

## الفصل الخامس: أثر المجال المغناطيسي على الذرة

### محتويات الفصل:

- 1- تجربة شترين - جيرلاخ (اكتشاف السبين)
- 2- اثر الحقل المغناطيسي على الذرة
- 3- أثر زيمان العادي
- 4- أثر زيمان الشاذ
- 5- أثر باشن - باك

## 1- تجربة شترين-جيرلاخ (اكتشاف السبين)

### 1-1 مقدمة:

في دراستنا لعزم ثنائي القطب المغناطيسي بوجود و عدم وجود المجال المغناطيسي الخارجي توصلنا إلى نتائج تجريبية و نظرية لا تعارض بينها , و شرع المختصون بإجراء العديد من التجارب لاكتشاف انشطار مستويات الطاقة الأساسية (المنطبقة **degeneracy**) إلى المستويات الفرعية (اللامنطبقة **non degeneracy**) في حال وجود المجال المغناطيسي الخارجي و التركيز على العدد الكمي المغناطيسي الذي يحدد عدد المستويات الطاقوية التي ستتشرط إليها السوية الأساسية و التي يكون عددها  $2l + 1$  سوية طاقة و لنحاول معالجة الموضوع من وجهة نظر الطاقة لأننا سنتعامل مع مستويات الطاقة.

تعطى طاقة التفاعل بين عزم ثنائي القطب المغناطيسي و المجال المغناطيسي الخارجي B بالعلاقة الآتية :

$$\Delta E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} \quad (1)$$

فإذا كان المجال المغناطيسي موجه نحو المحور z فإن العلاقة (1) تصبح:

$$\Delta E = -\mu_z \cdot B_z \quad (2)$$

و لكن

$$\mu_z = -\frac{e}{2m} L_z = -m_l \mu_B$$

و عليه فان

$$\Delta E = -\left(\frac{e}{2m} L_z\right) \cdot B_z = -(-m_l \mu_B) \cdot B_z \quad (3)$$

$$\Delta E = \frac{e}{2m} L_z \cdot B_z = -m_l \mu_B \cdot B_z = m_l \hbar \omega_L \quad (4)$$

العلاقة (4) تبين بوضوح ان تغير مستويات الطاقة متعلق بالعدد الكمي المغناطيسي  $m_l$ .

تشير العلاقة (3) أنه لا يوجد تغير في مستويات الطاقة (نظريا ؟؟؟؟) للحالة المدروسة بالرغم من وجود مجال مغناطيسي خارجي. و هذه الحالة الخاصة الوحيدة التي نتجت من الدراسات النظرية لا تتفق مع التجربة.

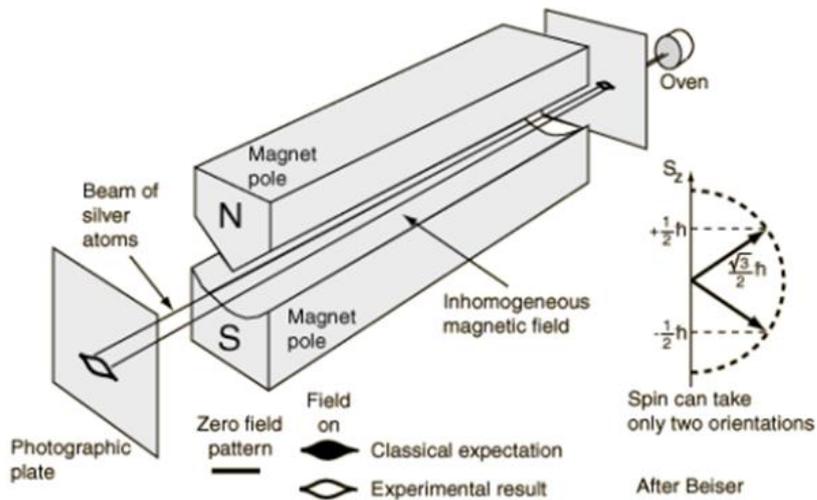
## 2-1 هدف التجربة

في عام 1922 م و السنة التي تلتها انجر العلمان شترين و جيرلاخ تجربة هدفها قياس عزم ثنائي القطب المغناطيسي للذرات الشبه الهيدروجينية (ذرات الفضة) من خلال انحرافها تحت تأثير مجال مغناطيسي متدرج الشدة باتجاه المحور  $Z$ .

