الباب الثالث عشر

الخواص المغناطيسية للجوامد

ترتبط الخواص المغناطيسية للمواد بالحركة المدارية والمغزلية للالكترونات فى ذراتها . وتقاس عادة هذه الخاصة المغناطيسية بالقابلية المغناطيسية magnetic susceptibility لوحدة الحجوم من المادة X وتعريفها هو :

$$X = M / H$$

حيث M هو العزم المغناطيسى لوحدة الحجوم «magnetization»

و H هو الشدة المغناطيسية .

المواد انواع :

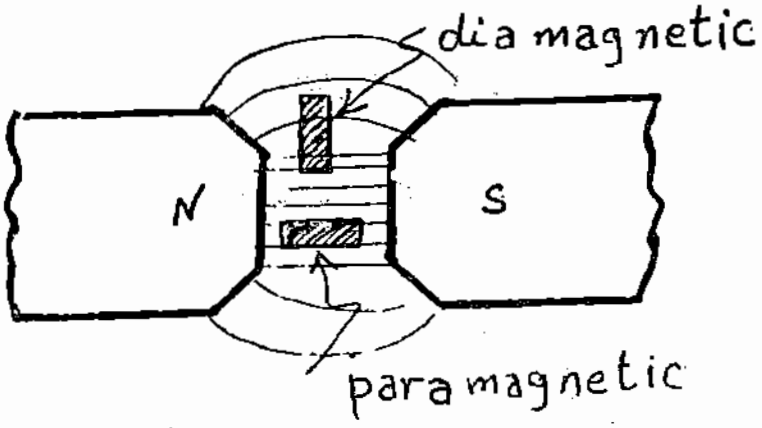
(ا) مواد ديا مغناطيسية : Dia magnetic

ويكون لها قابلية مغناطيسية سالبة اى انها تتنافر مع الأجزاء القوية من المجال المغناطيسى اذا وضعت فيه

(ب) مواد بارا مغناطيسية : Para magnetic

وهى التى تنجذب للمناطق القوية فى المجال المغناطيسى . وقابليتها موجبة .

واذا كانت القابلية المغناطيسية لهذه المواد كبيرة جدا سميت بالمواد
الفيرو مغناطيسية Ferro - magnetic



شـــكل (١٣ ــ ١)

اذا وضعنا مادة ما فى مجال مغناطيسى فانها تنجذب او تتنـــافر معه بقوة F تتناسب مع شدة المجال H وكذلك مع معدل تغير المجال مع المسافة $\frac{dH}{dx}$. اى أن

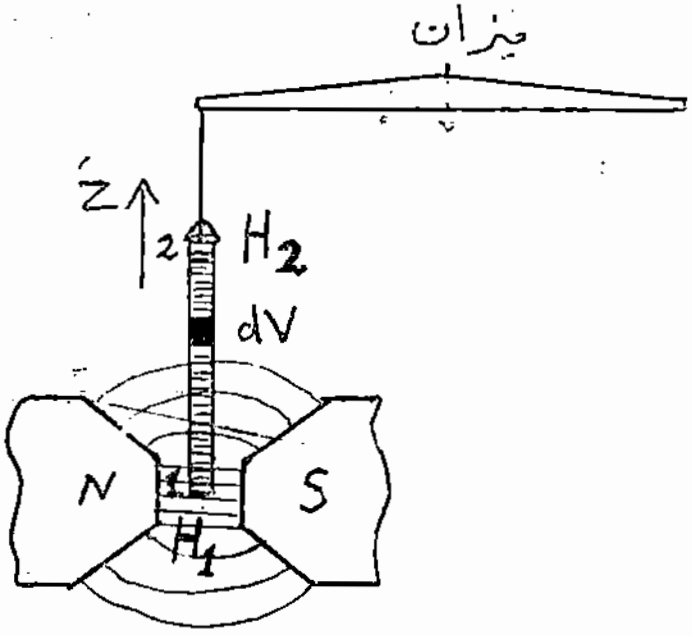
$$F = X \cdot V \cdot H \cdot \frac{dH}{dx}$$

حيث V هو حجم المادة وتعطى القابلية المغناطيسية X مقياسا للتغير فى العزم المغناطيسى للذرات بعد التاثير بالمجال H

قياس القابلية المغناطيسية :

طريقة جوى Gouy method

توضع المادة على شكل اسطوانة رفيعة بين طرفى مغناطيس قوى يكون المجال فيه غير منتظم . وتقاس القوة المؤثرة على المادة (سواء كانت جاذبة



شـــــكل (١٣ — ٢)

كما فى حالات المواد البارا مغناطيســـــية او نافرة كما فى حالات المواد الديا مغناطيسية) بواسطة ميزان حساس .

