تأثير الحقول الكهربائية والمغناطيسية على الطيف الذري لذرتي الهيدروجين والليثيوم

قسم الفيزياء – كلية العلوم – جامعة حمص

إشراف: أ.د.حسن المقدم

تقديم الطالب: عمر سلهب

الملخص:

يهدف البحث إلى دراسة تجاوبات الطيف الذري للهيدروجين والليثيوم بتطبيق حقول كهربائية ومغناطيسية متعامدة، حيث تم تحليل تأثيرات الحقول على مستويات الطاقة الإلكترونية للذرات، مع التركيز على الانقسامات والانزياحات الطيفية الناتجة عن تأثير ستارك وزيمان.

تم الاعتماد على النظرية الكمية لفهم كيفية تفاعل الحقول مع العزم المغناطيسي للإلكترونات وإجراء مقارنة بين ذرتي الهيدروجين والليثيوم من حيث الانزياحات الطاقية والخطوط الطيفية والتصحيحات من الدرجة الأولى والثانية المرافقة

الكلمات المفتاحية: الطيف الذري، تأثير ستارك، تأثير زيمان، الانزياحات الطيفية، مستويات الطاقة الإلكترونية، التأثيرات الكمومية

Effect of electric and magnetic fields at atomic spectra for Hydrogen and lithium atoms

Abstract:

This research aims to study the atomic spectral resonance of hydrogen and lithium under the influence of perpendicular electric and magnetic fields.

The effects of the fields on the atomic electronic energy levels were analyzed, focusing on the spectral splitting and shifts resulting from the Stark and Zeeman effects.

Quantum theory was used to understand how the fields interact with the magnetic moment of electrons, and a comparison was made between hydrogen and lithium atoms in terms of energy shifts, spectral lines, and associated first- and second-order corrections.

Keywords: Atomic spectrum, Stark effect, Zeeman effect, spectral shifts, electronic energy levels, quantum effects.

1. مقدمة :

يُعتبر دراسة الطيف الذري من الأدوات الأساسية في فهم التركيب الإلكتروني للذرات والتفاعلات التي تحدث عند تعرضها لحقول خارجية حيث تُظهر الذرات، (مثل الهيدروجين والليثيوم) سلوكًا طيفيًا مميزًا عند تعريضها لحقول كهربائية ومغناطيسية، مما يوفر رؤى عميقة حول تأثيرات هذه الحقول على مستويات الطاقة الإلكترونية تُعرف هذه الظواهر بتأثير ستارك في حالة الحقل الكهربائي، وزيمان في حالة الحقل المغناطيسي.

عند تطبيق حقل كهربائي ومغناطيسي متعامدين على ذرة مثل الهيدروجين أو الليثيوم، تتفاعل الحقول مع العزم المغناطيسي للإلكترونات وتؤدي إلى انزياحات وانقسامات في مستويات الطاقة، هذه التفاعلات تُظهر تغيرات واضحة في الخطوط الطيفية، والتي يمكن قياسها وتحليلها لفهم الخصائص الكمية للذرة.

في هذه الدراسة، تمَّ استعرض تجاوبات الطيف الذري للهيدروجين والليثيوم في وجود حقلين كهربائي ومغناطيسي متعامدين، تمَّ التركيز على كيفية تأثير هذه الحقول على مستويات الطاقة الإلكترونية، وكيفية تفسير الانزياحات الطيفية الناتجة باستخدام النظريات الكمية، وتمت المقارنة بين سلوك ذرة الهيدروجين التي تُعتبر أبسط الذرات وذرة الليثيوم التي تحتوي على إلكترونات أكثر وتعقيدات إضافية بسبب تأثيرات الحجب والتأثير بين الإلكترونات.

من خلال هذه الدراسة نهدف إلى فهم أعمق لتأثيرات الحقول الخارجية على الطيف الذري، وتقديم رؤى جديدة حول الخصائص الكمية للذرات في ظل ظروف مختلفة، هذا الفهم ليس فقط ذا أهمية أكاديمية، بل له تطبيقات عملية في مجالات مثل الفيزياء الذرية والليزر والتحليل الطيفي.