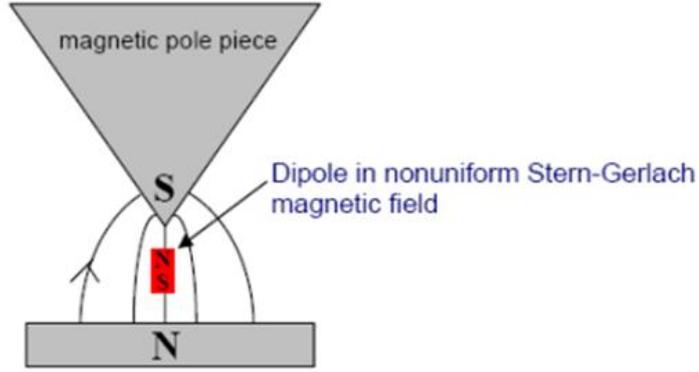
## 3-1 سير عمل التجربة

تم استخدام حزمة من ذرات الفضة المستقرة (غير مؤينة) تصدر من فرن خاص لهذه التجربة الشكل (1-5). تمر الحزمة من خلال فتحة للحصول على حزمة ضيقة من الذرات يتم توجيهها نحو مجال مغناطيسي ناجم عن مغناطيس خاص تزداد شدته باتجاه تزايد المحور  $Z$  الشكل (5-2). بعد خروج الذرات من المجال المغناطيسي تسقط على لوح تصوير يعمل ككاشف لترسب ذرات الفضة عليه.

و سبب اختيار الفضة لأنها تمتلك صفات الذرة أحادية الإلكترون (الهيدروجين) و ان نواتها تمتلك 47 بروتون محاطة ب 46 إلكترون داخلي و إلكترون خارجي له كمية حركة زاوية تساوي الصفر و العدد الكمي المداري له يساوي الصفر و هذا ما ينسجم مع هدف التجربة.



الشكل (1-5): مخطط تفصيلي لتجربة شترين-جيرلاخ



الشكل (5-2): مقطع أمامي للمغناطيس و تبيان قطبية ثنائي القطب المغناطيسي.

#### 4-1. الدراسة النظرية:

إن دخول حزمة من الذرات (ثنائيات أقطاب مغناطيسية ذرية) في مجال مغناطيسي غير منتظم (متغير مكانيا) سيجعلها تخضع إلى قوة متدرجة الشدة و علاقتها مع طاقة التفاعل تعطى بالعلاقة التالية:

$$\vec{F} = -\frac{d(\Delta E)}{d\vec{r}} = -\vec{\nabla}(\Delta E) = \vec{\nabla}(\vec{\mu} \cdot \vec{B}) \quad (5)$$

$$\vec{F} = F_x \vec{i} + F_y \vec{j} + F_z \vec{k} = \left[ \left( \frac{\partial}{\partial x} \mu_x B_x \right) \vec{i} + \left( \frac{\partial}{\partial y} \mu_y B_y \right) \vec{j} + \left( \frac{\partial}{\partial z} \mu_z B_z \right) \vec{k} \right]$$

و عليه فان:

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{\partial}{\partial x} \mu_x B_x = \mu_x \frac{\partial B_x}{\partial x} \\ F_y &= \frac{\partial}{\partial y} \mu_y B_y = \mu_y \frac{\partial B_y}{\partial y} \\ F_z &= \frac{\partial}{\partial z} \mu_z B_z = \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{aligned} \quad (6)$$

المجال المغناطيسي في التجربة و نظرا لشكله المنشوري يتوافق مع  $F_x = F_y = 0$  و بمعنى آخر المجال المغناطيسي متغير مكانيا فقط مع المحور Z و القوة الوحيدة المؤثرة على الذرات وفق المحور Z في العلاقة (6) هي:

$$F_z = \frac{\partial}{\partial z} \mu_z B_z = \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z}$$

و لكن

$$\mu_z = -\frac{e}{2m} L_z = -\mu_B m_l$$

إذن

$$F_z = -\mu_B m_l \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (7)$$

أين

$$m_l = -l, -l + 1, \dots, 0, \dots, +l$$

تشير العلاقة (7) نظريا إلى أن الأماكن المتوقعة لترسب ذرات الفضة (تجربة شتين-جبرلاخ) يكون تابعا للعدد الكمي المداري  $l$ . أي ان الدراسة النظرية تشير أنه في حال  $l = 0$  فإن  $m_l = 0$  و هذا يعني أن القوة  $F_z = 0$  و هذا يتوافق مع العلاقات نظريا بعدم وجود تضاعف في مستوي الطاقة المدروس و لكن ماذا عن نتيجة التجربة؟؟؟

### 5-1. النتائج:

النتيجة كانت غير متوقعة بالنسبة للعالمين حيث أن حزمة ذرات الفضة انشطرت أثناء مسيرها في المجال المغناطيسي و اتخذت مسارين على شكل حزمتين حزمة في الاتجاه الموجب للمحور Z وأخرى في الاتجاه السالب لنفس المحور و هذا ما لوحظ على لوح التصوير من وجود بقعتين بدلا من بقعة واحدة كما هو متوقع نظريا. أجريت تجارب على ذرات مختلفة لها نفس الصفات فكانت تنحرف إلى حزمتين و بالتالي النتيجة غير متوافقة مع النظري. و بالتالي يمكن ان نستخلص نتائج التجربة كما يلي:

1- مركبة عزم ثنائي القطب المغناطيسي لذرات الفضة يمكن ان تأخذ قيمتين متعاكستين أي

ان هناك انشطار لمستوي الطاقة المدروس بخلاف الدراسة النظرية.

