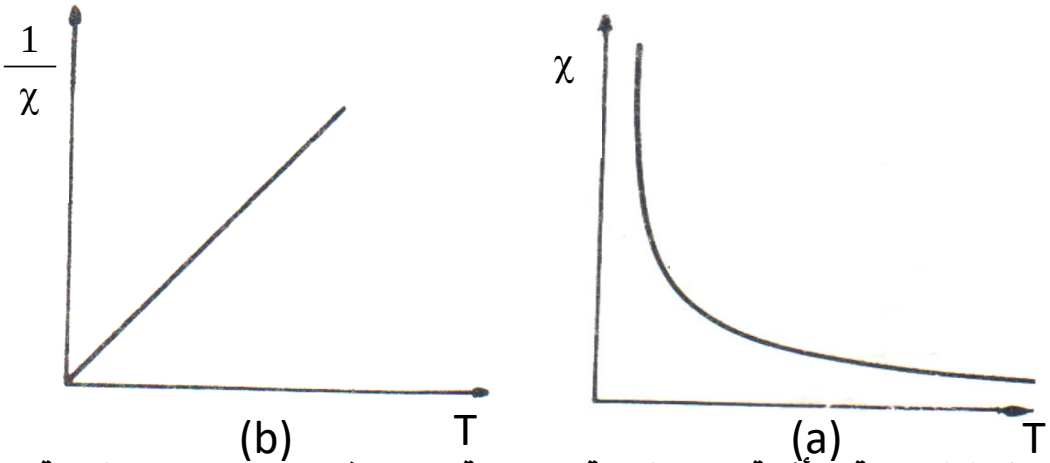
الشكل (2) يوضح ترتيب العزوم في المواد البارامغناطيسية

وفي حالة وجود مجال مغناطيسي ذي قيمة معقولة (ولكنها ضعيفة) فان علاقة التأثيرية المغناطيسية ودرجة الحرارة تكون خطية وكما يأتي:

$$\chi = \frac{C}{T} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

يعرف هذا القانون بقانون كوري, و C تمثل ثابت التناسب (ثابت كوري).

الشكل (3) يوضح العلاقة بين χ و $\frac{1}{\chi}$ مع درجة الحرارة للمواد



الشكل (3) علاقة التأثرية المغناطيسية مع درجة الحرارة في المواد البارامغناطيسية

الجدول (3) يبين قيم التأثرية المغناطيسية لبعض المواد البارامغناطيسية

المواد		التأثرية المغناطيسية $\chi \times 10^{-5}$
الكالسيوم	Ca	1.9
الليثيوم	Li	2.1
الالمنيوم	Al	2.2
الكروميوم	Cr	27
البلاتين	Pt	29
الصوديوم	Na	0.9
الاوكسجين	O_2	0.2
المنغنيز	Mn	98
التنكستن	W	36

المواد الفيرومغناطيسية Ferromagnetic Materials

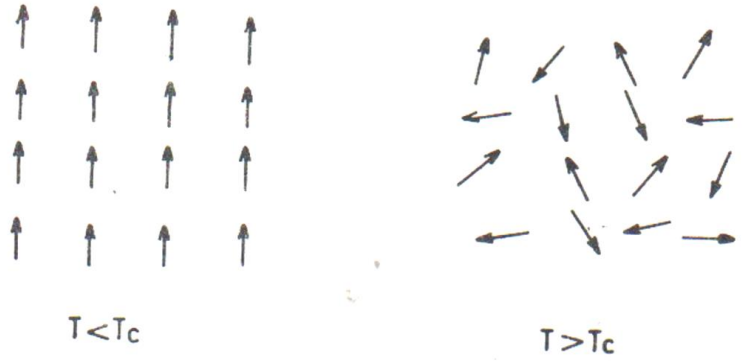
ان وجود مواد ذات مغناطيسية دائمية في درجة حرارة الغرفة معروف منذ زمن بعيد, ومن اشهر هذه المواد الحديد وأوكسيده Fe_3O_4 إذ استخدما منذ العصور القديمة من قبل البحارة في ايجاد الاتجاه, وذلك لامتلاكه المغناطيسية الدائمة التي تتاثر بالمجال المغناطيسي الارضي. تنشأ الخاصية الفيرومغناطيسية من الالكترونات المنفردة ذات العزم المغناطيسي الدائم, أو من تراصف هذه العزوم وباتجاه واحد تنشأ هذه الخاصية. ومن اهم العناصر الفيرومغناطيسية المعروفة هي الحديد والكوبلت والنيكل والكادولونيوم والدسبروسيوم التي تملك درجات حرارة كوري (Curie Temperature, T_C) **(**1043K و 1395 و631 و289 و 85 درجة كلفنية على الترتيب.

