

## الخواص المغناطيسية

### 9.5 مقدمة في الخواص المغناطيسية

المواد المغناطيسية هي تلك المواد التي يمكن ان تتمغنط بسهولة وذلك لامتلاكها عزم مغناطيسي دائم او عزم مغناطيسي مستحث في حالة تطبيق مجال مغناطيسي خارجي عليها. اي انها قادرة على انتاج مجال مغناطيسي ذاتي في وجود مجال مغناطيسي خارجي. يوجد ما يقارب أحد عشر نوع من المواد المغناطيسية. بعض منها يوصف على انها مواد دايا مغناطيسية ومواد بارامغناطيسية ومواد فرومغناطيسية ومواد فرومغناطيسية مضادة ومواد فريمغناطيسية الخ. تنشأ المغناطيسية من العزم المغناطيسي او ثنائي القطب المغناطيسي للمواد المغناطيسية.

ثنائي القطب المغناطيسي هو عبارة عن نظام يحتوي على قطبين مغناطيسيين متساويين في المقدار ومتعاكسين في القطبية وتفصل بينهما مسافة صغيرة. في حالة ثنائي القطب المغناطيسي او قطعة على شكل ساق مغناطيسية (المغناطيس العادي) فان العزم المغناطيسي له يكون مرتبطا بحاصل ضرب شدة قطبه في طول المغناطيس اي ان

$$M = 2 l m \quad (\text{amp.m}^2)$$

حيث ان  $m$  هي شدة قطبته و  $2l$  المسافة بين القطب الشمالي والقطب الجنوبي للمغناطيس.

ثنائيات القطب المغناطيسية هي مواد تتسبب التيارات الذرية الداخلية فيها جعل المادة بأكملها تمتلك عزم ثنائي قطب مغناطيسي. عندما يمر تيار كهربائي شدته  $i$  امبير في سلك دائري من لفة واحدة مساحته  $a$  متر مربع، فإننا نقول ان هذا السلك يمتلك عزم ثنائي قطب مغناطيسي يرمز له بالرمز  $M$  ويساوي شدة التيار  $i$  في مساحة لفة السلك  $a$  اي ان  $M = ia$  ووحدته امبير في متر مربع  $\text{amp.m}^2$ . ان عزم ثنائي القطب المغناطيسي او العزم المغناطيسي (للتبسيط) هو عبارة عن كمية متجهة. يكون اتجاه عزم ثنائي القطب المغناطيسي عموديا على مستوى لفة السلك (الحلقة) إلى اليمين إذا كان التيار يمر في اتجاه عقارب الساعة. ان عزم ثنائي القطب المغناطيسي للتيار هو المسؤول عن المجال المغناطيسي المحيط بالسلك.

## منشأ العزم المغناطيسي في المواد المغناطيسية

ينشأ العزم المغناطيسي في المواد من الحركة المدارية والحركة المغزلية للإلكترونات في الذرة.

عندما نحصل على العزم المغناطيسي الناشئ عن حركة الإلكترونات في المدارات المختلفة للذرة فإننا نطلق عليها في هذه الحالة العزم المغناطيسي المداري والذي يمتلك في الاغلب قيمة صغيرة.

يشكل كل إلكترونين في الذرة زوج يكون لكل منهما غزل معاكس للآخر. وعليه فان عزم الغزل المغناطيسي الكلي يساوي صفر. لكن في المواد المغناطيسية مثل الحديد والكوبلت والنيكل الخ تتواجد إلكترونات غير متزاوجة في المدار 3d. عزم الغزل المغناطيسي للإلكترون الغير متزاوج يتفاعل مع عزم الغزل المغناطيسي للإلكترون المجاورة ليتربا بشكل متوازي وينتج عنهما عزم غزل مغناطيسي كبير. وعليه فان غزل الإلكترونات الغير متزاوجة تكون هي المسؤولة عن السلوك الفرومغناطيسي والبارمغناطيسي للمواد. قيمة عزم الغزل المغناطيسي كبيرة جدا عند مقارنتها مع العزم المداري المغناطيسي.

## 11.5 الكميات المغناطيسية

في البداية سوف نتعرف على المصطلحات الهامة في المغناطيسية.

(i) الحث المغناطيسي (B) في اي مادة هو عبارة عن عدد خطوط القوى المغناطيسية التي تمر عموديا من خلال وحدة المساحة. وحدتها هي الوبير لكل متر مربع  $\text{weber/m}^2$  او التسلا tesla. كما انها تساوي القوة المغناطيسية التي يتعرض لها قطب شمالي موضوع في مجال مغناطيسي.

(ii) شدة المغنطة (I) لعينة من المادة هي عبارة عن العزم المغناطيسي لكل وحدة حجوم. ووحدتها امبير لكل متر  $\text{amper m}^{-1}$ .

(iii) شدة المجال المغناطيسي (H) هي النسبة بين الحث المغناطيسي ونفاذية الوسط الذي تتواجد فيه المجال المغناطيسي. اي ان

$$H = \frac{B}{\mu} \quad \text{ampere m}^{-1}$$

(iv) النفاذية المغناطيسية ( $\mu$ ) لأي مادة هي النسبة بين الحث المغناطيسي في العينة إلى شدة المجال المغناطيسي المطبق. أي أن

$$\mu = \frac{B}{H} \quad \text{henry } m^{-1}$$

وبالتالي فهي تقيس مقدار الحث المغناطيسي الناتج في العينة لكل وحدة شدة مجال مغناطيسي.

(v) قابلية المغنطة ( $\chi$ ) للمادة هي النسبة بين شدة المغنطة الناتج في العينة وشدة المجال المغناطيسي المطبق. أي أن

$$\chi = \frac{I}{H}$$

لا يوجد لها وحدة. وعليه فإنها تقيس مقدار المغناطيسية المتولدة في عينة أثناء تطبيق مجال مغناطيسي عليها.

(vi) العلاقة بين  $\mu$  و  $\chi$ .

$$B = \mu H \text{ ان}$$

يمكن كتابة هذه المعادلة بطريقة اخرى على النحو التالي:

$$B = \mu_0 (I + H)$$

حيث ان  $\mu_0$  هي ثابت النفاذية للفراغ.

النفاذية النسبية هي

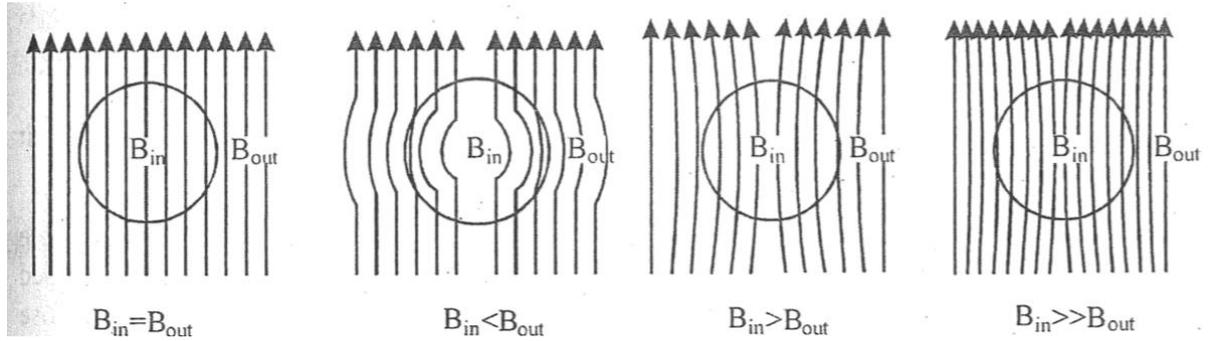
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{B/H}{B/(H + I)} = 1 + \frac{I}{H} = 1 + \chi$$

حيث ان  $\chi$  هي قابلية الوسط. والنفاذية النسبية ليس لها وحدة. يجب ان تمتلك المواد المغناطيسية قيمة نفاذية كبيرة بحيث يتولد عنها فيض كبير.