2- من الصعب على كمية الحركة الزاوية المدارية أن تتنبأ بما حصل لأنها تساوي الصفر

نظريا أي:

$$l = 0 \Rightarrow L = \sqrt{l(l+1)}\hbar = 0 \quad (8)$$

3- و بالتالي باتت الحاجة إلى فيزياء جديدة أمر غاية في الأهمية لتفسير النتيجة الأولى.

## 1-6 ما الحل؟؟:

جرت محاولات عديدة لتفسير نتائج التجربة و أعيدت التجارب اكثر من مرة للخروج من هذا المأزق العلمي الذي يواجه الفيزيائيين و قد كانت إحدى المحاولات المساواة بين علاقة عدد الحالات المتوقعة و عدد الحالات التجريبية و البالغة حالتين و العلاقة التالية توضح ذلك:

$$2l + 1 = 2 \Rightarrow l = \frac{1}{2}$$

**النتيجة:** تبين ان العدد الكمي المداري يساوي نصف و هذا لا يتفق مع الدراسات السابقة التي تؤكد ان قيم العدد الكمي المداري تأخذ أعداد تامة و ليس أنصاف و هذا يفرض امرين:

- إما البحث عن النظرية فيزيائية جديدة لمقدار فيزيائي جديد محجوب عن رؤية الدراسات السابقة.
- أو إعادة صياغة كافة النظريات السابقة لتواكب الوضع الجديد.

## 2 - اثر الحقل المغناطيسي على الذرة:

### 1-2 مقدمة:

أن وضع الذرة في مجال مغناطيسي خارجي سوف يؤثر على مستويات الطاقة الذرية و يجعلها تنتشر إلى عدة مستويات و ذلك حسب شدة المجال المغناطيسي الخارجي و نوع الدراسة و أول من لاحظ تلك الانشطارات العالم الفيزيائي زيمان عام 1896 م وسميت باسمه. و في ميكانيك الكم فإن تغير التردد أو الطول الموجي سوف يؤدي إلى تغير مكان مستوي الطاقة بالنسبة للنواة و بالتالي إلى تغير في خطوط الطيف.

يصنف أثر زيمان عادة إلى عادي و شاذ و ذلك حسب شدة المجال المغناطيسي الخارجي بالنسبة للمجال المغناطيسي الداخلي المتعلق بالذرة المدروسة و لا ننسى أن المجالات المغناطيسية الداخلية للذرة ناتجة عن ثنائيات أقطاب مغناطيسية مدارية و ذاتية لإلكترون الذرة.

عموما عندما نضع ثنائي قطب مغناطيسي في مجال مغناطيسي سوف يمتلك طاقة كامنة (**potential energy**) تعتمد على توجه عزم ثنائي القطب المغناطيسي.

بالنسبة للمجال المغناطيسي تعطى طاقة التفاعل (الطاقة الكامنة) بالعلاقة التالية:

$$\Delta E = -\vec{\mu} \cdot \vec{\beta} = -\mu \cdot \beta \cdot \cos \theta ; \quad \mu = I \cdot A$$

عندها يكون  $\mu // \beta$

فإن

$$\Delta E = -\mu \cdot \beta \quad (9)$$

تشير العلاقة (9) أن طاقة التفاعل تأخذ أصغر قيمة عندما يكون اتجاه العزم المغناطيسي موازي للمجال المغناطيسي الخارجي ( $\theta = 0^\circ$ ) أي:

$$\Delta E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu \cdot B \cos \theta$$

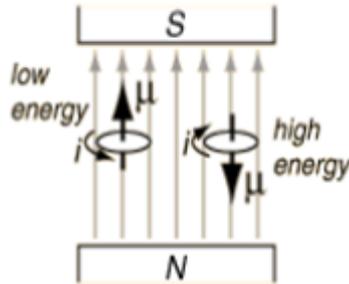
$$\Delta E = -\mu \cdot B \cos \theta = -\mu \cdot B \quad (10)$$

و تأخذ طاقة التفاعل أكبر قيمة عندما يكون اتجاه العزم المغناطيسي بعكس اتجاه للمجال المغناطيسي الخارجي ( $\theta = 180^\circ$ ) أي:

$$\Delta E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu \cdot B \cos \theta$$

$$\Delta E = -\mu \cdot B \cos 180 = \mu \cdot B \quad (11)$$

و الشكل (3-5) يبين ما تم شرحه أعلاه.



الشكل (3-5): طاقة التفاعل بين العزم المغناطيسي و المجال المغناطيسي الخارجي.

### 3- أثر زيمان العادي (Effet zeeman normal):

يتميز أثر زيمان العادي بوضع الذرة في مجال مغناطيسي خارجي أكبر بكثير من المجال المغناطيسي الداخلي للذرة إلى درجة أنه يمكن إهمال طاقة التفاعل الناجمة عن التفاعل سبين-مدار.