2. هدف البحث:

- دراسة تجاوبات الطيف الذري للهيدروجين والليثيوم في وجود حقلين كهربائي ومغناطيسي متعامدين، حيث يتم تحليل تأثيرات الحقول الخارجية على مستويات الطاقة الإلكترونية للذرات، مع التركيز على الانزياحات الطيفية الناتجة عن تأثير ستارك وتأثير زيمان
- الاعتماد على النظرية الكمية لفهم كيفية تفاعل الحقول مع العزم المغناطيسي للإلكترونات، وكيف تؤدي هذه التفاعلات لحدوث انقسامات وانزياحات في الخطوط الطيفية
- مقارنة سلوك ذرة الهيدروجين مع ذرة الليثيوم
- تعميق فهم تأثيرات الحقول الخارجية على الطيف الذري، وفتح آفاق جديدة للتطبيقات العملية في مجالات مختلفة.

3. مواد وطرائق البحث:

تم استخدام جهاز حاسوب مجهز ببرمجيات متخصصة (MATLAB) لإجراء الحسابات الرياضية، تحليل البيانات، ورسم الخطوط البيانية، كما تم الاعتماد على أدوات نظرية ومراجع علمية لتطوير النماذج الرياضية وتحليل النتائج.

4. ذرتي الهيدروجين والليثيوم في الحقول المتعامدة

I. ذرة الهيدروجين في حقول متعامدة:

1.4 الهاملتوني لذرة الهيدروجين في الحقول الكهربائية والمغناطيسية:

يعطى الهاملتوني لذرة الهيدروجين تأثير حقول كهربائية ومغناطيسية متعامدة بالعلاقة

$$H = H_0 + H_E + H_B \quad (1)$$

H_0 الهاملتوني التقليدي لذرة الهيدروجين بدون حقول خارجية.

H_E التأثير الناجم عن الحقل الكهربائي.

H_B التأثير الناجم عن الحقل المغناطيسي.

هاملتوني ذرة الهيدروجين في غياب الحقول الخارجيةH_0 [1]

$$H_0 = -\frac{\hbar^2}{2m_e}\nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (2)$$

2.4 تأثير ستارك في الهيدروجين (تأثير الحقل الكهربائيH_E) :

عندما يتم تطبيق حقل كهربائي خارجي فإنه يؤثر على الإلكترون داخل الذرة لنفترض أن الحقل الكهربائي يطبق على طول المحورz ، وقيمته E_z يضاف التأثير الناجم عن الحقل الكهربائي إلى الهاملتوني كطاقة تفاعل بين العزم الكهربائي للإلكترون والحقل الكهربائي:

$$H_E = -eE_z \cdot z \quad (3)$$

E_z شدة الحقل الكهربائي المطبق على طول المحور .

هذا التأثير يغير طاقة الإلكترونات بناءً على مواقعها في الحقل الكهربائي[2] .

3.4 تأثير زيمان في الهيدروجين (تأثير الحقل المغناطيسيH_B) :

بتطبيق الحقل المغناطيسي على الذرة وفق المحور x يتأثر الإلكترون بقوة لورنتز مما يضيف حد إضافي للهاملتوني ،ويمكن التعبير عنه من خلال التفاعل بين العزم الزاوي للإلكترون والحقل المغناطيسي:

$$H_B = \frac{e}{2m_e} B_x \cdot (r \times p) = -\mu . B_x \quad (4)$$

p كمية حركة الإلكترون.

μ العزم المغناطيسي المداري الناتج عن حركة الإلكترون في المدار.

هذا التفاعل يسبب تغيرات في مستويات الطاقة الذرية لذرة الهيدروجين بسبب التأثيرات المغناطيسية[3] .

وبالتالي يصبح الشكل النهائي للهاملتوني بعد إضافة التأثيرات الكهربائية والمغناطيسية

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m_e}\nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} - eE_z \cdot z + \frac{e}{2m_e} B_x \cdot (r \times p) \quad (5)$$

- **تأثير زيمان الشاذ والانقسامات الطاقية**

عندما يتم أخذ العزم المغزلي للإلكترون S في الاعتبار، فإن الانقسام في مستويات الطاقة يعتمد على كل من العزم الزاوي المداري L والعزم المغزليS ، ويُعرف باسم تأثير زيمان الشاذ .ويعطى تصحيح الطاقة لتأثير زيمان الشاذ يُعطى بالعلاقة:

$$E_Z = g_J m_J \mu_B B_x \quad (6)$$

حيث:

g_Jعامل لاندو، الذي يعتمد على كل من العزم المداري والمغزلي.

m_Jالإسقاط المغناطيسي للعزم الزاوي الكلي J على اتجاه الحقل المغناطيسي.