## 12.5 انواع مختلفة من المواد المغناطيسية

### (a) المواد الدايا مغناطيسية وخواصها

1. الدايا مغناطيسية هي ظاهرة يكون فيها العزم المغناطيسي المستحث معاكسا دائما لاتجاه المجال المغناطيسي المطبق.
2. المادة المغناطيسية التي تمتلك قابلية تمغنط سالبة تعرف بانها مواد دايا مغناطيسية.
3. في المواد الدايا مغناطيسية فان كل ذرة لا تمتلك عزم مغناطيسي دائما.
4. عدد اتجاهات المدارات الالكترونية في ذرة المادة الدايا مغناطيسية هو الجمع الاتجاهي للعزوم المغناطيسية والذي يساوي صفر. بسبب المجال المغناطيسي الخارجي حركة دورانية لكل مدار الكتروني. وهذا يولد عزم مغناطيسي مستحث في اتجاه يعاكس المجال المغناطيسي المطبق وبالتالي يعمل على تقليل الحث المغناطيسي الموجود في داخل العينة (الشكل 12.5(b)).



(a) مادة عادية (b) دايا مغناطيسية (c) بارامغناطيسية (d) فيرومغناطيسية

الشكل 12.5 يوضح سلوك المواد المغناطيسية في وجود مجال مغناطيسي خارجي (a) يوضح مادة عادية ليس لها اي فعل تنافر او تجاذب مع خطوط الفيض المغناطيسي عندما توضع في مجال مغناطيسي منتظم. لكن (b) يوجد تنافر للفيض المغناطيسي من مركز المادة مما يشير إلى سلوك دايا مغناطيسي للمادة.

5. تنفر المواد الدايا مغناطيسية خطوط القوى المغناطيسية.

6. لا يوجد ثنائيات قطب دائمة، وعليه فان التأثيرات المغناطيسية تكون صغيرة جدا.

7. بصفة عامة لا تعتمد قيمة القابلية الدايا مغناطيسية على درجة الحرارة ولا على شدة المجال المغناطيسي المطبق.

امثلة: المواد العضوية، والعناصر الضوئية، والفلزات القلوية الترابية، والبزموت والنيوبيم والمركبات في حالة التوصيل الفائقة، الخ.

### (b) المواد البارامغناطيسية وخواصها

1. البارامغناطيسية هي ظاهرة تعتمد فيها اتجاهات العزوم المغناطيسية بشكل كبير على درجة الحرارة والمجال المغناطيسي المطبق. إذا كانت طاقة المجال المغناطيسي المطبق اكبر من الطاقة الحرارية فان العزم المغناطيسي للمادة يكون محدودا وكبيراً.

2. عدد اتجاهات العزوم المدارية المغناطيسية والعزوم المغزلية المغناطيسية هو المجموع الاتجاهي للعزوم المغناطيسية والذي لا يساوي صفر ويكون هناك عزم مغناطيسي كلي في كل ذرة حتى في حالة غياب المجال المغناطيسي المطبق.

3. إذا طبقنا مجال مغناطيسي خارجي يكون هناك عزم مغناطيسي كبير جدا على امتداد اتجاه المجال ويزداد الحث المغناطيسي.

4. المواد البارامغناطيسية تجذب خطوط القوى المغناطيسية (الشكل 1.8(c)).

5. لهذه المواد ثنائيات قطب مغناطيسية دائمة.

6. لا تعتمد قيمة القابلية البارامغناطيسية على المجال المغناطيسي المطبق ولكن تعتمد بشكل كبير على درجة الحرارة بحيث ان

$$\chi = \frac{C}{T - \theta}$$

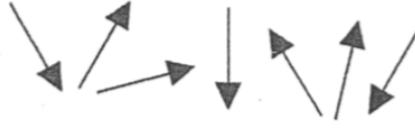
حيث ان C هي ثابت كيبوري و  $\theta$  هي درجة حرارة كيبوري.

7. عندما تكون درجة الحرارة T اقل من درجة حرارة كيبوري للمادة فإنها تتحول إلى دايا مغناطيسية.

8. تستخدم هذه المواد في الليزرات والميزرات عند الوصول إلى مستويات الطاقة المطلوبة للانتقال.

تستخدم الخواص البارامغناطيسية للأكسجين في اجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي النووي المستخدم لتشخيص الامراض السرطانية للدماغ او في تجلطات الدم في الدماغ.

9. ترتيب العزل بالشكل التالي:



امثلة: المعادن الفلزية القلوية (الصوديوم والبوتاسيوم) والمعادن الانتقالية والكروميوم واليوتيريوم.

### (c) المواد الفرومغناطيسي وخواصها

1. الفرومغناطيسية هي ظاهرة تحدث فيها مغنطة تلقائية عندما تكون  $T \leq \theta$  ولذلك حتى في حالة غياب المجال المغناطيسي المطبق، وتكون العزوم المغناطيسية هائلة. هنا  $\theta$  هي درجة حرارة كيوري للمادة.
2. تنشأ الفرومغناطيسية عندما يكون تبادل الطاقة مفضل لترتيب العزل.
3. إذا تطلبت المادة مغنطة عالية نسبيا في مجال مغناطيسي ضعيف فإنها تكون فرومغناطيسية.
4. مقدار القابلية المغناطيسية يكون موجبا وكبيرا.
5. عندما تكون درجة الحرارة أعلى من درجة حرارة كيوري  $\theta$  فان حالة الفرومغناطيسية تتحول إلى بارامغناطيسية.
6. عندما تكون درجة الحرارة اقل من  $\theta$  فان المادة تكون في حالة فرومغناطيسية وتكون  $\chi$  كبيرة جدا بسبب المغنطة التلقائية.
7. نتيجة للمجال المغناطيسي الداخلي الكبير فان ثنائيات القطب الدائمة تكون مرتبة في نفس الاتجاه وينتج عنها مغنطة تلقائية حتى في غياب المجال المغناطيسي المطبق.
8. تتجاذب مع خطوط القوى المغناطيسية بقوة (الشكل 1.8(d)).

9. انها تعرض مغناطيسية حتى بعد زوال المجال الممغنط. اي انها تظهر تخلف مغناطيسي.

10. خلال التسخين تفقد مغنطتها ببطء.

11. ترتيب الغزل بالشكل التالي:



امثلة: الحديد والنيكل والكوبلت.

#### (d) مواد فرومغناطيسية مضادة وخواصها

1. هذا يشير إلى ترتيب الغزل بطريقة متوازية ومتعاكسة للأيونات المغناطيسية المتجاورة مما ينتج عنها مغناطيسية كلية تساوي صفر.