القوة فى الاتجاه الراسى والمؤثرة على حجم صغير dV هى

$$dF_z = X\ H\ \frac{dH}{dz}\ .\ dV$$

$$= \tfrac{1}{2}\ X\ \frac{dH^2}{dz}\ dx\ dy\ dz$$

$$\therefore\ dF_z = \tfrac{1}{2}\ X\ \frac{dH^2}{dz}\ dx\ dy\ dz$$

وتكون القوة الكلية المؤثرة على الجسم هى :

$$F_z = \tfrac{1}{2} \chi \int_1^2 \frac{d}{dz} H^2 \, dx \, dy \, dz$$

$$= \tfrac{1}{2} \chi A (H_1^2 - H_2^2)$$

حيث A هى مساحة مقطع المادة (dx dy) و H_1 ، H_2 هما شدتى المجال عند طرفى المادة . ولما كانت H_1 اكبر جدا من H_2 وذلك فى حالة مادة اسطوانية طويلة طرفها العلوى بعيد عن قطبى المغناطيس ، ولما كانت قيمة المجال مربعة فى القانون لذلك يمكن اهمال H_2^2 بالنسبة الى H_1^2 وتصبح القوة على المادة

$$F_z = \tfrac{1}{2} \chi A H^2$$

حيث H هى شدة المجال بين قطبى المغناطيس ويمكن قياسها عمليا بواسطة فلكسمتر وملف باحث

وقد وجد أن القابلية المغناطيسية لمعظم المواد سواء البارا أو الديا مغناطيسية صغيرة وتتراوح قيمتها بين ١٠ ٫ ٦ و ١٠ ٫ ٧

نظرية لانجفين للديا مغناطيسية

Langevin Diamagnetism equation.

يؤثر اى مجال مغناطيسى على حركة الكترونات الذرة فيعطيها حركة رحوية pressional اضافية لها تردد زاوى angular frequency

$$\omega_L = \frac{eH}{2mc}$$

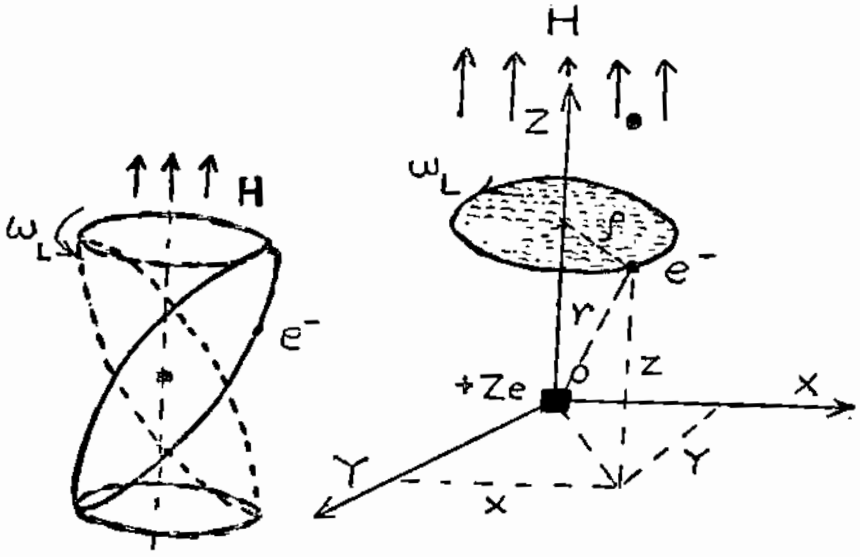
تيارا ديا مغناطيسيا I يعطى بالمعادلة : ــ

$$I = -\frac{Ze}{C.T.} = -\frac{Ze\ \omega L}{2\pi\ C} \quad \text{nm e}$$

$$\therefore \quad I = -\frac{Ze}{2\pi\ c} \cdot \frac{eH}{2m\ c} \quad \text{e.m.u.}$$

العزم المغناطيسى M هو حاصل ضرب التيار فى مساحة المسار فاذا كان ρ هو متوسط نصف قطر الحركة الرحوية للالكترون حول المجال المغناطيسى يكون

$$M = -\frac{Ze^2\ H}{4\pi\ m\ c^2} \times \pi\ \rho^2$$



شكل (١٣ ــ ٣)

اذا كانت $\overline{r}$ هى متوسط نصف قطر مسار الالكترونات وباعتبار توزيعا كرويا للشحنة حول النواة ، يكون $x^2 = y^2 = z^2$ ويكون $x^2 + y^2 + z^2 = r^2 = + 3/2\rho^2$

ويصبح العزم المغناطيسى للذرة الواحدة هو :

$$M = - \frac{Z e^2}{6mc^2} H \overline{r^2}$$

فاذا كان هناك عدد N ذرات فى وحدة الحجوم من المادة تكون القابلية المغناطيسية لوحدة الحجوم هى :

$$X = \frac{M}{H} = - \frac{Z e^2}{6m c^2} N \overline{r^2}$$

ويمكن تعيين قيمة $\overline{r}^2$ اذا عرف توزيع الشحنات حول النواة ويتم حساب ذلك باستخدام ميكانيكا الكم . والحل الوحيد الكامل لهذه المشكلة هو لذرة الأيدروجين . ولكن توجد حلول تقريبية للانواع الأخرى من الذرات تعطى قيما للقابلية المغناطيسية X بحيث تتفق النظرية مع التجربة .