ومن أجل حقول مغناطيسية أكبر من 20 تسلا يحدث فك ارتباط بين العزم الزاوي المداري و السبيني وهو ما يدعى بمفعول باشن– باخ

- **الانتقالات المسموحة (قواعد الاصطفاء):**

بالنسبة للانتقالات الناتجة عن تأثير زيمان، فأنها تخضع لقواعد الاصطفاء وهي:

- $\Delta m_J = 0$ الانتقال الطيفي يسمى" خط π "
- $\Delta m_J = \pm 1$ الانتقال الطيفي يسمى" خطوط σ "

حيث أنَّ تأثير زيمان يؤدي إلى انقسام مستويات الطاقة الكمية عند تطبيق حقل مغناطيسي خارجي، وهذا ما يؤدي إلى تغييرات في طاقة الذرة والتي تؤدي إلى انبعاث أو امتصاص فوتونات ذات أطوال موجية محددة، الانقسامات تعتمد على قيم العزم الزاوي الكلي والمغناطيسي، وشدة الحقل المغناطيسي

II.ذرة الليثيوم في الحقول المتعامدة:

4.4 هاملتوني ذرة الليثيوم في الحقول الكهربائية والمغناطيسية

الهاملتوني لذرة الليثيوم في وجود حقول كهربائية ومغناطيسية متعامدة

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_E + \hat{H}_B \quad (7)$$

يعطى الهاملتوني الخاص لذرة الليثيوم يُعطى بالعلاقة:

$$\hat{H}_0 = \sum_{i=1}^{3}\left(-\frac{\hbar^2}{2m_e}\nabla_i^2 - \frac{Z_{eff}e^2}{4\pi\epsilon_0 r_i}\right) + \sum_{i<j}\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} \quad (8)$$

∇_i^2 هو لابلاسيان يمثل حركة الإلكترون i .

r_i هو المسافة بين الإلكترون i والنواة.

r_{ij} هو المسافة بين الإلكترونين i و j .

Z_{eff} العدد الذري لليثيوم($Z_{eff} = 1.3$) [4] .

5.4 تأثير ستارك في الليثيوم (تأثير الحقل الكهربائي)($\widehat{H}_E$) :

عندما يتم تطبيق حقل كهربائي خارجي، فإنه يؤثر على الإلكترونات داخل الذرة، لنفترض أن الحقل الكهربائي يطبق على طول المحورz ، وقيمته E_z التأثير الناجم عن الحقل الكهربائي يضاف إلى الهاملتوني كطاقة تفاعل بين العزم الكهربائي للإلكترون والحقل الكهربائي:

$$\widehat{H}_E = -\sum_{i=1}^{3} e\,\mathbf{E_z}\cdot\mathbf{r}_i \quad (9)$$

يؤدي هذا إلى تغير طاقة الإلكترونات بناءً على مواضعها في الحقل الكهربائي[2] .

6.4 تأثير زيمان في الليثيوم (تأثير الحقل المغناطيسي) ($\widehat{H}_B$) :

بتطبيق الحقل المغناطيسي على الذرة وفق المحور x يتأثر الإلكترون بقوة لورنتز مما يضيف حد إضافي للهاملتوني ،ويمكن التعبير عنه من خلال التفاعل بين العزم الزاوي للإلكترون والحقل المغناطيسي:

$$\widehat{H}_B = \sum_{i=1}^{3} \frac{e}{2m_e}\mathbf{B_x}(\mathbf{r}_i \times \mathbf{p}_i) \quad (10)$$

$\mathbf{r}_i \times \mathbf{p}_i$ عزم الاندفاع الزاوي للإلكترون i بسبب حركته في المدار.
هذا التفاعل يسبب تغيرات في مستويات الطاقة الذرية لذرة الليثيوم[3] .