فعندما نضع ذرة الهيدروجين في مجال مغناطيسي خارجي قوي فإن العزم المغناطيسي للإلكترون الذرة سوف يتفاعل مع ذلك المجال مسببا تغيرا في الطاقة للسوية التي يتواجد بها الإلكترون. تعطي عبارة طاقة التفاعل من خلال العلاقة:

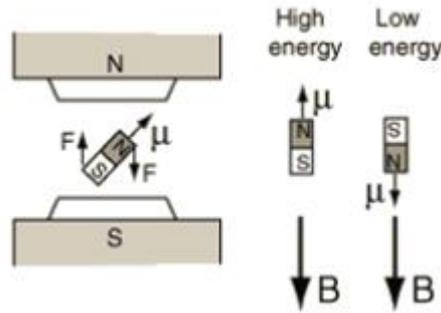
لدينا:

$$\Delta E = -\vec{\mu} \cdot \vec{\beta} \quad (12)$$

حيث  $\mu$ : العزم المغناطيسي الكلي للإلكترون والتي تعطي عبارته بالشكل:

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{2m} (\vec{L} + g\vec{S}) = -\frac{e}{2m} (\vec{L} + 2\vec{S}) \quad (13)$$

أنظر الشكل (4-5) لوضع ثنائي القطب المغناطيسي الذري في مجال مغناطيسي خارجي.



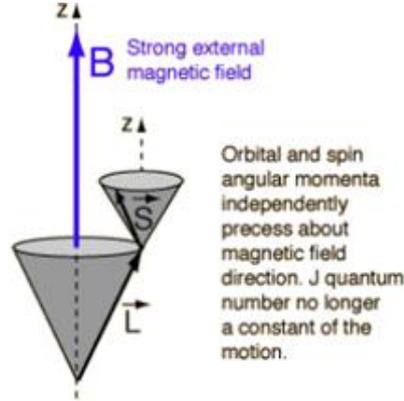
الشكل (4-5): ثنائي القطب المغناطيسي الذري في مجال مغناطيسي خارجي.

عندما نختار المحور (oz) الاتجاه المجال المغناطيسي الخارجي تصبح طاقة التفاعل بالشكل:

$$\begin{aligned} \Delta E &= -\mu_z \cdot B_z = - \left[ -\frac{e}{2m} (L_z + 2S_z) \right] B_z \\ \Delta E &= \frac{e}{2m} (L_z + 2S_z) B_z \\ \Delta E &= \frac{e}{2m} (m_l \hbar + 2m_s \hbar) B_z \\ \Delta E &= \frac{e\hbar}{2m} (m_l + 2m_s) B_z \\ \Delta E &= \mu_B (m_l + 2m_s) B_z \quad (14) \end{aligned}$$

تبين العلاقة (14) أن الإزاحة في الطاقة تعتمد على العدد الكمي المغناطيسي المداري  $m_l$  و العدد الكمي المغناطيسي السبيني  $m_s$  و بالتالي نحصل على عدد من المستويات الطاقوية المنفردة من

السوية الأم تكون فروق الطاقة بينها متساوية. تبين الدراسة أنه في حال المجال المغناطيسي الخارجي الشديد أن كمية الحركة الزاوية المدارية تترنح باستقلالية عن ترنح كمية الحركة الزاوية الذاتية كما يبين الشكل (5-5) و بالتالي فان المسقط لكميات الحركة يعبر عنها كمجموع جبيري. و في بعض الأحيان تنسب هذه الحالة إلى باشن-باك و تسمى باسمه (Paschen-Back Effec).



الشكل (5-5): سلوك كميات الحركة المستقل بوجود المجال المغناطيسي القوي

$$\Delta E = E_f - E_i$$

$$E_f = E_i + \Delta E$$

$$E_f = E_i + \mu_B(m_l + 2m_s)\beta_z \quad (*)$$

تعتبر العلاقة (\*) عن الطاقة النهائية لأحد المستويات الطاقوية المنشطرة عن السوية الأساسية بعد تطبيق المجال المغناطيسي.

تعتبر العلاقة (14) أيضا عن الفرق بين سوية الطاقة قبل تطبيق المجال و نستطيع أن نكتب عبارة كل سوية طاقة جديدة بالشكل التالي:

$$\Delta E = E_f - E_i \Rightarrow E_f = E_i + \Delta E$$

$$E_f = E_i + \mu_B(m_l + 2m_s)B_z \quad (15)$$

تعتبر العلاقة (15) عن الطاقة النهائية لأحد المستويات الطاقوية المنشطرة عن المستوي الأساسي بعد تطبيق المجال كتابع للأعداد الكمية المغناطيسية المدارية و السبينية.

### مثال توضيحي:

ما هو عدد الحالات التي تنتشر إليها الحالة **3d** لذرة الهيدروجين بوجود مجال مغناطيسي خارجي شديد.

الإجابة:

$$3d \rightarrow l = 2 ; m_l = 0, \bar{1}, \bar{2} ; m_s = \bar{\frac{1}{2}}$$

$$2m_s = \bar{1}$$

$$m_l + 2m_s = 0, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}$$

$$\Delta E = \mu_B B_z [3 \ 2 \ 1 \ 0 \ -1 \ -2 \ -3]$$

أي أن الحالة 3d تنتظر إلى 7 مستويات الطاقة بين المستويات الثابتة.