النظرية الكمية للبارا مغناطيسية Quantum theory of paramagnetism

تكون الذرة بارا مغناطيسية اذا كان لها محصلة عزم مغناطيسى ناشىء عن تحصيل العزم المغناطيسى المدارى والمغزلى .

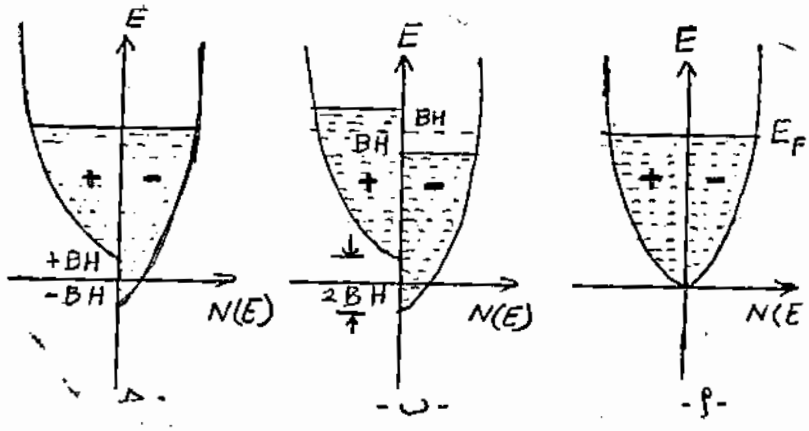
جميع الذرات التى تحتوى عددا فرديا من الالكترونات تكون بارا مغناطيسية حيث ان العزم المغناطيسى المغزلى لا يمكن ان يكون صفرا .

عند التأثير بمجال مغناطيسى خارجى فان العزوم المغناطيسية المغزلية تترتب اما موازية او عكس موازية لاتجاه المجال المغناطيسى تبعا

(parallel or anti-parallel) لاتجاه الحركة المغزلية للالكترون .

تتوقف الخواص البارا مغناطيسية للبلورات على ترتيب الحركة التعاونية للعزوم المغناطيسية الالكترونية فى اتجاه أو فى عكس اتجاه المجال .

عند تطبيق احصاء فيرمى وديراك على الغاز الالكترونى فى الفلز نجد ان توزيع الألكترونات عند درجة الصفر المطلق يكون على شكل دالة قطع مكافىء وتمثل العلاقة بين كافة مستويات الطاقة N (E) بدلالة الطاقة E (انظر شكل ١٣ — ٢)



شـــكل (١٣ — ٤)

عند الصـــفر المطلق وفى غياب اى مجـال مغناطيسى تكون جميع المستويات الاقل من طاقة فيرمى E F مشغولة بالكترونين لكل مستوى يكون مغزلاهما متعاكسين S = ± ½ .

اى ان الالكترونات تشكل مجموعتين تبعا للحركة المغزلية . وعند التاثير بمجال مغناطيسى نجد أن الألكترونات ذات المغزل الموجب مثلا تترتب فى اتجاه المجال بينما تترتب عكس ذلك الالكترونات الأخرى .

اذا كان بوهر ماجنتون هو B وشدة المجال H نجد ان طاقة كل الكترون مغزلة موجب تزداد بمقدار $+ B H$ بينما تنقص طاقة الألكترون ذو المغزل السالب بمقدار $- B H$ ونحصل على الشكل ب . وهذا الوضع غير مستقر . وتتساوى فى الحال مستويات الطاقة العليا تحت تأثير التهييج الحرارى

فمثلا : اذا كان $H = 10^5$ Oe يكون المقدار $BH = 10^{-3}$ eV ولهذا السبب فان kT تكون اكبر كثيرا فى المعتاد من BH ولهذا السبب نجد ان القابلية المغناطيسية لبعض الفلزات لا تتأثر بدرجة الحرارة وهو خلاف ما ينص عليه قانون كورى الذى يعطى تغيرا عكسيا لـ X مع T

تغير القابلية المغناطيسية مع درجة الحرارة :

اعتبر البارا مغناطيسية الناشئة عن الحركة المغزلية للالكترونات

$$ms = \pm \frac{1}{2}$$

عند التأثير بمجال مغناطيسى H تنفلق مستويات الطاقة بمقدار

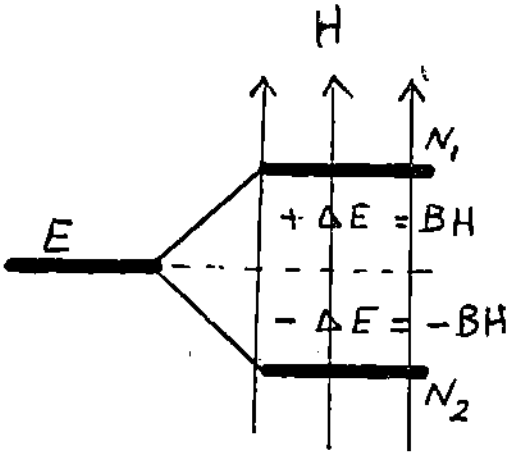
$$\Delta E = g B H ms$$

حيث g هو ثابت الانشطار للاندى Landé splitting factor ، ms هو العدد الكمى المغناطيسى المغزلى .