الشكل النهائي للهاملتوني:

$$\widehat{H} = \sum_{i=1}^{3}\left(-\frac{\hbar^2}{2m_e}\nabla_i^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_i}\right) + \sum_{i<j}\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} - \sum_{i=1}^{3} e\,\mathbf{E_z}\cdot\mathbf{r}_i + \sum_{i=1}^{3}\frac{e}{2m_e}B_x(r_i \times p_i) \quad (11)$$

تؤدي الحقول الكهربائية والمغناطيسية المتعامدة إلى تغيرات في مستويات الطاقة الذرية لذرة الليثيوم، مما يؤدي إلى انقسامات طيفية معقدة، هذه التأثيرات تُستخدم في دراسة الخصائص الكمومية للذرات وتطبيقاتها في مجالات مثل البصريات الكمومية والتحكم الكمومي[5] .

6.4 نظرية الاضطراب:

من أجل الأنظمة الذرية مثل ذرتي الهيدروجين والليثيوم تحت تأثير الحقول الخارجية، لا يمكن دائمًا الحصول على حلول دقيقة لمعادلة شرودنغر لذا نستخدم نظرية الاضطراب لحساب تصحيحات لمستويات الطاقة بسبب تأثير الحقول الكهربائية والمغناطيسية المتعامدة.

تُستخدم نظرية الاضطراب عند وجود هاملتوني للمنظومة يمكن التعبير عنه كهاميلتوني غير مضطرب $(\widehat{H}_0)$ مع تصحيحات صغيرة للاضطراب الأول والثاني ناتجة عن الحقول الخارجية $(\widehat{H}_{pert})$ [6]على النحو التالي:

$$\widehat{H} = \widehat{H}_0 + \lambda \widehat{H}_{pert} \quad (12)$$

λ هو معامل صغير يمثل قوة الاضطراب.

$\widehat{H}_{pert}$ يمثل تأثير الحقول الخارجية، مثل الحقل المغناطيسي من تأثير زيمان والحقل الكهربائي من تأثير ستارك

- **نظرية الاضطراب وتأثير زيمان**

تعطى المعادلة العامة للطاقة المضطربة حيث أن الهاملتوني الكلي يتكون من الهاملتوني غير المضطرب $(\widehat{H}_0)$ والاضطراب الناتج عن الحقل المغناطيسي$(\widehat{H}')$:

$$\widehat{H} = \widehat{H}_0 + \widehat{H}' \quad (13)$$

حيث

$$\widehat{H}' = -\mu \cdot B \quad (14)$$

الحدود الأولى للطاقة$(E^{(1)})$:

يُحسب الحد الأول للطاقة عبر أخذ متوسط قيمة $\widehat{H}'$ في الحالة الذاتية غير المضطربة:

$$E^{(1)} = \langle \psi_n^{(0)} \mid \hat{H}' \mid \psi_n^{(0)} \rangle \quad (15)$$

وبافتراض أن الحقل المغناطيسي موجه على طول المحور z $(\mathbf{B} = B_x\hat{x})$ ، وبالتالي يصبح الاضطراب:

$$\hat{H}' = g\mu_B \frac{B_x J_x}{\hbar} \quad (16)$$

الحالة الذاتية غير المضطربة $\psi_n^{(0)}$ تكون أيضًا ذاتية لـ J_z مع القيمة الذاتية:

$$J_x \mid \psi_n^{(0)}\rangle = m_j\hbar \mid \psi_n^{(0)}\rangle \quad (17)$$

لذا:

$$E^{(1)} = g\mu_B B_x m_j \quad (18)$$

الحدود الثانية للطاقة$(E^{(2)})$:

يُحسب الحد الثاني للطاقة كالتالي:

$$E^{(2)} = \sum_{m\neq n} \frac{|\langle \psi_m^{(0)} \mid \hat{H}' \mid \psi_n^{(0)}\rangle|^2}{E_n^{(0)} - E_m^{(0)}} \quad (19)$$