2. مقدار القابلية المغناطيسية صغير وموجب. عند درجة حرارة  $T=0$ ، فإن عزم الغزل المغناطيسي الكلي لذرات في الموقع A يساوي في المقدار عزم الغزل المغناطيسي الكلي للذرات في الموقع B ويعاكسها في الاتجاه. لهذا فإن  $I_A=I_B$  أو  $\chi=0$ . لكن مع زيادة درجة الحرارة فإن كلا من  $I_A$  و  $I_B$  تتغيران بطريقة مختلفة قليلا. هذا سوف يؤدي إلى قيمة صغيرة وموجبة للقابلية المغناطيسية لهذه المواد. تتغير القابلية المغناطيسية مع درجة الحرارة، كما هو موضح في الشكل 2.8. هنا تعرف كلا من  $I_A$  و  $I_B$  على انها شدة المغنطة في المواقع A و B على التوالي.

3. اعتماد القابلية المغناطيسية على درجة الحرارة: عندما تكون  $T>T_N$  (درجة حرارة نيبيل) فإن

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

4. الترتيب المتعاكس للعزوم المغناطيسية المتجاورة في المواد الصلبة ينتج عن التفاعل المتبادل (الغير مفضل).

5. تزداد القابلية المغناطيسية في البداية قليلا مع زيادة درجة الحرارة ولكن بعد درجة حرارة نيبيل فإن

القابلية المغناطيسية تتناقص مع درجة الحرارة.

6. درجة حرارة نيل هي درجة الحرارة التي عندها تكون القابلية المغناطيسية للمادة اعلى ما يمكن.

7. ترتيب الغزل على النحو التالي:



امثلة: اكسيد الفريت FeO واكسيد المانجنيز MnO واكسيد الكروميوم Cr<sub>3</sub>O<sub>3</sub> واملاح العناصر الانتقالية.

#### (e) مواد فريمغناطيسية وخواصها

1. انها حالة خاصة من الفرومغناطيسية المضادة بحيث ان العزوم المتعاكسة تمتلك مقادير مختلفة وينشأ تمغنت كبير.

2. مقدار القابلية المغناطيسية كبير جدا وموجب.

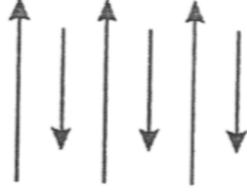
3. اعتماد القابلية المغناطيسية على درجة الحرارة: عند  $T > T_N$  فان

$$\chi = \frac{C}{T \pm \theta}$$

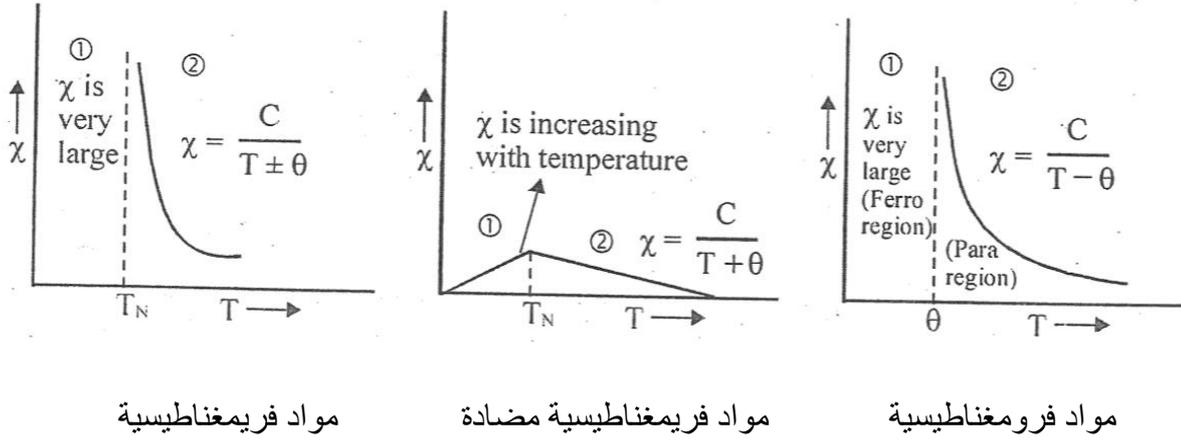
4. تتكون هذه من مجموعتين او أكثر من الايونات المعدنية الانتقالية المختلفة. هناك عدد مختلف من الايونات في كل مجموعة. ونظرا لوجود مواد فريمغناطيسية مضادة وغير متشابهة يكون التمغنت الكلي كبيرا.

5. تسمى هذه المواد بالفريت.

6. ترتيب الغزل على النحو التالي:



امثلة: فريت الحديدوز ferrous ferrite وفريت النيكل Nickel ferrite.

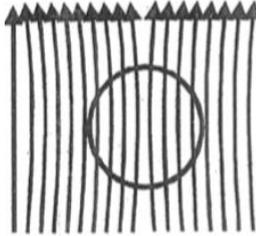
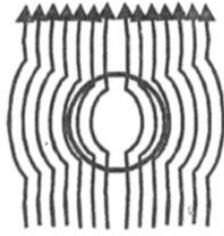


الشكل 13.5 اختلاف القابلية المغناطيسية مع درجة الحرارة في المواد المغناطيسية المختلفة.

يوضح الشكل 13.5 اختلاف القابلية المغناطيسية مع درجة الحرارة في المواد الفريمغناطيسية والمواد الفريمغناطيسية المضادة والمواد الفرومغناطيسية.

جدول 1.5 التمييز بين المواد الدايا مغناطيسية والمواد البارامغناطيسية والمواد الفرومغناطيسية

مواد فرومغناطيسية	مواد بارامغناطيسية	مواد دايا مغناطيسية	1. التعريف
هي مادة يوجد فيها عزم ثنائي قطب مغناطيسي دائم وكبير جدا في كل ذرة. العزم المغناطيسي المستحث المتولد في هذه المواد اثناء تطبيق مجال مغناطيسي يكون كبير جدا ويعمل على زيادة الحث المغناطيسي الموجود في العينة.	هي مادة يوجد فيها عزم ثنائي قطب مغناطيسي دائم في كل ذرة. العزم المغناطيسي المستحث المتولد في هذه المواد اثناء تطبيق مجال مغناطيسي خارجي يعمل على زيادة الحث المغناطيسي الموجود في العينة.	هي مادة لا تمتلك عزم ثنائي قطب مغناطيسي دائم في كل ذرة. العزم المغناطيسي المستحث المتولد في هذه المواد اثناء تطبيق مجال مغناطيسي خارجي يعمل على تناقص الحث المغناطيسي الموجود في العينة.	