نفرض أن هناك مستوى واحد فقط انفلق الى مستويين فى وجود المجال المغناطيسى وأن تعداد الالكترونات ذات المغزل الموجب على المستوى الأول هو N_1 بينما تعداد الألكترونات ذات المغزل السالب على المستوى الآخر هو N_2 . اذا كان N هو العدد الكلى للذرات لوحدة الحجوم يكون

$$N = N_1 + N_2$$

باستخدام احصاء ماكسويل وبولتزمان يكون تعداد الالكترونات على



شـــــكل (١٣ — ٥)

المستوى الأول عند الاتزان الديناميكى الحرارى عند الدرجة $T^{\circ}K$ هو

$$N_1 = e^{\Delta E/kT}$$

وتعداد الألكترونات على المستوى الثانى

$$N_2 = e^{-\Delta E/kT}$$

بقسمة المعادلتين :

$$\therefore \frac{N_1}{N} = \frac{e^{\Delta E/kT}}{e^{\Delta E/kT} + e^{-\Delta E/kT}}$$

ايضـــــا

$$\frac{N_2}{N} = \frac{e^{-\Delta E/kT}}{e^{\Delta E/kT} + e^{-\Delta E/kT}}$$

ويكون بذلك مقدار المغناطيسية الناشئة عن N ذرات فى وحـــدة الحجوم هو :

$$M = g\,B\,ms\,(N_1 - N_2)$$

$$= g\,B\,N\,ms\,\frac{e^{x} - e^{-x}}{e^{x} + e^{-x}} = ms\,BN\,g\,\tanh x$$

$$\frac{\Delta E}{kT} = x = g\,BmsH/kT \qquad \text{حيث}$$

$$\tanh X = X \quad \therefore X \ll 1 \qquad \text{عند ما تكون}$$

$$\therefore M = ms\,B\,N\,g\,.\,\frac{g\,BmsH}{k\,T} = \frac{N\,g^2\,ms^2\,B^2\,H}{k\,T}$$

معامل الانشطار للاندى للالكترونات $g = 2$ يساوى اثنين وبوضع $ms = \frac{1}{2}$ نحصل على القابلية المغناطيسية X

$$X = \frac{M}{H} = \frac{N\,B^2}{k\,T}$$

أى أن X تتناسب عكسيا مع درجة الحرارة المطلقة T

الرنين الالكترونى البارا مغناطيسى

Electron paramagnetic resonance E S R

عند وضع بلورة بارا مغناطيسية فى مجال مغناطيسى H فى اتجاه Z تنفلق مستويات الطاقة الالكترونية تبعا لتأثير زيمان ·

التغير فى طاقة الألكترون ΔE هو

$$\Delta E = g \; BH \; ms$$

الفرق بين مستويى الطاقة الذين استحدثا بواسطة التأثير بالمجال المغناطيسى هو

$$\Delta E = 2 \; g \; B \; H \; ms$$

حيث B هو ماجنتون بوهر ، معامل الانشطار للاندى بالنسبة للالكترونات يساوى ٢ ، $ms = \frac{1}{2}$.

أى أن $\Delta E = 2 \; B \; H$

عند ما تؤثر على المادة بمجال كهربى متردد تردده ν يمكن احداث انتقال للالكترونات من المستوى الأول للثانى وبالعكس .

الطاقة التى يمتصها الالكترون للانتقال للمستوى الأعلى هى

$$E = h \nu = 2 \; B \; H$$

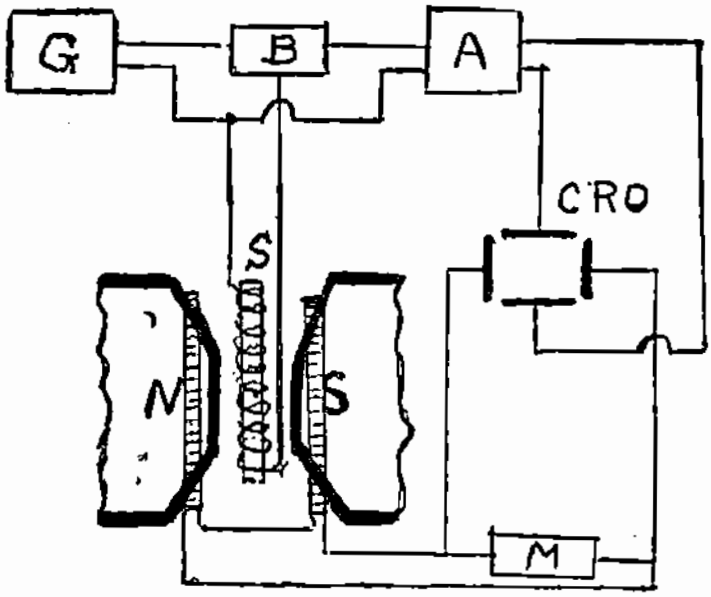
عند ما يتساوى $h\nu$ بالمقدار $2 \; B \; H$ يحدث رنين الكترونى مغزلى لأن انتقال الألكترون من المستوى الأقل طاقة للأعلى يتحتم معه أن يغير الالكترون من اتجاه حركته المغزلية وبالمثل عند ما يعود للمستوى الأصلى .