لأن $\hat{H}'$ في تأثير زيمان يعتمد خطيًا على**B**،وبالتالي لا يسبب انتقالًا بين الحالات المختلفة غير المضطربة $(m \neq n)$ في الأنظمة ذات التقارن البسيط. لذلك، غالبًا $E^{(2)} = 0$ ، باستثناء حالات خاصة تعتمد على تعقيد البنية الطيفية

حيث تكون عناصر مصفوفة الاضطراب

$$\langle n, l, m_l, m_s | H_{\text{Zeeman}} | n, l, m_l, m_s \rangle$$

- **نظرية الاضطراب و تأثير ستارك:**

الهاملتوني الكلي يتكون من:

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}' \quad (20)$$

الحدود الأولى للطاقة($\mathbf{E^{(1)}}$) :

الحد الأول يُحسب عبر أخذ متوسط $\widehat{H}'$ في الحالة الذاتية غير المضطربة:

$$E^{(1)} = \langle \psi_n^{(0)} \mid -p \cdot E \mid \psi_n^{(0)} \rangle \qquad (21)$$

إذا كانت الحالة متناظرة مركزيًا (مثل حالات s في الذرة الهيدروجينية) :

التوزيع الشحني متجانس حول النواة.

العزم ثنائي القطب المتوسط يساوي صفرًا:

$$E^{(1)} = 0$$

إذا كانت الحالة غير متناظرة(مثل حالات p أو حالات جزيئية):

يمكن أن يكون:

$$E^{(1)} \neq 0$$

الحدود الثانية للطاقة($\mathbf{E^{(2)}}$) :

التصحيح الثاني للطاقة يعتمد على التداخل بين الحالة $\psi_n^{(0)}$ والحالات الأخرى $\psi_m^{(0)}$:

$$E^{(2)} = \sum_{m \neq n} \frac{| \langle \psi_m^{(0)} \mid -p \cdot E \mid \psi_n^{(0)} \rangle |^2}{E_n^{(0)} - E_m^{(0)}} \qquad (22)$$

حيث يمكن القول بأن:

تأثير ستارك يعتمد على التفاعلات بين الحالات المختلفة.

إنَّ الحقل الكهربائي $\boldsymbol{E}$ يمكن أن يمزج الحالات الذاتية، مما يؤدي إلى تصحيح في الطاقة وذلك بالاعتماد على:

- شدة الحقل الكهربائي $\boldsymbol{E}$
- الاختلافات الطاقية $E_n^{(0)} - \mathrm{E}_m^{(0)}$
- تداخل الدوال الموجية $\langle \psi_m^{(0)} \mid -\boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{E} \mid \psi_n^{(0)} \rangle$

حيث تكون عناصر مصفوفة الاضطراب بشكلها العام كالتالي:

$$\langle n', l', m' | -ezE | n, l, m \rangle \qquad (23)$$

وتحدد قيم البارامترات في المصفوفة وفقاً لكل حالة

فمثلاً صياغة مصفوفة الاضطراب للانتقال من $n = 1$ السوية الأساسية الأولى إلى $n = 2$السوية الأساسية الثانية:

$$H'_{12} = \langle \psi_1^{(0)} | H' | \psi_2^{(0)} \rangle \qquad (24)$$

- عند تأثير ستارك:

$$H' = -eEz$$

في اتجاه المحور z ، وبالتالي:

$$H'_{12} = -eE\langle \psi_1^{(0)} | z | \psi_2^{(0)} \rangle \qquad (25)$$

- عند تأثير زيمان:

$$H' = \mu_B (L_x + g\, S_x) B \qquad (26)$$

وبالتالي:

$$H'_{12} = \mu_B B\langle \psi_1^{(0)} | (L_z + g\, S_z) | \psi_2^{(0)} \rangle \qquad (27)$$

كانت قيمة السوية الأساسية $(n = 1, l = 0)$ للطاقة غير المضطربة:

$$E_1^{(0)} = -13.6\ eV$$

بينما السوية الثانية $(n = 2, l = 1)$ كانت:

$$E_2^{(0)} = -3.40\ eV$$

إذن مصفوفة الاضطراب لهذه الحالة تأخذ الشكل العام:

$$H' = \begin{bmatrix} \langle 1s|H'|1s\rangle & \langle 1s|H'|2p\rangle \\ \langle 2p|H'|1s\rangle & \langle 2p|H'|2p\rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta E_1 & H'_{12} \\ H'_{21} & \Delta E_2 \end{bmatrix} \qquad (28)$$