<p>انها دائما موجبة وكبيرة وتعتمد على درجة الحرارة بشكل معقد.</p>	<p>انها دائما موجبة وصغيرة وتتناسب عكسيا مع درجة الحرارة المطلقة للمادة.</p>	<p>انها دائما سالبة ولا يعتمد على درجة الحرارة ولا يعتمد ايضا على شدة المجال المغناطيسي المطبق.</p>	<p><b>2. قابلية التمغنط واعتمادها على درجة الحرارة.</b></p>
 <p>خطوط القوى المغناطيسية تتنافر بقوة</p>	 <p>خطوط القوى المغناطيسية تتجذب نحو مركز المادة وبالتالي فان <math>B_{in} &gt; B_{out}</math>.</p>	 <p>في المادة الطبيعية فان <math>B_{in} = B_{out}</math> لكن المادة الدايمغناطيسية فان خطوط القوى المغناطيسية تتنافر مبتعدة عن مركز المادة وبالتالي فان <math>B_{out} &gt; B_{in}</math>.</p>	<p><b>3. سلوك المادة في وجود مجال مغناطيسي.</b></p>
 <p>كل الغزل او العزوم المغناطيسية تكون مرتبة. المواد الفرومغناطيسية المضادة (AM) والمواد الفريمغناطيسية (F²M) هي حالة خاصة من المواد الفرومغناطيسية (FM) على اساس ترتيب الغزل.</p>	 <p>كل الغزل او العزوم المغناطيسية تكون عشوائية الترتيب.</p>	<p>لا يوجد غزل او عزم مغناطيسي</p>	<p><b>4. ترتيب الغزل او ترتيب العزم المغناطيسي</b></p>
<p>تنشأ من التمغنط التلقائي الناتج عن المجال المغناطيسي الجزيئي الموضعي والذي ينشأ من التفاعل المتبادل بين الالكترونات الغير متزاوجة للذرات المتجاورة في الشبكة البلورية.</p>	<p>تنشأ من ترتيب العزوم المغناطيسية على امتداد اتجاه المجال المغناطيسي الخارجي وترتيب العزوم المغناطيسية تحدد بواسطة درجة الحرارة والمجال المغناطيسي المطبق.</p>	<p>تنشأ من دوران لارمور المخروطي للدارات الالكترونية في وجود مجال مغناطيسي خارجي.</p>	<p><b>5. المنشأ</b></p>

<p><b>تحول الطور المغناطيسي</b></p>	<p>عند درجة حرارة منخفضة جدا (1K تقريبا) تكون المواد فائقة التوصيل دايا مغناطيسية. عندما تزداد درجة حرارته بعد درجة الحرارة الحرجة تختفي الديامغناطيسية فجأة وتتصرف بعد ذلك كمادة عادية.</p>	<p>عندما تكون درجة حرارة المادة اقل من درجة حرارة كيوري فانها تتحول إلى مادة دايا مغناطيسية. لكن درجة حرارة كيوري للبارامغناطيسية منخفضة جدا (100K).</p>	<p>عندما تكون درجة حرارة المادة اكبر من درجة حرارة كيوري فانها تتحول إلى بارامغناطيسية. درجة حرارة كيوري للفرامغناطيسية كبيرة جدا.</p>
<p><b>7. أمثلة</b></p>	<p>هيدروجين والبيزموث والمواد فائقة التوصيل مثل النيوبيوم ومركباته.</p>	<p>الالومنيوم والبلاتينيوم والزرجاج والحديد ومحاليل املاح الحديد او النيكل.</p>	<p>المواد الفرهمغناطيسية مثل الحديد والنيكل والكوبلت. المواد الفرهمغناطيسية المضادة مثل اكسيد الحديدوز وفريت الزنك واكسيد المانجنيز. المواد الفرهمغناطيسية مثل فريت النيكل وفريت المانجنيز وفريت الحديدوز</p>

### 13.5. النظرية الكلاسيكية للدايامغناطيسية (نظرية لانجفين Langevin)

تتكون الذرة من نواة موجبة وعدد من الالكترونات تدور حولها في مدارات مكممة. هذا سوف يؤدي إلى تولد مجال مغناطيسي عمودي على مستوى المدار. وعليه، فان المدارات الالكترونية ترتبط مع العزم المغناطيسي. كما ان معظم المستويات المدارية ليست متوازية مع بعضها البعض وبالتالي فان الدوران لا يكون بالضرورة متشابهها. وعليه فان المجموع الاتجاهي للعزوم المغناطيسية تساوي صفر ولا يكون هناك عزم مغناطيسي كلي لكل ذرة.

لكن في حالة وجود مجال مغناطيسي خارجي فانه يؤثر بدوران على كل مدار الكتروني. هذا التأثير يتسبب في توليد عزم مغناطيسي مستحث، وطبقا لقاعدة لينز يكون له اتجاه يعاكس اتجاه المجال الخارجي وبالتالي يعمل على تقليل الحث المغناطيسي. يعرف هذا التأثير بإلغاء التمغنط والمادة التي تتعرض له تعرف بانها مادة دايا مغناطيسية.

النظرية: اعتبر مدار دائري نصف قطره  $r_0$  يدور فيه الكترون بسرعة زاوية مقدارها  $\omega_0$ . وهذا يولد تيار مقداره  $\frac{e\omega_0}{2\pi}$  حيث ان  $\frac{\omega_0}{2\pi}$  هو التردد و  $e$  شحنة الالكترون.

لهذا فان مقدار العزم المرتبط بهذا الالكترون يكون

$$\mu_e = iA = \frac{e\omega_0\pi r_0^2}{2\pi} = \frac{1}{2}e\omega_0 r_0^2$$

حيث ان A هي مساحة المقطع المدار الدائري. العزم الزاوي للإلكترون بسبب دوران الكترون كتلته m تساوي  $L = m\omega_0 r_0^2$ . حيث ان  $\mu_e = \frac{1}{2}eL/m$ . من نظرية بور نعلم ان  $L = n\hbar$  حيث ان n هو عدد صحيح. لذلك يكون العزم المغناطيسي  $\mu_e$  للإلكترون هو عدد صحيح  $\frac{e\hbar}{2m}$ ، اي ان  $\mu_e = \frac{ne\hbar}{2m}$  حيث ان  $\frac{e\hbar}{2m}$  يعرف باسم بور ماجنيتون. وهنا  $\hbar$  تساوي  $h/2\pi$  حيث ان h هو ثابت بلانك.

وعليه يستخدم البور ماجنيتون كوحدة عملية للعزم المغناطيسي للإلكترون

$$\text{One Bohr Magnetron} = \frac{e\hbar}{2m} = 9.27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$$

طبقا للامور يتسبب المجال المغناطيسي الخارجي بحركة دورانية مخروطية precession للمدارات وسرعة الدوران المخروطي تعطى بالعلاقة التالية:

$$\omega = \frac{-eB}{2m}$$

وهذا يولد تغير في العزم المغناطيسي للإلكترون. يعطى التغير في العزم المغناطيسي بالعلاقة التالية

$$\Delta u_e = u_e(\text{final}) - u_e(\text{initial})$$

$$\therefore \Delta u_e = \frac{er_0^2}{2}((\omega + \omega_0) - \omega_0) = \frac{-e^2 B r_0^2}{4m}$$

توضح الاشارة السالبة ان الزيادة في المجال المغناطيسي سوف تولد تيارات تنتج مجال مغناطيسي معاكس في الاتجاه للمجال المغناطيسي المطبق.

