

5-4 الزخم الزاوي والعزم المغناطيسي المداري للإلكترون

The Angular Momentum and the Orbital Magnetic Moment of Electron

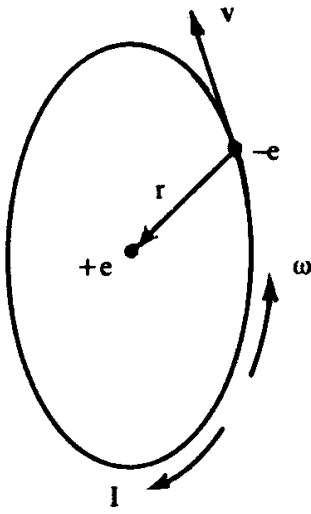
إذا فرض أن إلكترونًا واحدًا يدور حول نواة تحتوي على بروتون واحد ونيوترون بسرعة زاوية قدرها ω وعلى بعد قدره r ، كما في حالة ذرة الهيدروجين [كما في شكل (4-3)] ولكي يبقى الإلكترون في مداره لا بد أن تكون القوة الطاردة المركزية (centrifugal force) الناتجة عن الحركة الدائرية تساوي قوة الجذب الاستاتيكي المركزي لكتلوم الناتجة من تجاذب الإلكترون الذي شحنته $(-e)$ مع البروتون والذي شحنته $(+e)$.

$$\therefore \text{electrostatic attraction force} = \text{centrifugal}$$

القوة الطاردة المركزية = (قوة الجذب الاستاتيكي)

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = m r \omega^2$$

$$\therefore \omega = \frac{e}{(4\pi\epsilon_0 m r^3)^{1/2}} \dots \dots \dots (9-4)$$



حيث m كتلة الإلكترون و ϵ_0 سماحية الفراغ وبما أن دوران الإلكترون ينتج عنه تيار شدته I وهو عبارة عن معدل مرور الشحنة e في الثانية الواحدة:

$$\therefore I = \frac{e}{T} = e \cdot f = e \frac{\omega}{2\pi} \dots \dots \dots (10-4)$$

حيث f هو التردد ويمثل عدد الدورات في الثانية الواحدة وبالتعويض عن ω من المعادلة (9-4) يُحصل على:

$$I = \frac{e^2}{2\pi(4\pi\epsilon_0 m r^3)^{1/2}} \dots \dots \dots (11-4)$$

شكل (4-3) حركة إلكترون حول نواة تحتوي على بروتون واحد ونيوترون بسرعة زاوية قدرها ω .

وإذا اعتبرت الحركة الدائرية للإلكترون تماثل مرور تيار في لفة دائرية مساحة مقطعها S ونصف قطرها r فإن العزم المغناطيسي الدائري للذرة يساوي.

$$P_m = IS = I\pi r^2 = \frac{e^2}{4} \left(\frac{r}{\pi \epsilon_0 m} \right)^{1/2} \dots \dots (12-4)$$

وبالتعويض عن m و e و ϵ_0 بقيمها المعروفة ، وعن r بالقيمة $5.28 \times 10^{-11} \text{m}$ كما في ذرة الهيدروجين في حالتها الطبيعية يُحصل على :

$$\therefore P_m = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \dots \dots (13-4)$$

وهذه القيمة تمثل أقل عزم للإلكترون في مداره ، ويسمى هذا الثابت بمغنتون بور (Bohr-magneton) وهي وحدة العزم المغناطيسي للإلكترون . ويرمز له بالرمز μ_B .

والعزم الحركي الزاوي المداري للإلكترون يعطى بالمعادلة :

$$L = mvr = mr^2\omega \dots \dots \dots (14-4)$$

ولكن من المعادلتين (10-4) و (12-4) يُحصل على :

$$P_m = IS = \frac{e\omega}{2\pi} \pi r^2 = \frac{1}{2} e\omega r^2 \dots \dots \dots (15-4)$$