تتحول المواد الفيرومغناطيسية الى مواد بارامغناطيسية. اذا اصبحت درجة حرارتها اكبر من درجة حرارة كوري وعند تبريدها الى اقل من درجة حرارة كوري فانها تتحول مرة ثانية الى الصفة الفيرومغناطيسية. تزداد التأثرية المغناطيسية كلما أقتربنا من درجة حرارة كوري. ان التأثرية المغناطيسية للمادة في الدرجات الحرارية الاعلى من درجة حرارة كوري تتغير مع درجة الحرارة بحسب قانون خاص يسمى قانون كوري – وايز Curie – Weiss Law الذي يمكن كتابته كما يأتي :

$$\chi = \frac{C}{T - \theta_C} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

حيث ان θ_C تمثل درجة حرارة موجبة.

تتراصف العزوم المغناطيسية كما في الشكل (4) عندما تكون درجة حرارة المادة اكبر من واقل من درجة حرارة كوري. الجدول (4) يوضح أهم الـ



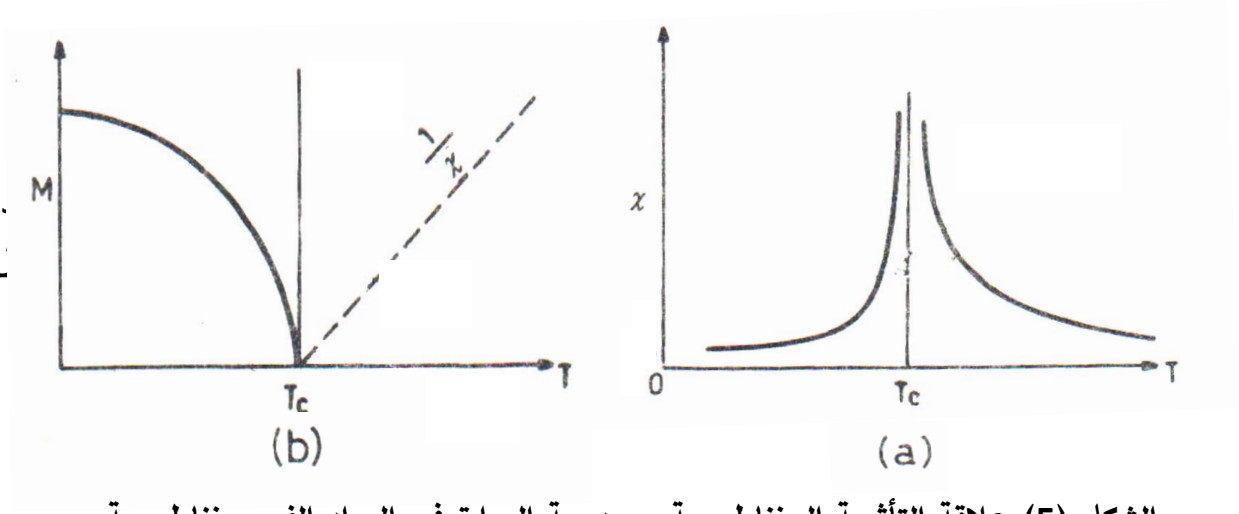
الشكل (4) ترتيب العزوم في المواد الفيرومغناطيسية

الجدول (4) يوضح اشهر العناصر الفيرومغناطيسية ودرجة حرارة كوري لها

العنصر	Tc (K)
Fe	1043
CO	1388
Ni	637
Gd	293
Dy	85

تتغير التأثيرية المغناطيسية للمواد الفيرومغناطيسية مع درجة الحرارة كما في الشكل (5a).