العلاقة اعلاه تستخدم فقط للمدار الالكتروني. حيث ان الذرات المعقدة تمتلك الكترونات كثيرة، والحد  $r_0^2$  يستبدل بـ  $\sum_n \bar{r}_0^2$  وهي قيمة متوسطة مناسبة لان كل المدارات ليست متساوية وليست دائرية.

$$\therefore \Delta \mu_A = \frac{-e^2 B}{4m} \sum \bar{r}_0^2$$

في المستوى

$$\bar{r}_o^2 = \bar{r}_x^2 + \bar{r}_y^2$$

لذرة متمائلة كروية

$$r_x^2 = r_y^2 = r_z^2 = \frac{1}{3} r^2$$

$$\therefore \bar{r}_o^2 = \frac{2}{3} \bar{r}^2$$

حيث ان الاشارة العلوية تدل على القيمة المتوسطة لكل الالكترونات. العزم المغناطيسي لكل كيلوجرام ذري هو  $\Delta\mu = \frac{-Ne^2 B}{4m} \frac{2}{3} \sum \bar{r}^2$  حيث ان N هو عدد افوجادرو. إذا لم يكن للذرة عزم فعلي فان القابلية المغناطيسية لكل كيلوجرام ذري تعطى بالعلاقة التالية:

$$\chi = \frac{\Delta\mu}{H} = \frac{-\mu_o N e^2}{6m} \sum \bar{r}^2$$

## نتائج

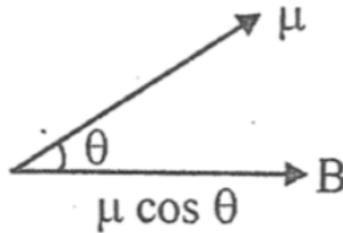
1. تنشأ القابلية الدايا مغناطيسية من حركة لامور الدائرية المخروطية للمدارات الالكترونية وتحدد من خلال توزيع الشحنة في الذرة. انها لا تعتمد على درجة الحرارة.
2. الدايا مغناطيسية هي خاصية متأصلة لكل الذرات والجزيئات. فقط إذا امتلكت الذرة عزم مغناطيسي ابتدائي فإنها تسلك سلوك المواد البارامغناطيسية او الفرومغناطيسية.

## العيوب

1. في معظم المواد الدايا مغناطيسية تتغير القابلية المغناطيسية مع درجة الحرارة عند درجات حرارة منخفضة. لكن طبقا للنظرية الكلاسيكية فهي لا تعتمد على درجة الحرارة.
2. بالإضافة إلى ان قيمة القابلية المغناطيسية تعتمد على الطبيعة الفيزيائية للمادة. لكن هذا ليس متضمنا في هذه النظرية.

## 14.5 نظرية لانجيفين للبارامغناطيسية

1. اعتبر لانجيفين غاز بارامغناطيسي بحيث ان كل ذرة او جزيء يمتلك عزم مغناطيسي دائم. تنشأ هذه العزوم المغناطيسية من ارتباط العزوم المغناطيسية المدارية والمغزلية للإلكترونات.
2. تشير هذه العزوم المغناطيسية في حالة غياب اي مجال مغناطيسي خارجي في اتجاهات عشوائية وبالتالي لا يكون هناك عزم مغناطيسي كلي للمواد البارامغناطيسية، بالرغم من ان كل ذرة او جزيء يمتلك عزم مغناطيسي دائم. ويحدث هذا بسبب ان تبادل الطاقة بين ثنائيات القطب يكون أصغر من الطاقة الحرارية المعطاة بـ  $kT$  حيث ان  $K$  هو ثابت بولتزمان و  $T$  هي درجة حرارة المادة بوحدة الكلفن.
3. عند تطبيق مجال مغناطيسي خارجي فان العزوم المغناطيسية الذرية سوف تترتب على امتداد اتجاه المجال المغناطيسي وتنتج العزوم المغناطيسية الذرية المفردة مغناطيسية كلية لمواجهة الاثارة الحرارية. عندما يتم التأثير على الذرات والايونات بشكل منفرد بدون تفاعل متبادل بينها فان هذا التأثير يعرف باسم البارامغناطيسية.
4. تعتمد البارامغناطيسية على العزم المغناطيسي للأيونات أو الذرات. لذلك فان حالة التمغنط سوف تحدد بتطبيق مجال مغناطيسي والاثارة الحرارية (اي درجة الحرارة).
5. ان احتمالية ان يكون ثنائي القطب مائل بزاوية ما بالنسبة لاتجاه المجال المغناطيسي في حالة الاتزان الحراري يتناسب طرديا مع  $\exp(\mu B \cos \theta / kT)$  بواسطة توزيع ماكسويل بولتزمان.



الشكل 14.5(a) اتجاه العزم المغناطيسي بالنسبة للمجال المطبق.

6. إذا كانت  $n_0$  هو العدد الكلي لثنائيات القطب فان عدد ثنائيات القطب  $n$  التي تميل بزاوية  $\theta$  بالنسبة لاتجاه المجال المغناطيسي تعطى بالعلاقة  $n = n_0 \exp(\mu B \cos \theta / kT)$  (الشكل 14.5(a)).
7. متوسط العزم المغناطيسي  $\bar{\mu}$  في اتجاه المجال يعطى من خلال تجميع مركبات العزوم المغناطيسية

لكل ثنائيات القطب في اتجاه المجال مقسومة على العدد الكلي لثنائيات القطب.

$$\bar{\mu} = \frac{\int \mu \cos \theta \, dn}{\int dn}$$

حيث ان  $(\mu B/kT)$   $dn = -n_o \exp(\mu B \cos \theta /kT) \sin \theta \, d\theta$

$$\therefore \bar{\mu} = \frac{-n_o \int \mu \cos \theta \exp(\mu B \cos \theta /kT) \sin \theta \, d\theta}{-n_o \int \exp(\mu B \cos \theta /kT) \sin \theta \, d\theta}$$

بوضع الحدود للزاوية  $\theta$  والحفاظ على  $\alpha = \mu B/kT$  نحصل على

$$\bar{\mu} = \frac{\int_0^\pi \mu \cos \theta \exp(\alpha \cos \theta) \sin \theta \, d\theta}{\int_0^\pi \exp(\alpha \cos \theta) \sin \theta \, d\theta}$$

بوضع  $\cos \theta = x$

$$\therefore -\sin \theta \, d\theta = dx$$

$$\bar{\mu} = \frac{\int_{-1}^1 \mu x \exp(\alpha x) \, dx}{\int_{-1}^1 \exp(\alpha x) \, dx}$$

بإجراء التكاملات في المعادلة اعلاه لـ  $\bar{\mu}$  نحصل على

$$\bar{\mu} = \mu \frac{\alpha}{(e^\alpha - e^{-\alpha})} \left[ \frac{1}{\alpha} (e^\alpha + e^{-\alpha}) - \left( \frac{e^\alpha - e^{-\alpha}}{\alpha^2} \right) \right]$$

$$\therefore \bar{\mu} = \mu \left\{ \frac{e^\alpha + e^{-\alpha}}{e^\alpha - e^{-\alpha}} - \frac{1}{\alpha} \right\} = \mu \left\{ \coth \alpha - \frac{1}{\alpha} \right\}$$

$$\therefore \bar{\mu} = \mu L(\alpha)$$

حيث ان  $L(\alpha)$  تعرف باسم دالة لانجيفين.