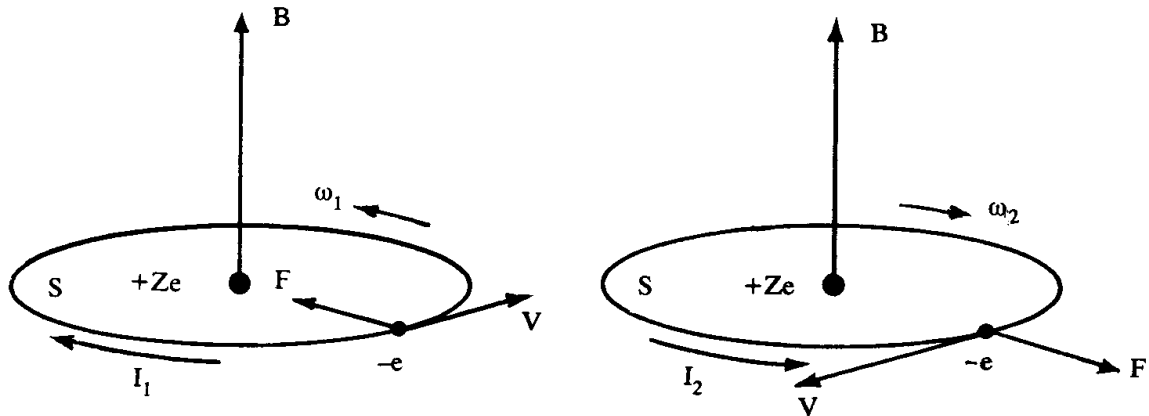
من هذه المعادلة والمعادلة (14-4) يُحصل على :

$$P_m = L \frac{e}{2m} \dots \dots \dots (16-4)$$

6-4 الدايامغناطيسية Diamagnetism

اكتشف ميخائيل فاراداي في عام 1846 أن مادة البزمث bismuth (Bi) تتنافر إذا وضعت في مجال مغناطيسي قوي وسمى هذه المادة باسم الدايامغناطيسية ، وهي ظاهرة توجد في كل المواد بتأثير ضعيف وتختفي تقريبا في المواد التي تتميز ذراتها بعزوم مغناطيسية كمعادلة البارامغناطيسية والفرومغناطيسية .

وظاهرة الدايامغناطيسية الضعيفة الناتجة عن التيارات الإلكترونية الدائرية تعرف بظاهرة لارمر (Larmar diamagnetism) نسبة لمكتشفها السير جوزف لارمر (Sir Joseph Larmar) العالم الانجليزي . ويوضح الشكل (4-3) لطريقة التي اتبعها لارمر لحساب الدايامغناطيسية . نجد في هذا الشكل إلكترونين يدور كل منهما في مسار دائري ثابت نصف قطره r حول نواة شحنتها $+Ze$ حيث Z عدد صحيح ، وبسرعة قدرها v ، وسرعة زاوية قدرها ω ومتعاكسين في الاتجاه .



شكل (4-4) إلكترونان يتحركان في اتجاهين متعاكسين ومسلط عليهما مجال مغناطيسي حثه B.

فإذا لم يسלט مجال مغناطيسي خارجي عليهما فإن حركة كل منهما تخضع للمعادلة

$$-mr\omega_0^2 = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad \text{or} \quad \omega_0^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{mr^3} \quad (17-4)$$

وإذا أخذت ذرة عددها الذري Z (atomic number) فتكون عدد إلكتروناتها Z. ويكون لهذه الإلكترونات مدارات مختلفة في أنصاف أقطارها وفي اتجاهها أيضا ويكون تأثير المجال المغناطيسي مختلفا من مدار إلى مدار آخر. فإذا أخذ متوسط توزيعات كل الإلكترونات فإن محصلة العزوم لكل ذرة وجدت مساوية لـ:

$$\bar{P}_m = -\frac{e^2}{6m} Z r_0^2 B \quad \dots \dots \quad (18-4)$$

حيث r_0^2 متوسط مربع أنصاف الأقطار (mean square radius) لمدارات الإلكترونات، وبذلك فإن قيمة M بالنسبة للمواد الدايمغناطيسية هي

$$M = N \bar{P}_m = -\frac{Ne^2}{6m} Z r_0^2 B \quad \dots \dots \quad (19-4)$$

$$\therefore \chi_m = \frac{\mu_0 M}{B} = -\frac{\mu_0 N e^2}{6m} Z r_0^2 \quad (20-4)$$

حيث N تمثل عدد الذرات في وحدة الحجم، وواضح أن M و χ_m لا تعتمدان على درجة الحرارة.