تزداد مغناطيسية المادة كلما انخفضت درجة الحرارة وتصل اعلى قيمة لها عند درجة الصفر الكلفنية وتقل كلما ارتفعت درجة الحرارة وتصل الى



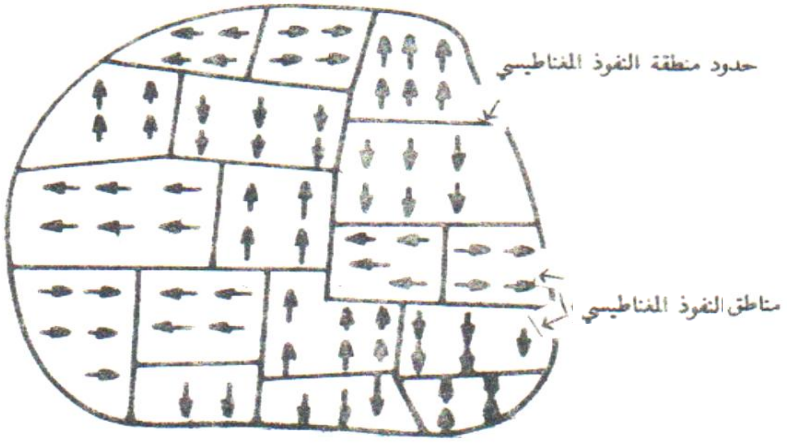
الشكل (5) علاقة التأثرية المغناطيسية مع درجة الحرارة في المواد الفيرومغناطيسية

أما إذا انخفضت درجة حرارة المادة الى ما دون الدرجة الحرجة Tc فانها تتحول مرة اخرى الى الطور الفيرومغناطيسي, أي حالة انتظام العزوم المغناطيسية باتجاه واحد. وهذا يعني ان المادة تكون ممغنطة ذاتياً من دون التأثير عليها بمجال مغناطيسي خارجي مؤثر. بقيت ظاهرة المغناطيسية الذاتية وبالتالي النظرية الفيرومغناطيسية مبهمة الى ان جاء العالم وايز Weiss الذي افترض (نظرية المجال الجزيئي) (Molecular Field Theory) والذي يتصف بما يأتي:

1- انه مجال ذاتي يؤثر في المادة المغناطيسية.
2- له قيمة عالية, اذا انه يستطيع ان يمغنط المادة الى حد الاشباع, حتى في حالة عدم وجود مجال مغناطيسي خارجي مؤثر. وبتأثير هذا المجال تكون المادة ممغنطة حد الاشباع بصورة ذاتية.

كما استطاع العالم وايز ان يفسر حالة وجود مواد فيرومغناطيسية حديدية في حالة عدم تمغنط في درجة حرارة الغرفة بأفتراضه ان المادة مقسمة الى مناطق مغناطيسية تسمى مناطق النفوذ المغناطيسي

Magnetic Domains وهي مناطق مفصولة عن بعضها البعض بحاجز يدعى بـ حائط المنطقة المغناطيسية Magnetic Domain Wall . ان كل منطقة من هذه المناطق تكون ممغنطة ذاتياً حد الاشباع ويكون اتجاه العزوم في كل منطقة معاكس لاتجاه المنطقة المجاورة إذ ان المغناطيسية الكلية للمادة تساوي صفراً. ان سبب تحول المادة الى مادة ذات مناطق نفوذ مغناطيسية متعددة, يعود الى ان الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي تكون كبيرة, اما اذا قسمت المادة الى مناطق ممغنطة متعددة وباتجاهات متعاكسة فان الطاقة المخزونة ستكون أقل بكثير مما هي عليه في حالة المنطقة المنفردة. الشكل (6) يوضح مناطق النفوذ المغناطيسي في المواد الفيرومغناطيسية.



الشكل (6) مناطق النفوذ المغناطيسي في المواد الفيرومغناطيسية

المواد ضديدة الفيرومغناطيسية Anti - Ferromagnetic Materials

من أشهر العناصر ضديدة الفيرومغناطيسية الكروم Cr والسيريوم Ce والمنغنيز $\alpha - Mn$ وتتصف المواد ضديدة الفيروالمغناطيسية بأن تأثريتها قليلة ولكنها موجبة لجميع درجات الحرارة. ان العزوم المغناطيسية لذرات

او جزيئات هذه المواد تكون مرتبة بشكل صفوف متوازية ومتشابهة. ولكن اتجاهات العزوم فيها تكون في صفوف متضادة, كما في الشكل (7).