## حالة 1

اعتبر ان  $\mu B \gg kT$  او ان  $\alpha$  كبيرة جدا. في مثل هذه الحالة تكون  $T$  صغيرة جدا او ان  $B$  كبيرة.

$$\begin{aligned}\therefore |L(\alpha)|_{\alpha \rightarrow \infty} &= \left| \coth \alpha - \frac{1}{\alpha} \right|_{\alpha \rightarrow \infty} \\ &= \left| \frac{e^\alpha + e^{-\alpha}}{e^\alpha - e^{-\alpha}} - \frac{1}{\alpha} \right|_{\alpha \rightarrow \infty} = \left| \frac{1 + e^{-2\alpha}}{1 - e^{-2\alpha}} - \frac{1}{\alpha} \right|_{\alpha \rightarrow \infty} = 1\end{aligned}$$

$$\therefore \bar{\mu} = \mu$$

إذا كانت  $N$  هي عدد ثنائيات القطب لكل وحدة حجوم، فان التمعنط  $I$  يعطى على النحو التالي:

$$I = N \bar{\mu} = N \mu = I_s$$

حيث ان  $I_s$  هي قيمة التشبع للتمعنط.

## حالة 2

اعتبر ان  $\mu B \ll kT$  او ان  $\alpha$  صغيرة جدا. اي ان  $T$  كبيرة او ان  $B$  صغيرة.

$$\therefore |L(\alpha)|_{\alpha \rightarrow 0} = \left| \frac{1}{\alpha} \left( 1 + \frac{\alpha^2}{2} \right) - \frac{1}{\alpha} \right|_{\alpha \rightarrow 0} = \frac{2\alpha}{6}$$

$$\therefore |L(\alpha)|_{\alpha \rightarrow 0} = \frac{\alpha}{3} = \frac{\mu B}{3kT}$$

لذلك فان شدة المغناطيسية تعطى على النحو التالي

$$I = N\bar{\mu} = \frac{N\mu^2 B}{3kT} = \frac{N\mu^2 \mu_0 H}{3kT} \quad (A)$$

القابلية المغناطيسية

$$\chi = \frac{I}{H} = \frac{\mu_0 N\mu^2}{3kT} = \frac{C}{T}$$

حيث ان C هي ثابت كيوري Curie constant

والعلاقة تعرف باسم قانون كيوري او علاقة كيوري ولانجيفين حيث وجد كيوري هذه العلاقة من خلال التجارب العملية قبل اشتقاق لانجيفين النظري.

افترض ويز Weiss المجال الجزيئي الداخلي للحصول على علاقة بين البارامغناطيسية والفرومغناطيسية. ان هذا المجال الجزيئي الداخلي يكون ممثلا بـ  $H_i$ ، وبالتالي فان  $H_i = \lambda I$  حيث ان  $\lambda$  هي معامل المجال الجزيئي او ثابت ويز. لهذا فان تأثير المجال الكلي يجب ان يكون  $H_e = (H + H_i)$  والذي هو عبارة عن الجمع الاتجاهي للمجال المغناطيسي الخارجي H والمجال الجزيئي الداخلي  $H_i$ .

بإدخال المجال الفعال في نظرية لانجيفين نحصل على

$$I = \frac{\mu_0 \mu^2 N H_e}{3kT} = \frac{\mu_0 \mu^2 N (H + \lambda I)}{3kT}$$

(انظر المعادلة (A) في نظرية لانجيفين)

بإعادة ترتيب الحدود نحصل على ما يلي:

$$I \left[ 1 - \frac{\mu_0 \mu^2 N \lambda}{3kT} \right] = \frac{\mu_0 \mu^2 N H}{3kT}$$

دعنا نفترض ان  $C = \mu_0 \mu^2 N / 3k$  و  $\theta = C\lambda$ ، نحصل على

$$I \left( 1 - \frac{\theta}{T} \right) = \frac{CH}{T}$$

$$\therefore \chi = \frac{I}{H} = \frac{C}{T \left(1 - \frac{\theta}{T}\right)} = \frac{C}{T - \theta}$$

حيث ان C تعرف بثابت كيوري و  $\theta$  هي نقطة كيوري البارامغناطيسية او درجة حرارة كيوري. تعرف المعادلة اعلاه بقانون كيوري وويز. من هذا نستنتج انه عند درجة حرارة اقل من درجة حرارة كيوري ( $T > \theta$ ) فان قابلية المغنطة تصبح سالبة، اي ان البارامغناطيسية تصبح دايا مغناطيسية. لكن درجة حرارة كيوري منخفضة نوعا ما لمعظم المواد البارامغناطيسية ولذلك الحالة التي يكون عندها  $T < \theta$  هي حالة نادرة الحدوث.

## 15.5 نظرية النطاق للفرومغناطيسية

### (a) النطاقات المغناطيسية

1. افترض ويز مبدأ النطاقات في العام 1907 لشرح تأثيرات التخلف المغناطيسي الذي لوحظ في المواد الفرومغناطيسية وكذلك لشرح خواص المواد المغناطيسية.
2. منطقة في المادة الفرومغناطيسية يكون فيها كل العزوم المغناطيسية مرتبة في نفس الاتجاه تعرف باسم النطاق domain. يكون النطاق المغناطيسي ممغناطيا بالكامل وله حدود محددة. لذلك المواد الفرومغناطيسية تكون مقسمة إلى مناطق صغيرة تعرف باسم النطاقات وكل نطاق يكون ممغناطيا.
3. يتغير اتجاه المغنطة من نطاق إلى اخر ولهذا تكون المغنطة الجاهرية الكلية مساوية للصفر في العينة عند غياب المجال المغناطيسي الخارجي.
4. لكن عندما تكون المادة الفرومغناطيسية في مجال مغناطيسي وفي المراحل الابتدائية من المغنطة في المادة تزداد مساحة النطاقات التي تكون عزومها المغناطيسية موازية للمجال المغناطيسي الخارجي. وعند الوصول إلى مرحلة التشبع تدور العزوم في النطاقات الاخرى وتصبح موازية للمجال المغناطيسي الخارجي.
5. بالمثل إذا قمنا بإزالة المغنطة في المادة تتغير ترتيب النطاقات وتصبح في حالة مختلفة عن الحالة

الاصلية. هذا يولد تخلف مغناطيسي في المادة الفرومغناطيسية.

6. ينمو ويزداد كل نطاق بحركة جدران النطاق وبدورانه. يتشكل النطاق من خلال تفاعل الغزل – غزل المتبادل والمفضل.

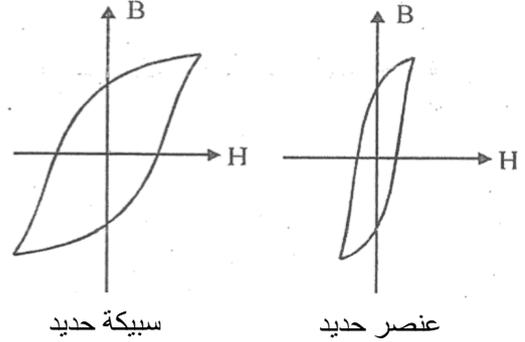
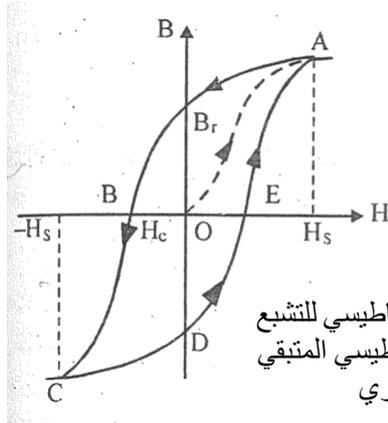
## 16.5 التخلف المغناطيسي Hysteresis

يشير التخلف المغناطيسي للمواد الفرومغناطيسية إلى تأخر المغنطة أو الحث المغناطيسي المتبقي بعد زوال المجال المغناطيسي. ولهذا الخاصية الغير عكوسة لعلاقة B مع H للمواد الفرومغناطيسية تعرف باسم التخلف المغناطيسي.