• ملاحظة:

في الدراسات الأولية لأثر زيمان العادي و في حال ذرات تمتلك أكثر من إلكترون فإنه من الممكن أن السبين الكلي يساوي الصفر (الحالة المفردة  $2s+1=1$ ) و في هذه الحالة تعود طاقة التفاعل إلى الحركة المدارية فقط و تصبح العلاقة (5) بالشكل التالي:

$$\Delta E = \mu_B m_l B_z = m_l \hbar \omega_L \quad (16)$$

و في حال  $l = 2$  نحصل على خمسة مستويات طاقة منشطرة  $2l + 1$  عن المستوي الأصلي و هذا الذي يحصل في التجارب المعملية للسهولة.

4- أثر زيمان الشاذ ( effet zeeman anormal ):

يتميز هذا الفعل بوضع الذرة في مجال مغناطيسي خارجي أضعف بكثير من المجال المغناطيسي الداخلي للذرة، وفي هذه الحالة لا يمكن إهمال التفاعل سبين-مدار كما أهملناه في الفقرة السابقة و تكون الانشطارات هنا معقدة نوعا ما لأن التفاعل سبين - مدار يشطر سلفا و قبل تطبيق المجال الخارجي كل مستوي طاقي عدده الكمي المداري لا يساوي الصفر إلى سويتي طاقة و بمعنى آخر فإن المجال المغناطيسي الخارجي يرى سويتي طاقة يتفاعل معهما كل على حده و لذلك سميت هذه الحالة أثر زيمان الشاذ.

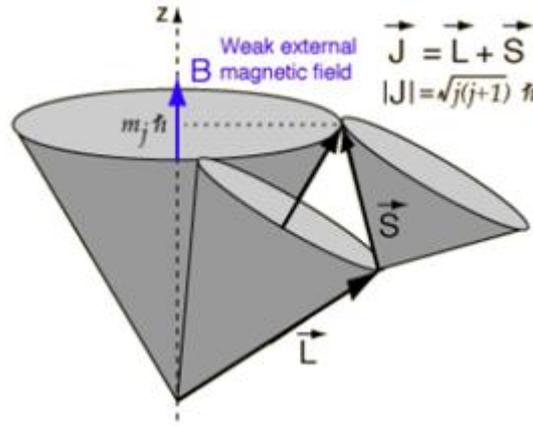
تعطى عبارة طاقة التفاعل هنا كمجموع حدين الأول ناجم عن التفاعل سبين-مدار و الثاني ناجم عن وجود المجال الخارجي و يمكن أن نكتب العلاقة كما يلي:

$$\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2$$

$$\Delta E = f(R)\vec{L} \cdot \vec{S} + (-\vec{\mu}_j \cdot \vec{B})$$

$$\Delta E = f(R)\vec{L} \cdot \vec{S} + \frac{e}{2m}(\vec{L} + g\vec{S})\vec{B} \quad (17)$$

الحد الأول في العلاقة (17) تمت معالجته سابقا تفصيلا أما الحد الثاني فإن كميات الحركة الزاوية لا تتصرف باستقلالية هنا كون المجال الخارجي ضعيف بل تتفاعل مع بعضها البعض أولا و من ثم تتفاعل مع المجال المغناطيسي الخارجي الضعيف كمحصلة. انظر الشكل (5-6).



الشكل (5-6): تمثيل كميات الحركة في حال اثر زيمان الشاد

يلاحظ من الشكل (5-6) و العلاقة (17) أنه يجب أن نعالج الحد الثاني في العلاقة (17) من خلال كمية الحركة الزاوية الكلية و هذه تحتاج إلى المعالجة الرياضية التالية للحد الثاني و ذلك بضرب البسط و المقام بمرعب كمية الحركة الزاوية الكلية كما يلي:

$$\Delta E_2 = \frac{e}{2m} (\vec{L} + 2\vec{S})\vec{B}$$

$$\Delta E_2 = \frac{e}{2m} (\vec{L} + 2\vec{S}) \frac{\vec{J}\vec{B}}{J^2} = \frac{e}{2m} \frac{(\vec{L} + 2\vec{S}) \cdot \vec{J}}{J^2} \vec{J} \cdot \vec{B}$$

$$\Delta E_2 = \frac{e}{2m} \frac{(\vec{L} + 2\vec{S}) \cdot (\vec{L} + \vec{S})}{J^2} J_z \cdot B_z$$

$$\Delta E_2 = \frac{e}{2m} \frac{(\vec{L} + 2\vec{S}) \cdot (\vec{L} + \vec{S})}{J^2} m_j \hbar \cdot B_z \quad (18)$$