ولذلك تسمى هذه العملية E S R electron spin resonance الرنين الألكترونى المغزلى .

ويوجد عادة طريقتين لاحداث الرنين الأولى هى بتغيير شدة المجال المغناطيسى H مع تثبيت التردد للمجال الكهربائى والأخرى بالعكس نثبت المجال H ونغير التردد للمجال الكهربائى .

عند حدوث الرنين تمتص طاقة الرنين من دائرة المجال الكهربائى

ويؤخذ لذلك التردد الذى يحدث عنده اكبر امتصـــــاص للطاقة على انه تردد الرنين ٠



طريقة الرنين الالكترونى المغزلى
(E S R)

شـــــكل (١٣ — ٦)

G = r.f. signal generator

S = sample mounted in a coil.

Hz r.f. magnetic field, B bridge

A r.f. amplifiier, CRO oscilloscope.

Hx is constant sstatic magnetic field slowly modulated by modulator M

الرنين المغناطيسى النووى NMR Nuclear magnetic resonance.

يوجد لنواة الذرة ايضا كمية حركة زاوية مصاحب لها عزم مغناطيسى يتأثر هو الآخر بالمجال المغناطيسى الخارجى ويحدث انفلاق فى مستويات الطاقة داخل النواة . يحدث رنين نووى مغناطيسى عند ما تتذبذب النواة بين مستويات الطاقة

رنين السيكلوترون Cyclotron resonance

عند وضع بلورة شبه موصلة فى مجال مغناطيسى مستمر تتحرك الالكترونات داخلها فى مسارات حلزونية حول اتجاه المجال . اذا كان نصف قطر المسار هو r وسرعة الالكترون v تكون القوة الطاردة هى :

$$F = \frac{m^* v^2}{r}$$

وهذه القوة تتزن مع قوة لورنز على الألكترون والناشئة عن المجال H

$$F = \frac{H e v}{c}$$

$$\therefore \quad \frac{m^* v^2}{r} = \frac{H e v}{c}$$

عند التأثير بمجال متردد اتجاهه عمودى على اتجاه المجال المستمر يحدث رنين بين تردد المجال المتغير $v = \frac{\omega}{2\pi}$ وتردد الحركة الالكترونية فى المجال المستمر عند ما يتساوى الترددان .

بقياس الامتصاص لطاقة المجال المتردد نحصل على اكبر امتصاص maximum absorption عند حدوث الرنين وبذلك يمكن تعيين تردد الالكترون فى المجال المستمر .

من المعادلة السابقة

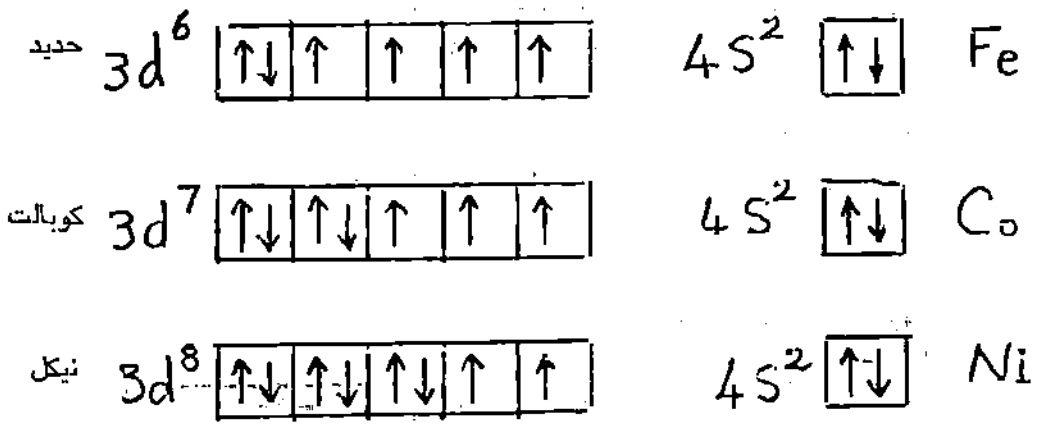
$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{e\,H}{m^{*}\,c}$$

حيث m^{*} هى الكتلة الفعالة للالكترون فى البلورة . ونظرا لأن هذه التجربة تشبه عادة ما يحدث داخل السيكلوترون لذلك فتسمى الظاهرة برنين السيكلوترون واهميتها فى انها تسمح بتعيين قيمة m^{*}

الخاصة الفيرو مغناطيسية Ferro-magnetism

ينطبق التحليل السابق لمغناطيسية المواد على تلك البلورات التى يكون فيها الأغلفة الداخلية inner shells ممتلئة تماما بالالكترونات وتكون الكترونات التكافؤ valence electrons حرة الحركة فى البلورة . وينشأ العزم المغناطيسى للذرة فى هذه الحالة من الحركة المغزلية لهذه الالكترونات .