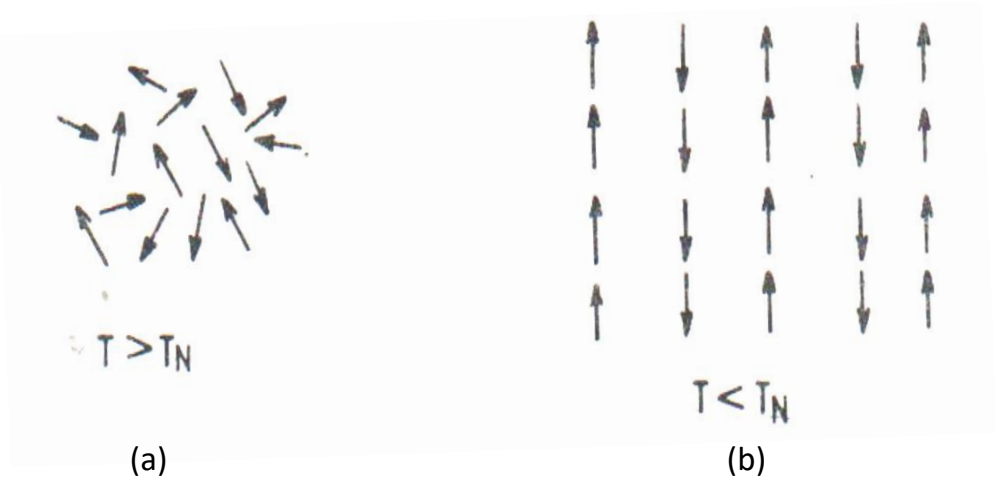
تمتلك هذه المواد درجة حرارة حرجة تسمى درجة حرارة نيل Neel Temperature (T_N) اذ تكون المادة تحت هذه الدرجة مادة ضديدة الفيرومغناطيسية وتترتب العزوم كما في الشكل (7b-). أما إذا كانت المادة عند درجة حرارة اعلى من درجة حرارة نيل فان المادة تتحول الى الطور البارامغناطيسي, الذي تكون فيه العزوم مبعثرة باتجاهات مختلفة كما في الشكل (7a). تكون مغناطيسية هذه المواد ضعيفة (صفر تقريباً) وذلك لتشابه العزوم المتضادة. تقل التأثرية المغناطيسية للمواد ضديدة الفيرومغناطيسية كلما انخفضت درجة الحرارة في الطور ضديدة الفيرومغناطيسية. الشكل (8) يوضح علاقة التأثرية المغناطيسية ومقلوبها مع درجة الحرارة.

ينطبق قانون كوري – وايز على التأثرية المغناطيسية للمواد ضديدة الفيرومغناطيسية في الطور المغناطيسي ويأخذ الصيغة الآتية:

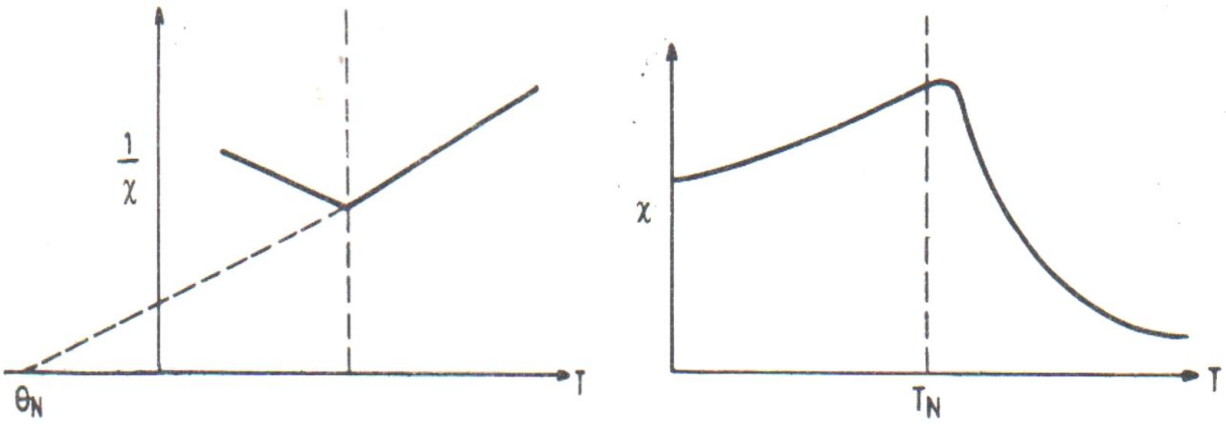
$$\chi = \frac{C}{T - \theta_N} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

إن قيمة θ_N تكون سالبة.