تتم معالجة الأقواس في العلاقة (18) من خلال المعالجة الرياضية التالية:

$$\begin{aligned} \frac{(\vec{L} + 2\vec{S}) \cdot (\vec{L} + \vec{S})}{J^2} &= \frac{L^2 + 2S^2 + 3\vec{L}\vec{S}}{J^2} \\ J^2 &= (\vec{L} + \vec{S})^2 = L^2 + S^2 + 2\vec{L}\vec{S} \\ 3\vec{L}\vec{S} &= \frac{3}{2}(J^2 - L^2 - S^2) \\ \frac{L^2 + 2S^2 + 3\vec{L}\vec{S}}{J^2} &= \frac{L^2 + 2S^2 + \frac{3}{2}(J^2 - L^2 - S^2)}{2J^2} = \frac{3J^2 - L^2 + S^2}{2J^2} = g_L \\ g_L &= \frac{3J^2 - L^2 + S^2}{2J^2} = 1 + \frac{J^2 - L^2 + S^2}{J^2} = 1 + \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)} \end{aligned} \quad (19)$$

أين  $g_L$  يمثل معامل لاندي

في العلاقة (19) يسمى المقدار  $g_L$  معامل لاندي و ذلك بوضع قيم  $j$  التي تأخذ قيمتين حسب قيم  $s$  وفق المعالجة الرياضية التالية:

$$\begin{aligned} \Delta E_2 &= \frac{e}{2m} \frac{(\vec{L} + 2\vec{S})(\vec{L} + \vec{S})}{J^2} \cdot m_j \lambda B_z \\ \Delta E_2 &= m_j g_L \frac{e\hbar}{2m} B_z = m_j g_L \mu_B B_z \end{aligned} \quad (*)$$

حيث:

$$\begin{aligned} \mu_B &: \text{مغنون بور ويساوي إلى } \frac{e\hbar}{2m} \\ g_L &: \text{معامل لاندي ويساوي إلى: } 1 + \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)} \end{aligned}$$

والعلاقة (\*) هي طاقة التفاعل في حال المجال المغناطيسي الخارجي ضعيف أمام المجال الداخلي للذرة.

يمكن تبسيط عبارة معامل لاندي  $g_L$  وذلك بأخذ قيم  $j$ :

$$j = l + s = l + \frac{1}{2}$$

$$\begin{cases} j = l + \frac{1}{2} \rightarrow g_L = \frac{2l + 2}{2l + 1} \\ j = l - \frac{1}{2} \rightarrow g_L = \frac{2l}{2l + 1} \end{cases}$$

وعليه تصبح علاقة طاقة التفاعل الكلية بالشكل:

$$\Delta E = f(R) \frac{\hbar^2}{2} [j(j+1) - l(l+1) - s(s+1)] + m_j g_L \mu_B B_z$$

$$E_n = E'_n + \mu_B g_L m_j B \quad (20)$$

$E'_n$  : طاقة المستوى عند عدم وجود الحقل الخارجي.

العلاقة (20) تعطي طاقة التفاعل الكلية حيث طاقة تفاعل سبين-مدار تنشط كل مستوي طاقي فيه العدد الكمي المداري لا يساوي الصفر إلى مستويين و بعد ذلك كل مستوي من المستويين في المجال المغناطيسي الخارجي الضعيف تنشط إلى عدد من المستويات يتوافق مع العدد الكمي المغناطيسي الكلي  $m_j = -j, \dots, +j$

**مثال:**

أوجد عدد مستويات الطاقة للإلكترون ذرة و هو في الحالة  $2p$  في حال كون الذرة في مجال مغناطيسي ضعيف.

1- قبل تطبيق المجال المغناطيسي تنشط الحالة  $2p(l=1)$  إلى حالتين وفقا للتفاعل سبين-

مدار إحداها تتوافق مع  $j=1+1/2=3/2$  و الثانية تتوافق مع  $j=1-1/2=1/2$ .

2- بعد تطبيق المجال لدينا حالتين:

عندما  $j=3/2$  نجد:

$$j = 1 + \frac{1}{2} = \frac{3}{2}$$

$$g_L = \frac{2l+2}{2l+1} = \frac{4}{3}$$

$$m_j = -j, \dots, j = -\frac{3}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{3}{2}$$

$$\Delta E = g_L \mu_B B_z m_j = \frac{4}{3} \mu_B B_z \begin{pmatrix} \frac{3}{2} \\ \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \\ -\frac{3}{2} \end{pmatrix}$$