أما فى بعض الفلزات فيوجد داخلها اغلفة غير ممتلئة تماما بالالكترونات وفى هذه الحالة تساهم الحركة المدارية بالاضافة الى الحركة المغزلية للالكترونات فى تكوين العزم المغناطيسى لذرات هذه المواد . ويؤدى ذلك الى قيم مرتفعة جدا للقابلية المغناطيسية . ويطلق على مثل هذه المواد بالفيرو مغناطيسية مثل الحديد والكوبالت والنيكل .



شـــــكل (١٣ ــ ٧)

تتوزع الكترونات الفلزات السابقة دخل الغلاف على d — shell مستويات الطاقة كما مبين بشكل (١٣ ــ ٧)

أى أن العزم المغناطيسى الذرى لهذه الفلزات (حديد ــ كوبالت ــ نيكل) على الترتيب تساوى أربعة ثلاثة ، اثنين بوهر ماجنتون ٠

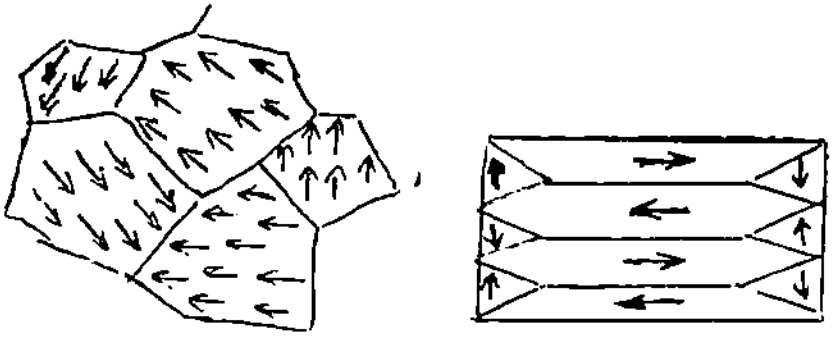
المناطق الفيرو مغناطيسية Ferro-magnetic domains

فى المواد الفيرو مغناطيسية يكون تأثير المجال المغناطيسى على الحركة المغزلية للالكترونات قويا مما يسبب أن تتراص هـــذه الحركات بجوار بعضها محاولة أن تأخذ اتجاة المجال المغناطيسى ٠

حتى فى حالة عدم وجود مجال خارجى فان المجالات الجزيئية لهـــذه المغناطيسيات الجزيئية قد تسبب تراص هذه الحركات المغزلية فى مناطق متجاورة قد تختلف بينها اتجاهات التراص ٠ وتسمى بالمناطق المغناطيسية domains ولا يوجد صلة بين هذه المنـــاطق وحبيبـــات المادة متعددة الحبيبات poly crystalline اذ ان الحبيبة grain الواحدة قدتحتوى على العديد من المناطق المغناطيسية ٠

وعند ايجاد محصلة العزم المغناطيسى لكل هذه المناطق نجد أن العزم يساوى صفرا اذا كانت المـــادة غير ممغنطة .

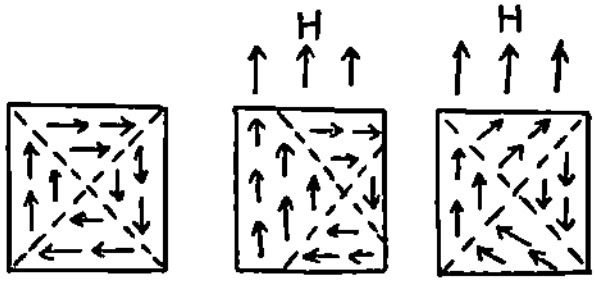
يبين الشكل مادة فيرو مغناطيسية غير ممغنطة العزم الكلى المغناطيس فيها يساوى صفرا . تبين الأسهم اتجاه المغنطة داخل المناطق المختلفة .