الجدول (5) يحتوي على اهم المواد ضديدة الفيرومغناطيسية ودرجة حرارة نيل لها.



الشكل (7) ترتيب العزوم في المواد ضديدة الفيرومغناطيسية



الشكل (8) علاقة التأثرية المغناطيسية مع درجة الحرارة في المواد ضديدة الفيرومغناطيسية

الجدول (5) بعض المركبات والعناصر ضديدة الفيرومغناطيسية ودرجة

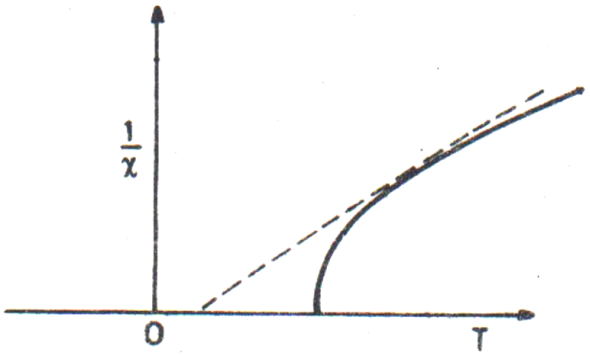
المركب او العنصر	درجة حرارة نيل $T_N(K)$
MnO	122
FeO	198
CuO	453
MnF_2	67
FeF_2	79
CoF_2	38
$CrCl_2$	40
$FeCl_2$	24
$\alpha - Mn$	95
Cr	311

المواد الفيريمغناطيسية Ferrimagnetic Materials

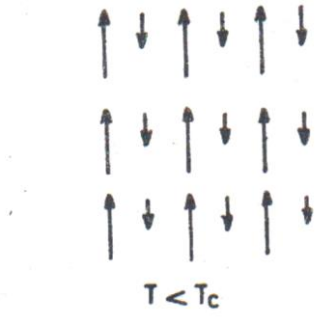
تعد حالة المادة الفيريمغناطيسية حالة خاصة لحالة المواد ضديدة الفيرومغناطيسية. اذ يكون فيها كل صفين متجاورين من العزوم المغناطيسية متعاكسين في الاتجاه, ولكنها تكون غير متساوية في المقدار. وبناء على ذلك ستمتلك المادة الفيريمغناطيسية مغناطيسية ذاتية حتى في حالة عدم وجود المجال المغناطيسي الخارجي على عكس المواد ضديدة الفيرومغناطيسية.

ان تأثرية هذه المواد تقل كلما ارتفعت درجة الحرارة (فوق درجة حرارة كوري). وان العلاقة بين مقلوب التأثرية المغناطيسية ودرجة الحرارة لا تكون خطية. الشكل (9) يوضح هذه العلاقة ان امتداد الجزء الواقع في درجات الحرارة العالية البعيدة عن درجة حرارة كوري يقطع احداثي درجة الحرارة في الجزء الموجب. وتمثل مجموعة الفيرايت (Ferrite) أهم المواد الفيريمغناطيسية وتتمثل هذه المجموعة في الصفة الكيميائية $MO.Fe_2O_3$, حيث تمثل M , عناصر مثل الحديد Fe والنيكل Ni والكوبلت Co والنحاس Cu وغيرها من المواد. وللمواد الفيريمغناطيسية تطبيقات واسعة في الصناعة وتستخدم في صناعة لب المواد الحثية ومخازن المعلومات (الذاكرة). الجدول (6) يبين بعض

المواد الفيريمغناطيسية ودرجة حرارة كوري التابعة لها. اما الشكل (10) فيمثل كيفية ترتيب العزوم المغناطيسية في درجات حرارية اقل من درجة حرارة كوري.