7-4 البارامغناطيسية Paramagnetism

هناك بعض الذرات والجزيئات لها عزوم مغناطيسية دائمة تكون موزعة عشوائيا وعند تسليط مجال مغناطيسي خارجي توجه هذه العزوم لتكون في وضع مواز للمجال المغناطيسي ويعطي ما يسمى بالظاهرة البارامغناطيسية (paramagnetic effect) وتسمى المواد بالمواد البارامغناطيسية.

وقد ينتهي هذا التوجيه للعزوم بسبب تأثير الطاقة الحرارية العشوائية للذرات ويكون لدينا بذلك عزوم ذرية عشوائية (مرتبة بشكل فوضوي - disordered arrangement). ففي الغازات ترتبط الطاقة الحرارية غالبا بالطاقة الحركية (kinetic energy) ويحدث التوزيع الفوضوي للعزوم نتيجة للتصادم بين الجزيئات. أما في الحالة الصلبة فإن الطاقة الحرارية تظهر على شكل طاقة اهتزازية (vibrational energy) للنظام التشابكي البلوري (crystal lattice) وهذه الطاقة مسؤولة عن التوزيع الفوضوي للعزوم أما في حالة السوائل فقد يحدث التأثيران معا.

وفي كل الحالات هناك تنافس بين التأثير الاتجاهي للمجال المغناطيسي الخارجي وبين التوزيع العشوائي للعزوم الناتج عن الطاقة الحرارية. ويتج عن ذلك توجيه جزئي (partial alignment) للعزوم الذي يعتمد على شدة المجال المغناطيسي وعلى درجة الحرارة.

إن العزم المغناطيسي لوحدة الحجوم (شدة التمغنط M) هو

$$M = \frac{NP_m^2 B}{3KT} \dots \dots \dots (21-4)$$

اما قابلية التمغنط (التأثرية) البارامغناطيسية فيمكن تكتب بالعلاقة:

$$\chi_m = \frac{M}{H} = \frac{\mu_0 M}{B} = \frac{\mu_0 N P_m^2}{3KT} \dots \dots (22-4)$$

$$\chi_m = \frac{C}{T} \dots \dots \dots (23-4) \quad \text{أو}$$

حيث

$$C = \frac{\mu_0 N P_m^2}{3K} \dots \dots \dots (24-4)$$

ويسمى C بثابت كيوري (Curie) والمعادلة (4-23) تسمى بمعادلة كيوري. وتحت هذه الظروف فإن التأثيرية المغناطيسية لا تعتمد على المجال المغناطيسي ولكنها تتناسب عكسيا مع درجة الحرارة، وسبب هذا الاعتماد أنه كلما زادت درجة الحرارة كلما زادت الطاقة الحرارية الداخلية العشوائية للذرات أو الجزيئات التي تكون سببا في نقصان درجة التوجيه للعزوم الذرية عند أي قيمة للمجال المغناطيسي.

8-4 الفيرومغناطيسية Ferromagnetism

يوجد في المواد الحديدية المغناطيسية مثل الحديد (Fe) والنيكل (Ni) والكوبالت (Co) تفاعل (interaction) قوي بين العزوم المغناطيسية للذرات المتجاورة فيما بينها بحيث يمكن للعزوم الذرية من توجيه نفسها بصورة متوازية تحت تسليط مجال مغناطيسي خارجي بسيط أو بدونه. ولذلك فالمواد الحديدية المغناطيسية لها نفاذية مغناطيسية كبيرة جدا ويمكن أن تتمغنط بصورة دائمة. وطالما أن العزوم المغناطيسية تكون جميعها تقريبا في اتجاه واحد بمجرد تسليط مجال خارجي بسيط فإن قيمة التشبع يمكن الوصول إليها عند قيم صغيرة للشدة المغناطيسية وفي هذه الحالة فإن العلاقة بين التمكنط M والمجال الخارجي المسلط H ليست علاقة خطية. وبالتالي فإن التأثيرية المغناطيسية χ_m للمواد الحديدية المغناطيسية ليست ثابتة ولكنها تتغير مع شدة المجال الخارجي H .