شـــــكل (١٣ ــ ٨)

كيفية تمغنط المواد الفيرو مغناطيسية : Magnetization processes

عند ما تؤثر بمجال مغناطيسى على المادة الغير ممغنطة يزداد العزم المغناطيسى لها بأحد طريقين او كليهما : ــ

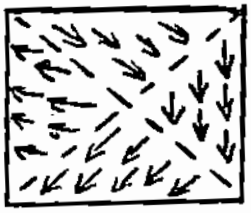


مغنطه بالدوران مغنطه بحركة حدود المناطق المغناطيسية غير ممغنطة

شـــكل (١٣ ــ ٩)

أولا : عن طريق تحرك حدود المناطق المغناطسية حيث تنمو تلك المناطق migration of domain boundaries التى تكون اتجاهات حركاتها المغزلية قريبة من اتجاه المجال المغناطيسى الخارجى على حساب تلك المناطق التى يكون اتجاهات حركاتها المغزلية بعيدة عن اتجاه المجال .

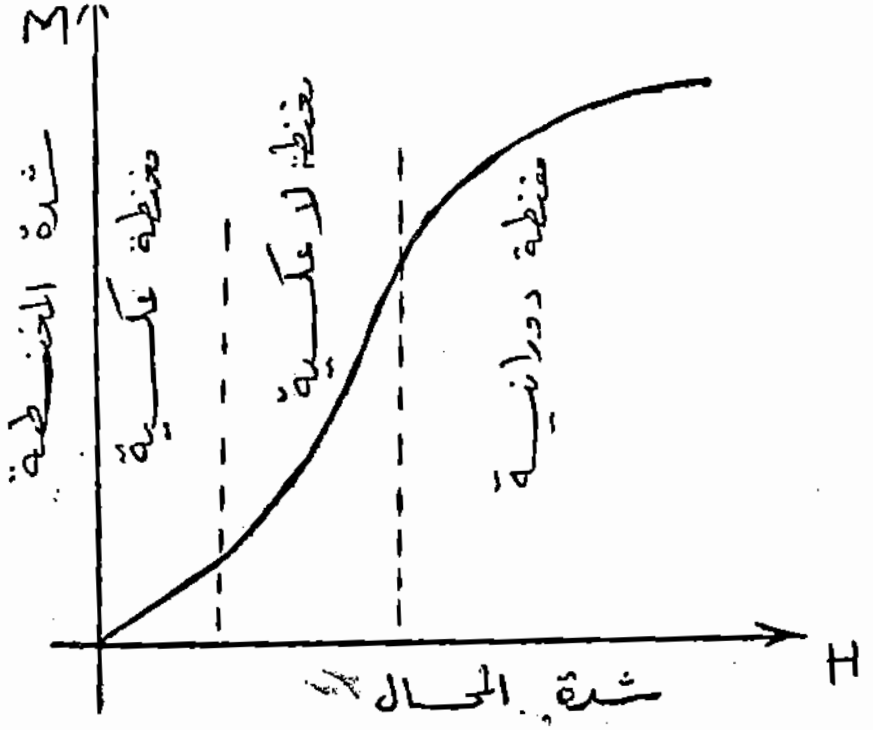
ثانيا : قد يتم التمغنط عن طريق دوران اتجاه الحركات المغزلية وبالتالى دوران اتجاهات العزوم المغناطيسية داخل المنطقة الواحدة . وذلك لكى تتراص الحركات المغزلية فى اتجاه المجال المغناطيسى .



شكل (١٣ — ١٠) دوران اتجاهات العزوم

وعادة ما تتم المغنطة فى المجالات الضعيفة بواسطة تحرك حدود المناطق المغناطسية ، ولكن عند مايكون المجال قويا تتم المغنطة بطريقة دوران اتجاهات العزوم المغناطيسية الجزيئيه .

يبين شكل (١٣ — ١١) منحنى المغنطة حيث تظهر الطرق المختلفة للمجال .



شكل (١٣ — ١١)

تاثير درجة الحرارة :

تتاثر المغنطة بدرجة بسيطة عند رفع درجة الحرارة ولكن عنـد الوصول الى درجة حرجة Tc تسمى درجة حرارة كورى نجد أن جميع مغنطة المـادة تتلاشى وتتحول المـادة الفيرو مغناطيسية الى مادة بارا مغناطيسية فوق تلك الدرجة ٠

ولكى نفسر السبب فى هذا الانتقال الفجائى من حالة الفيرو الى حالة البارا مغناطيسية عند الدرجة الحرجة دون حدوث انتقال تدريجى ، نعتبر المغنطة على أنها تحركات تعاونية بين مجاميع المغناطسيات الجزيئة ، وتحتاج الى طاقة عند تغيير اتجاه عزوم هذه المغناطيسيات الأولية ٠