حلقة التخلف المغناطيسي ABCDEA هي منحنى يوضح التغير في الحث المغناطيسي للمواد الفرومغناطيسية مع المجال المغناطيسي المطبق حيث تتغير شدة هذا المجال من  $H_s$  إلى  $-H_s$  والعودة مرة اخرى.

فقد التخلف المغناطيسي هو فقد في الطاقة عند اخذ المادة الفرومغناطيسية في دورة مغنطة ويمثل هذا الفقدان بالمساحة المحصورة لحلقة التخلف المغناطيسي.

عندما يقل المجال الممغنط إلى الصفر فإن الحث المغناطيسي للمادة لا يؤول إلى الصفر، وهذه القيمة من الحث المغناطيسي تعرف بالمغناطيسية المتبقية. وعليه فإن المغناطيسية المتبقية في المادة تعرف بالحث المغناطيسي المتبقي للمادة عندما يقل المجال الممغنط من قيمة التشبع إلى الصفر.



**الشكل 15.5 (b)** التخلف المغناطيسي لسبيكة من الحديد وعنصر الحديد  
**الشكل 15.5 (a)** التخلف المغناطيسي في المواد الفرومغناطيسية

وبالمثل فإن قوة المقاومة القسرية للعينات المغناطيسية هي مقدار مجال إزالة المغناطيسية اللازم لتقليل المغناطيسية المتبقية إلى الصفر. يوضح الشكل 15.5 (a) الحث المغناطيسي المتبقي، ومجال قوة المقاومة القسرية وتشبع المجال المغناطيسي. طاقة حاصل ضرب  $B_r H_c$  للمادة المغناطيسية هو حاصل ضرب الحث المغناطيسي المتبقي  $B_r$  وشدة مجال إزالة المغناطيسية  $H_c$ .

تساعدنا دراسة حلقة التخلف المغناطيسي لمواد مختلفة لمعرفة خواصها المغناطيسية. على سبيل المثال دعنا ندرس منحنيات التخلف المغناطيسي لعنصر الحديد ولسبيكة الحديد. نستطيع ان نحصل على النتائج التالية:

1. المساحة المحصورة لحلقة سبيكة الحديد أكبر من حلقة عنصر الحديد وهذا يوضح فقد طاقة أكبر لكل دورة لكل  $m^3$  من سبيكة الحديد.
2. منحنى B-H أكثر انحداراً لعنصر الحديد مما يشير إلى تمغنط سريع. علاوة على ان المجال الممغنط اللازم للوصول إلى حالة التشبع في عنصر الحديد أصغر بكثير من سبيكة الحديد. بالإضافة إلى ان النفاذية وقابلية التمغنط أكبر لعنصر الحديد.
3. يظهر استبقاء كبير في حالة سبيكة الحديد.
4. قوة المقاومة القسرية أكبر لسبيكة الحديد من عنصر الحديد (الشكل 15.5 (b)). وهذا يشير إلى الحاجة لقوة إزالة مغناطيسية أكبر لسبيكة الحديد للتخلص من الحث المغناطيسي المتبقي.

لهذا السبب يستخدم عنصر الحديد في المغناطيس الكهربائي حيث يتطلب الأمر حث مغناطيسي كبير. بالإضافة إلى أن فقد التخلف المغناطيسي صغير جداً، كذلك يستخدم في قلب المحولات، والدينامو وغشاء طبلة التلفون. تستخدم سبيكة الحديد في صناعة المغناطيسيات الدائمة لأنه لا يمكن إزالة المغناطيسية عنها بسهولة.

### (e) شرح منحنى التخلف المغناطيسي بالاعتماد على نظرية النطاق

1. عند تطبيق مجال فإن النطاقات التي تكون مغنطتها موازية لخطوط المجال أو عند زاوية صغيرة بالنسبة للمجال تنمو على حساب النطاقات التي تكون مغنطتها معاكسة للمجال المغناطيسي المطبق وبذلك فإن الحدود بين النطاقات تنزاح.
2. في بداية تتقدم (القطعة OA على منحنى التخلف المغناطيسي) مغنطة المادة ككل بحدود ذات إزاحات عكوسة صغيرة لكن الجزء الأكثر انحداراً (AB) من منحنى المغنطة يكون كبيراً والإزاحات غير عكوسة (الشكل 16.5).
3. فوق رتبة المنحنى (BS) تتقدم المغنطة من خلال دوران اتجاه المغنطة لكل النطاقات وهذه العملية صعبة بعض الشيء وتكون الزيادة في المغنطة منخفضة نسبياً.
4. عند تقليل المجال المغناطيسي المطبق، يحدث تغير طفيف في تركيب النطاق وبذلك يبقى الحث المغناطيسي أو التمغنط مرتفعاً نسبياً إلى حين تطبيق مجال كبير عكسي.
5. حتى عندما يكون المجال الخارجي صفراً يكون هناك مغنطة متبقية في العينة ويمكن التخلص منها من خلال تطبيق مجال عكسي كبير.
6. وبالتالي تكون حركة جدران النطاقات العكوسة والنطاقات الغير عكوسة سوف تعمل على زيادة التخلف المغناطيسي في المواد الفرومغناطيسية.

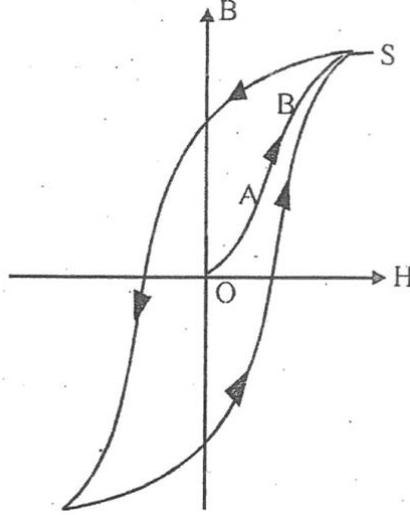
في الشكل 16.5،

OA – نتيجة للحركة العكسية الصغيرة لجدار النطاق

AB – نتيجة للحركة الغير عكسية الكبيرة لجدار النطاق

BS – نتيجة لدوران النطاق الغير عكسي الصغير

S – نقطة التشبع



الشكل 16.5 يوضح تفسير للتخلف المغناطيسي بالاعتماد على نظرية النطاق

### 17.5 المواد الفرومغناطيسية المضادة

المواد الفرومغناطيسية المضادة هي مواد مغناطيسية يكون فيها ترتيب الغزل للمواقع المتجاورة (المواقع A والمواقع B) بطريقة متوازية عكسية وبالتالي فان شدة المغنطة تكون متساوية ومتعاكسة ومحصلة المغنطة الكلية تساوي صفر عند درجة حرارة  $T = 0K$ .