ينتج لدينا أربع سويات طاقة في هذه الحالة. المسافة بين كل مستويين متعاقبين تساوي إلى:

$$\Delta E' = g_L \mu_B B_z; (\Delta m_j = 1)$$

$$\Delta E' = \frac{4}{3} \mu_B B_z$$

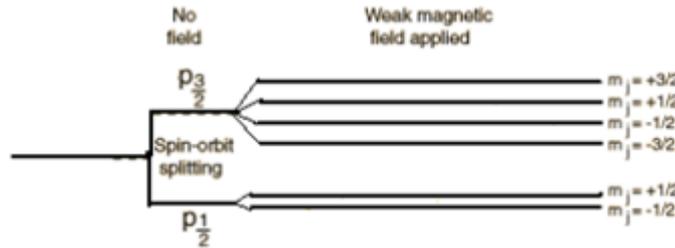
عندما  $j=1/2$  نجد:

$$j = l - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

$$g_L = \frac{2l}{2l+1} = \frac{2}{3}$$

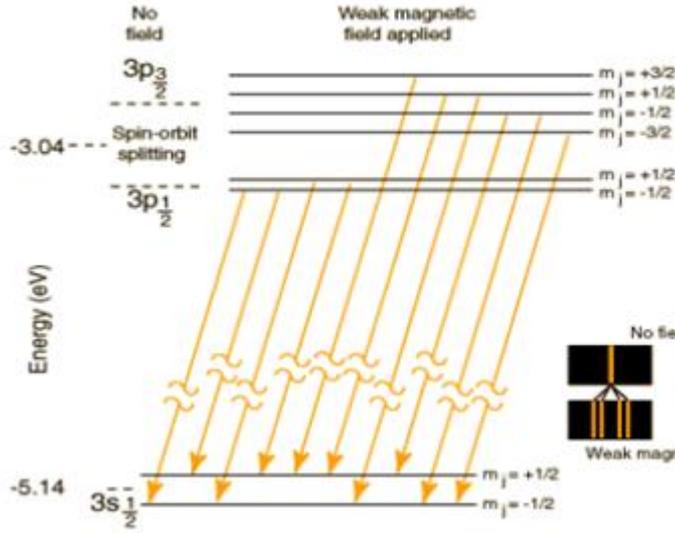
$$m_j = g_L \mu_B B_z m_j = \frac{2}{3} \mu_B B_z \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

ينتج لدينا سويتان طاقيتان المسافة بينهما  $\frac{2}{3} \mu_B B_z$  أي نصف المسافة بالنسبة للحالة السابقة و يكون مجموع الحالات الكلية الناتجة عن انشطار الحالة  $2p$  يساوي إلى ست حالات طاقة منشطرة انظر الشكل (7-5).



الشكل (7-5): شكل تخطيطي لانشطار السوية الأساسية إلى عدة سويات بوجود مجال مغناطيسي خارجي ضعيف

و الشكل (8-5) يبين أثر زيمان الشاذ على ذرة الصوديوم و الطيف الناجم عن تلك التجربة.



الشكل (5-8): طيف ذرة الصوديوم في حال وجودها في مجال مغناطيسي ضعيف

### 5- أثر باشن باك (effet Paschen-Back):

عند إهمالنا سابقا للحد السبيني المداري الذي يكون في حقل شديد ويكون أقل بكثير من الحد المغناطيسي, وجدنا أن هذا الحد يدخل تصحيح آخر ويسمى هذا الفعل بفعل باشن-باك. أو التحول المغناطيسي الضوئي. ويعطى هاملتوني الجملة في حال وجود فعل باشن-باك بالشكل:

$$H = H_0 + \mu_B(L_z + 2S_z)B \quad (21)$$

حيث:

بإجراء نفس التحليل السابق نجد :

$$E_{pB} = E^{(0)}_{pB} + E^{(1)}_{ps}$$

$$E_{pB} = E_n + \mu_B(m_l + 2m_s)B$$

قواعد الانتقاء تصبح بالشكل:  $\Delta m_s = 0$  ;  $\Delta m_l = 0, \pm 1$  ;  $\Delta l = \pm 1$

حيث:  $E_n$ : هي الطاقة في غياب المجال المغناطيسي  $B$ .

الموسم الجامعي 2020/2021  
السنة الثالثة -فيزياء ذرية و جزيئية

كلية العلوم الدقيقة  
قسم الفيزياء

### السلسلة -5-

#### التمرين الأول:

ليكن إلكترون يدور حول نواة. المستوى الذي يشمل مسار الإلكترون يميل بزاوية غير معينة عن المحور  $Z$ .

نطبق حقل مغناطيسي  $\vec{B}$  منطبق على  $Z$ .

• مفعول زمان العادي لا يأخذ بعين الاعتبار سبين الإلكترون، أكتب عبارة طاقة تفاعل الإلكترون مع الحقل المغناطيسي الخارجي.

1. أعطي العبارة العامة لـ  $\Delta E_I$  بدلالة  $m_I$

. نضع:  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$  : **magnéton de Bohr**

2. أحسب التصحيحات الطاقوية من أجل الحالات التالية:

. المستوى الأول لذرة الهيدروجين.

. المستوى الثاني لذرة الهيدروجين.

. أعطي تمثيل بياني لمستويات الطاقة في وجود أو عدم وجود الحقل  $\vec{B}$ . أعطي بدقة إنحلالية كل مستوى.

#### التمرين الثاني:

ليكن إلكترون يدور حول النواة. المستوي الذي يشمل مسار الإلكترون يميل بزاوية غير معينة عن المحور  $Z$ . نطبق حقل مغناطيسي  $\vec{B}$  منطبق على  $Z$ .