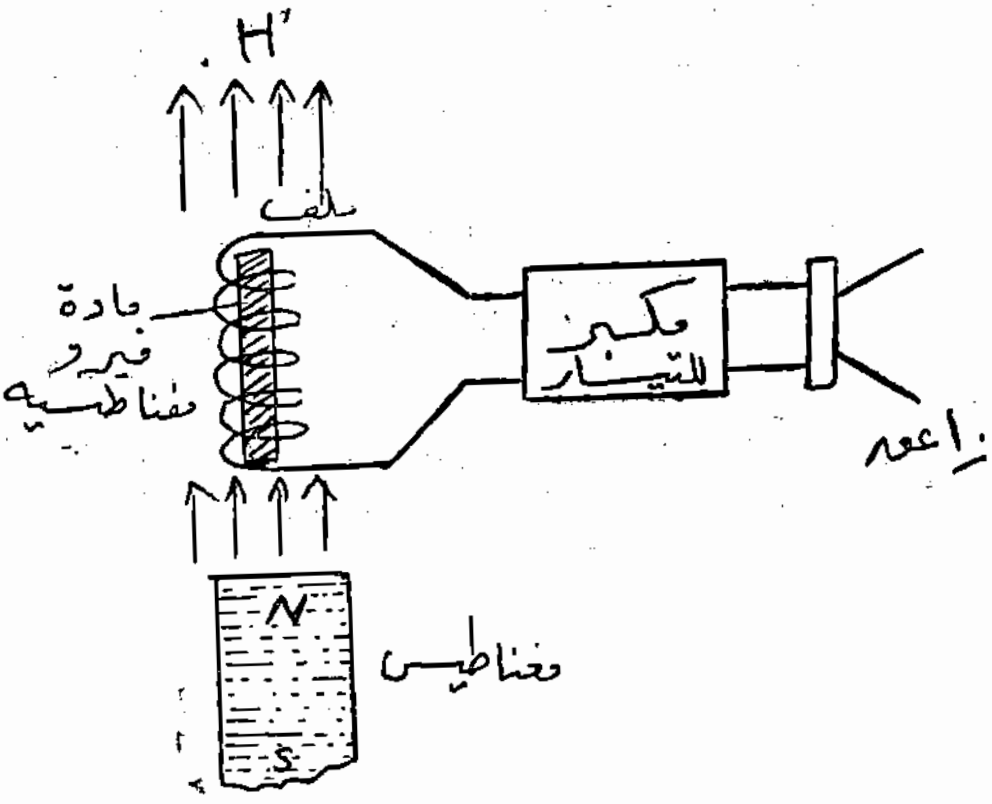
فمثلا فى منطقة مغناطسية معينة داخل مادة فيرومغناطيسية جميع المغناطيسيات الأولية فيهـا ذات ترتيب خاص واتجاه معين ٠ ولذلك لا يمكن تغيير اتجاه اى مغناطيس أولى واحد فقط من المجموعة عن الاتجاه العام للباقين اذ أن المجموعة كلها تمانع ذلك . ولذلك فان الطاقة اللازمة لهذا العمل تكون كبيرة جدا لا يستطيع فعلها التهييج الحرارى ٠

ولكن برفع درجة الحرارة حتى Tc يتلاشى ترتيب اتجاهات هذه المغناطيسات فجاة كما يحدث عادة فى جميع الظواهر التعاونية Cooperative phenomenon.

ظاهرة باركهاوزن : The Barkhausen effect

فى عام ١٩١٩ اثبت باركهاوزن بطريقة غير مباشرة وجود المناطق المغناطيســـــية domain structure

تتركب التجربة من ملف يوضع بداخله المادة الفيرومغناطيسية ويتصل الملف بمكبر للتيار ثم زاعق ٠



شكل (١٣ — ١٢)

تجربة باركهـا وزن

عند تقريب مغناطيس دائم من المادة الفيرومغناطيسية تتغير المغنطة في المادة . هذا التغير يتم بطريقة فجائية عندما يزداد حجم المناطق المغناطيسية التى تكون المغناطيسات الاولية فيها مرتبة فى اتجاه المجال الخارجي فلحظة ازدياد المغنطة تقطع خطوط القوى المغناطيسية الملف فينشأ عن ذلك تيار تأثيرى . وتكبير التيار بواسطة المكبر يسمح بأن نسمع اصوات مميزة لتلك الحركات اثناء التمغنط . وقد قدر التغير فى حجم المناطق كل مرة يسمع فيها صوت بما يعادل $١٠^{-٨}$ سم٣

اما الاثبات المباشر لوجود مناطق مغناطيسية فقد تم بواسطة **اشكال** بيتر Bitter patterns وذلك عام ١٩٣١

وتتلخص الطريقة فى تحضير سطح البلورة الفيرومغناطيسية بعناية بحيث يكون املسا • ثم توضع عليه قطره من محلول غروى colloidal solution يحتوى معلقا دقيقا من مادة فيرومغناطيسية مثل الماجنتيت magnetite (سوداء اللون X •

عند النظر تحت الميكروسكوب الضوئى لسطح البلورة نجد ان هذه الذرات المعلقة بالمحلول (ذرات الماجنتيت) قد شكلت خطوطا سوداء يطلق عليها أشكال بيتر • وترسم هذه الخطوط حدود المناطق المغناطسية على السطح •

والسبب فى انجذاب جزيئات الماجنتيت لحدود المناطق هو ان بالقرب من هذه الحدود توجد مجالات مغناطيسية قوية محلية تجذب هذه الجزيئات • strong local magnetic field