ويمكن القول كمحاولة أولى لتفسير هذه الظاهرة إن القوى التي أعطت التوجيه المغناطيسي للمواد الحديدية المغناطيسية هي تأثير القوى المغناطيسية الثنائية للمغانط الذرية الأحادية بعضها على بعض ولكن هذه القوى ليست أكبر في المواد الحديدية المغناطيسية منها في المواد البارامغناطيسية وكما وجد سابقا فهي ضعيفة حتى إنها غير قادرة على مقاومة التأثيرات العشوائية الناشئة على حركات الجزيئات أو الذرات المثارة حراريا «التهيج الحراري»، ولذلك تكون العزوم الذرية في المواد الحديدية المغناطيسية ضعيفة جدا وغير قادرة على توجيه نفسها.

في عام 1907 افترض العالم بيير فايس (Pierre Weiss) أن التفاعل القوي للعزوم المغناطيسية في المواد الحديدية المغناطيسية المذكور أعلاه يعطي مجالا مغناطيسيا داخليا قويا سماه المجال الجزيئي (molecular field) وأنه يتناسب مع شدة التمكنط M . فإذا فرض أن H_m قيمة المجال المغناطيسي الجزيئي عند درجة الحرارة T فإن:

$$\therefore M = \frac{\chi_m H}{1 - \lambda \chi_m}$$

وبالتعويض عن χ_m من المعادلة (4-21) يُحصل على :

$$M_T = \frac{\mu_0 N P_m^2 H}{3K \left(T - \frac{\lambda \mu_0 N P_m^2}{3K} \right)}$$

أو

$$M_T = \frac{\mu_0 N P_m^2 H}{3K (T - T_C)} \quad \dots \dots \dots \text{أ (4-25)}$$

$$M_T = \frac{CH}{T - T_C} \quad \dots \dots \dots \text{ب (4-25)}$$

وحيث إن M تتغير مع درجة الحرارة T فإنها تكتب عادة M_T ، وتصبح التأثيرية المغناطيسية في هذه الحالة كالتالي :

$$\chi_m = \frac{M_T}{H} = \frac{C}{T - T_C} \quad \dots \dots \dots (4-26)$$

حيث C ثابت كيوري وذلك حسب المعادلة (4-24) ، أما T_C فتسمى بدرجة كيوري (Curie temperature) وقيمتها هي :

$$T_C = \frac{\lambda \mu_0 N P_m^2}{3K} \quad \dots \dots \dots (4-27)$$

أما المعادلة (4-26) نتسمى بقانون كيوري وفايس (Curie-Weiss law) ويُحصل من المعادلتين (4-24) و (4-27) على :

$$\lambda = \frac{T_C}{C} \quad \dots \dots \dots (4-28)$$

مثال 1 : وضعت مادة بارامغناطيسية تأثيريتها $\chi = 4.59 \times 10^{-4}$ في مجال مغناطيسي شدته $H = 1.9 \times 10^4 \text{ A/m}$ ، احسب شدة التماغنط M والحث المغناطيسي B . إذا وضعت مادة فيرومغناطيسية تأثيريتها $\chi = 1000$ احسب مرة أخرى M و B وعلق على النتيجة.

الحل:

$$M = \chi_m H = 4.59 \times 10^{-4} \times 1.9 \times 10^4 = 8.721 \text{ A/m}$$

$$B = \mu H = \mu_0 (1 + \chi_m) H = 4\pi \times 10^{-7} (1 + 4.59 \times 10^{-4}) 1.9 \times 10^4 = 0.0239 \text{ Wb/m}^2$$

هذه النتيجة للمادة البارامغناطيسية أما بالنسبة للمادة الفيرومغناطيسية فإن:

$$M = \chi_m H = 1000 \times 1.9 \times 10^4 = 1.9 \times 10^7 \text{ A/m}$$

$$B = \mu H = \mu_0 (1 + \chi_m) H = 4\pi \times 10^{-7} (1 + 1000) 1.9 \times 10^4 = 23.9 \text{ Wb/m}^2$$

واضح من النتيجتين أن شدة التمكنط والحث المغناطيسي للمادة الفيرومغناطيسية أكبر بكثير من المواد البارامغناطيسية.