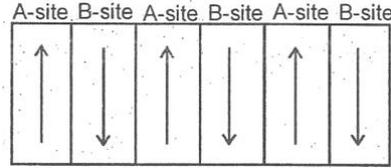
لهذا فان قابلية التمنط للمواد الفرومغناطيسية المضادة عند درجة حرارة  $0K$  تساوي صفر.

عندما تكون درجة الحرارة اعلى من  $0K$  يتغير ترتيب عزوم الغزل المغناطيسية في المواقع A والمواقع B بطريقة مختلفة. هذا سوف يؤدي إلى قيمة موجبة وصغيرة للقابلية المغناطيسية. عند درجة حرارة كيبوري فان هذه المواد تمتلك درجة حرارة اخرى تعرف باسم درجة حرارة نيبيل والتي تكون عندها القابلية المغناطيسية اقصى ما يمكن. تغير القابلية المغناطيسية مع درجة الحرارة موضح في الشكل 13.5(b). تزداد القابلية المغناطيسية في البداية بشكل طفيف مع زيادة درجة الحرارة وبعد درجة حرارة نيبيل تتناقص القابلية المغناطيسية مع درجة الحرارة بالصورة التالية:

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

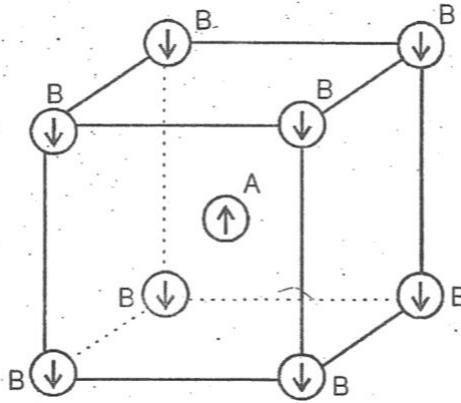
الترتيب العكسي للغزل المغناطيسي للموقع المجاور في هذه المواد ينتج من خلال التفاعل المتبادل الغير مفضل.

ترتيب الغزل على النحو التالي:



امثلة: اكسيد الحديدوز FeO واكسيد المانجنيز MnO واكسيد الكروم Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> واملاح العناصر الانتقالية.

نظرية الفرومغناطيسية المضادة



الشكل 17.5 وحدة خلية مركزية مع غزل للذرات A في اتجاه معاكس للذرات B

دعنا نعتبر بلورة مادة فرومغناطيسية مضادة تحتوي على نوعين من الذرات A و B موزعة في الشبكة البلورية بحيث ان الذرات B تشغل نقاط الاركان في الشبكة البلورية المركزية المكعبة والذرات A تشغل مركز الشبكة البلورية المكعبة كما هو موضح في الشكل 17.5. افترض ان الذرة عند الموقع A لها غزل للأعلى والذرة عند الموقع B لها غزل إلى الاسفل. تمتلك كل المواقع عزم ثنائي قطب مغناطيسي. كل موقع

A محاط بثمانية مواقع B وكل ذرة A تمتلك 8 جيران من الذرة B والعكس بالعكس. لنفترض ان هناك تفاعل فرومغناطيسي مضاد A-B وكذلك تفاعل A-A وتفاعل B-B. إذا كانت  $H_a$  و  $H_b$  هما يمثلان المجال المغناطيسي الجزيء عند الموقع A والموقع B على التوالي، فان

$$H_a = H - \alpha I_a - \beta I_b$$

$$H_b = H - \alpha I_b - \beta I_a$$

حيث ان H هو المجال المغناطيسي المطبق، و  $I_a$  و  $I_b$  هما شدة المغنطة للشبكة البلورية A، و B، و  $\alpha$  و  $\beta$  ومجال ويز "weiss" الجزيئي ثوابت مثل  $\beta$  هي ثابت التفاعل المتبادل A-B و  $\alpha$  ثابت التفاعل المتبادل A-A او التفاعل المتبادل B-B.

دعنا نعتبر ثلاثة مناطق لدرجة الحرارة

**الحالة I: عندما تكون  $T > T_N$**

اي عندما تكون درجة الحرارة اعلى من درجة حرارة نييل وهنا نكون بعيدين عن التشعب. تمغنط الشبكة البلورية A يعطى بالعلاقة التالية:

$$I_a = (N\mu^2/3kT)H_a$$

حيث N هو عدد الذرات لكل وحدة حجم.

إذا افترضنا ان عزم ثنائي القطب المغناطيسي على المواقع B متماثل تماما مع العزم على المواقع A ويوجد عدد متساوي من مواقع A و B وعدد متساوي من الذرات لكل وحدة حجم في المواقع A و B عندها يكون لدينا

$$I_b = (N\mu^2/3kT)H_b$$

دعنا نفترض ان

$$I = I_a + I_b$$

$$\begin{aligned}\therefore I &= \left( \frac{N\mu^2}{3kT} \right) (H_a + H_b) \\ &= \left( \frac{N\mu^2}{3kT} \right) (2H - (\alpha + \beta)I) \\ \therefore I \left[ 1 + \left( \frac{N\mu^2}{3kT} \right) + (\alpha + \beta) \right] &= \frac{2N\mu^2}{3kT} H\end{aligned}$$

بأخذ  $\theta = \frac{N\mu^2}{3k} (\alpha + \beta)$  تساوي درجة حرارة كيبوري و  $C = \frac{2N\mu^2}{3k}$  تساوي ثابت كيبوري،

$$\chi = \frac{I}{H} = \frac{\frac{C}{T}}{1 + \frac{\theta}{T}} = \frac{C}{T + \theta}$$

**الحالة II: عندما تكون  $T = T_N$**

عند درجة حرارة نييل، نكون لا زلنا بعينين جدا عن تأثيرات التشبع.

تزداد هنا درجة حرارة نييل للمادة عندما يزداد معامل  $\beta$  للتفاعل المتبادل A-B، ويتناقص عندما يزداد معامل  $\alpha$  للتفاعلات المتبادلة A-A و B-B.

وعليه يكون لدينا

$$\frac{T_N}{\theta} = \frac{\beta - \alpha}{\beta + \alpha}$$

توضح هذه المعادلة ان  $T_N < \theta$  وهذا يشير إلى ان المعامل  $\alpha$  يكون موجبا.

### الحالة III: عندما تكون $T < T_N$

دعنا نفترض للتسهيل ان هناك تفاعل متبادل A-B فقط اي ان  $\alpha$  تساوي صفر. نتيجة للتباين البلوري سيكون لوحد او أكثر من اتجاهات الغزل الطبيعي الميل نحو ان تترتب مع بعضها البعض. لهذا يكون لدينا حالتين خاصتين هامتين. عندما يكون المجال المغناطيسي المطبق عموديا على اتجاه الغزل الطبيعي،

$$\chi_{\perp} = \frac{1}{\beta}$$

لهذا تكون القابلية المغناطيسية غير معتمدة على درجة الحرارة.

عندما يكون المجال المغناطيسي المطبق موازيا لاتجاه الغزل الطبيعي عند درجة حرارة  $T = 0$  و  $\chi_{\parallel} = 0$  وكذلك تزداد القابلية المغناطيسية بنعومة في صورة شكل قطع ناقص من صفر عند درجة حرارة 0K إلى قيمة عظمى عند  $T = T_N$  والتي عندها تنعدم المغنطة التلقائية وبالتالي فان قيمة القابلية المغناطيسية تتناقص مع زيادة درجة الحرارة.