3- مفعول باشن باك يأخذ بعين الاعتبار سبين إلكترون، أكتب طاقة تفاعل الإلكترون مع

الحقل الخارجي  $\vec{B}$ .

• عبر عن النتيجة بدلالة  $\vec{S}$ ،  $\vec{L}$ ،  $\vec{B}$ .

4- نفترض أن تأثير الحقل الخارجي قوي مما يجعل تواتر لارمور كبير أمام التواتر الداخلي. في هذه الحالة نستبدل العزوم الزاوية  $\vec{L}$  و  $\vec{S}$  بمساقطها على  $\vec{B}$  عند حساب

$$\Delta E_I$$

• استنتج العبارة الجديدة  $H_I$  بدلالة  $L_z$  و  $S_z$ . نأخذ  $g_s=2$

3- أعطي العبارة العامة  $\Delta E_I$  بدلالة  $m_l$  و  $m_s$ . نضع:  $\hat{I}_a = \frac{e\hbar}{2m}$  : مغنطون بور

4- أحسب التصحيحات الطاقوية في الحالات التالية :

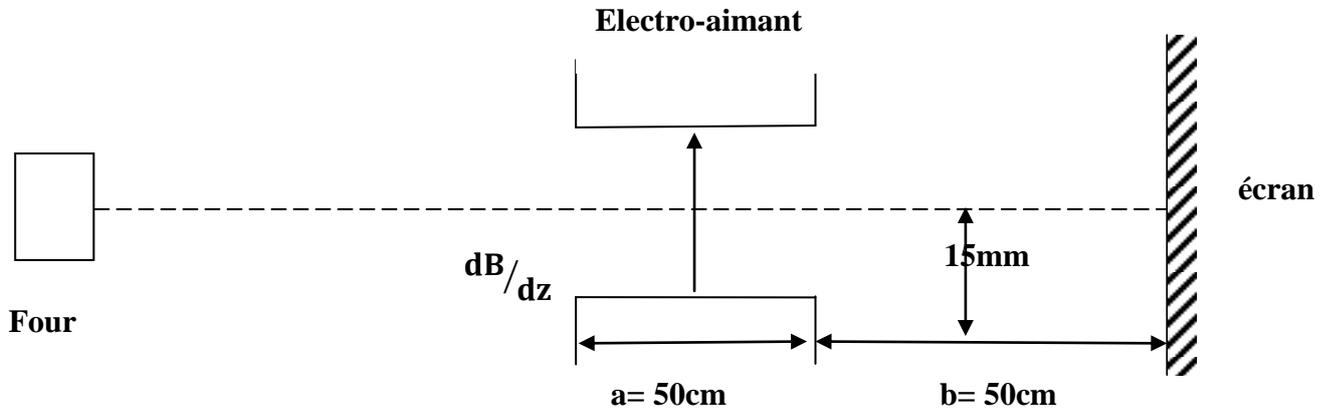
\* - المستوى الأول لذرة الهيدروجين .

\* - المستوى الثاني لذرة الهيدروجين .

\* - أعطي تمثيل بياني لمستويات الطاقة في وجود أو عدم وجود الحقل  $\vec{B}$ . أعطي بدقة إنحلالية كل مستوى.

### التمرين الثالث

الشكل المبين أدناه يمثل جهاز يستعمل في تجارب شبيهة بتلك المجراة من قبل شترين وجيرلاخ.



نقوم بالتجربة التالية :

نعتبر ذرات السليسيوم التي تحمل التشكيل الإلكتروني  $3P^2$  (...)

1. ماهي القيم الممكنة للأعداد الكمية  $l$  و  $s$  ؟

. بتطبيق مبدأ باولي لتشكيل يحوي إلكترونين متكافئين (أين المجموع  $l + s$  يجب أن يكون

زوجي). ماهي المستويات الناتجة عن التشكيل الأساسي؟.

. ما هو المستوى الأساسي من بين هذه المستويات؟.

2 . بالأخذ بعين الاعتبار تفاعل سبين - مدار للمستوى الأساسي. ماهي مستويات الطاقة الناتجة عن التفاعل؟.

. مع العلم أن الفارق الطاقوي بين المستويات الحديدية السابقة (مستويات البنية الدقيقة للمستوى الأساسي) تساوي إلى  $225 \text{ cm}^{-1}$ . أحسب ثابت البنية الدقيقة A.

3- ذرات السليسيوم الناتجة من الفرن لديها سرعة متوسطة  $v = 1200 \text{ m/s}$ . ما هو عدد البقع المشاهدة على الشاشة ؟ حدد الأعداد الكمية  $j, m_j$  لكل بقعة. أحسب المسافة الفاصلة بين البقع الحديدية.

4 . نضاعف قيمة تدرج الحقل المغناطيسي  $\frac{dB}{dz}$ . ما هو عدد البقع المشاهدة على الشاشة. حدد الأعداد الكمية  $j, m_j$  لكل بقعة. أحسب المسافة الفاصلة بين البقع الحديدية.