الشكل (9) علاقة التأثرية المغناطيسية مع درجة الحرارة في المواد الفيريمغناطيسية



الشكل (10) ترتيب العزوم المغناطيسية في المواد الفيريمغناطيسية

الجدول (6) بعض المركبات الفيريمغناطيسية ودرجة حرارة كوري

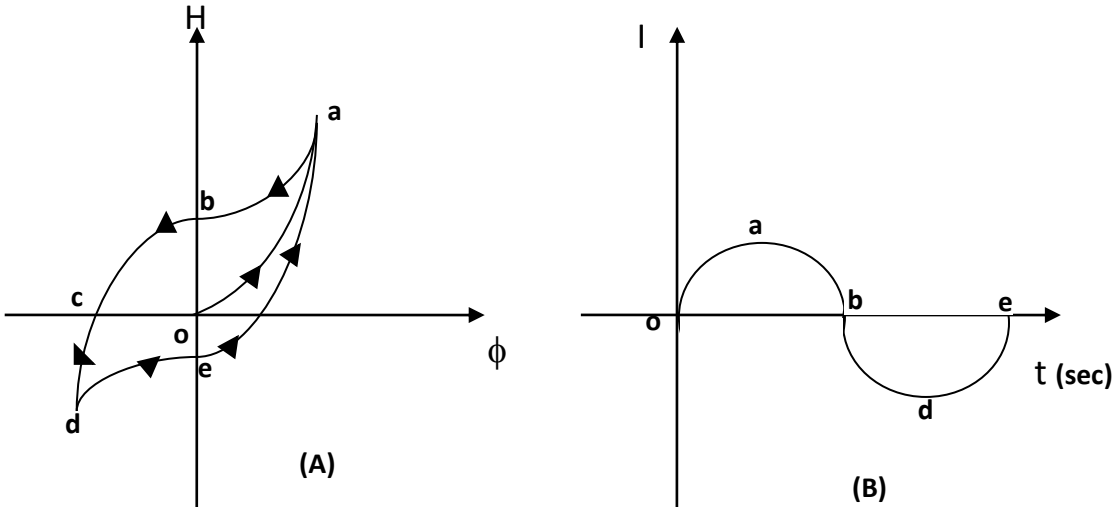
المادة الفيريمغناطيسية	درجة حرارة كوري (K)
Fe_3O_4	858
$CoFe_3O_4$	793
$CuFe_2O_4$	728
$NiFe_2O_4$	858
$MnFe_2O_4$	573
$3\ Gd_2O_3.5Fe_2O_3$	564
$3\ Er_2O_3.5Fe_2O_3$	556

المواد المغناطيسية الأخرى Other Magnetic Materials

هناك انواع أخرى من المواد المغناطيسية غير ما ذكر. وهي على الاغلب حالات خاصة لما سبق, يكون فيها ترتيب العزوم المغناطيسية معقداً كما في الترتيب الحلزوني لبعض العناصر المغناطيسية النادرة ومركباتها. وكذلك ترتيب العزوم المغناطيسية في الزجاجيات المغناطيسية المعدنية البلورية واللابلورية.

الهسترة المغناطيسية

تعرف الهسترة المغناطيسية بأنها ظاهرة تخلف المغناطيسية في المواد الواقعة تحت تأثير مجال مغناطيسي خارجي. تعد هذه الظاهرة سلبية لأنها تسبب ضياع بالطاقة الكهربائية على شكل حرارة, ويمكن توضيح حلقة الهسترة بالمخطط التالي (A), ويمثل المخطط (B) ذبذبة كاملة للتيار.



حيث عند زيادة التيار ووصوله الى أعظم قيمة (a) في الاتجاة الموجب تزداد شدة المجال المغناطيسي (ϕ) الخارجي (المحيط بقلب المحولة) وكذلك يزداد المجال المتولد داخل القلب (H) ووصولهما اعلى قيمة عند (a), وعند هبوط التيار الى الصفر في نقطة (b) نلاحظ هبوط (ϕ) الى الصفر ولكن تبقى كمية من المجال المغناطيسي (H) مخزونة داخل القلب (من $0 \leftarrow b$) باتجاه معين وعند انعكاس التيار سوف ينشا مجال مغناطيسي (ϕ) باتجاه آخر ليصل اعلى قيمة عند النقطة (d) ثم ينخفض

للصفر عند النقطة (e) ولكن تبقى كمية من المجال مخزونة في القلب مقدارها (من $0 \leftarrow e$) .. وهكذا فتظهر حلقة الهسترة, حيث ان مساحتها تشير الى مدى الخسائر في الطاقة. لا يمكن التخلص من هذه الظاهرة ولكن يمكن التقليل منها باستخدام مواد فيرمغناطيسية ذات مساحة حلقة هسترة قليلة.

إن سبب الخسائرة في الطاقة هو أن اتجاه المجال المتخلف في القلب الحديدي (H) في النصف الاول من الذبذبة سوف يعاكس المجال (ϕ) الناشيء في النصف الثاني من الذبذبة.