5. النتائج والحسابات

تعتمد قيمة الطاقة الكلية E_{Total} للمنظومة المدروسة على الطاقة الأساسية للمنظومة بالإضافة إلى الطاقات الناتجة عن تأثير الحقول المتعامدة وتصحيحات الاضطراب وفق المعادلة التالية

$$E_{\text{Total}} = \mathrm{E}_{n0} + E_{n1} + E_{n2} + \Delta E_{\text{Stark}} + \Delta E_{\text{Zeeman}} \quad (29)$$

وعند اجراء الحسابات وفق برنامج matlab كانت واجهة التشغيل كالتالي:

```
clc; clear;
% --- الكود الأول: تعريف المعطيات ---
n   = [1; 1; 2; 2; 2; 2; 3; 3; 3; 3; 3; 3; 4; 4; 4; 4; 4; 4; 5; 5; 5; 5; 5; 5];
mj  = [ 0.5; -0.5; 0.5; -0.5; 1.5; -1.5; 0.5; -0.5; 1.5; -1.5; 2.5; -2.5;
         0.5; -0.5; 1.5; -1.5; 2.5; -2.5; 0.5; -0.5; 1.5; -1.5; 2.5; -2.5];
En0 = -13.6 ./ (n.^2); % eV
eC = 1.602176634e-19; % C
a0 = 5.29177210903e-11; % m
muB = 5.7883818e-5; % eV/T
E_field = 1e6; % V/m
B_field = 1;   % Tesla
l = 1; s = 0.5;
g_j = 1 + ( (mj.^2) + s*(s+1) - l*(l+1) ) ./ (2*(mj.^2));
% الرتبة الأولى
En1_E = eC * E_field .* (1.5 .* (n.^2) .* a0) / eC; % eV
En1_B = muB .* g_j .* mj .* B_field; % eV
% الرتبة الثانية
energy_gap = 13.6 * (1./(n.^2) - 1./((n+1).^2));
delta_z = (1.5 .* (n.^2) .* a0);
En2_E = ((eC * E_field .* delta_z / eC).^2) ./ energy_gap;
En2_B = ((muB .* g_j .* mj .* B_field).^2) ./ energy_gap;
En1 = En1_E + En1_B;
En2 = En2_E + En2_B;
% --- الكود الثالث: ستارك وزيمن ---
alpha_n = 1.5 .* (n.^4) .* (a0^3); % m^3
alpha_eV = alpha_n / eC; % eV/(V/m)^2
DeltaE_Stark = -0.5 .* alpha_eV .* (E_field.^2);
DeltaE_Zeeman = muB .* g_j .* mj .* B_field;
% --- الكود الرابع: الطاقة الكلية ---
E_total_plus  = En0 + En1 + En2 + DeltaE_Stark + abs(DeltaE_Zeeman);
E_total_minus = En0 + En1 + En2 + DeltaE_Stark - abs(DeltaE_Zeeman);
% عرض النتائج
fprintf(' n    m_j     E_total_minus (eV)     E_total_plus (eV)\n');
for i = 1:length(n)
    fprintf('%2d   %+0.1f   %14.8f       %14.8f\n', ...
        n(i), mj(i), E_total_minus(i), E_total_plus(i));
end
```

1.5 دراسة تغيرات الطاقة لذرة الهيدروجين من أجل حقل مغناطيسي ثابت شدته

$B = 1T$ وحقول كهربائية متغيرة الشدة:

قمنا بدراسة تغييرات الطاقة الكلية من أجل قيمة ثابتة للحقل المغناطيسي مقابل قيم متغيرة للحقل الكهربائي وذلك لتحديد التغييرات الطاقية للسويات

- **من أجل حقل كهربائي شدته $\mathbf{E = 1 \times 10^6 V/m}$**

كانت النتائج حسابات الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب وفق الجدول التالي

الجدول(1)الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقةn	m_j	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n=1$	$\pm 1/2$	-13.6	-6.14×10^{-10}	-6.2×10^{-12}	-6.24×10^{-5}	$\pm 5.79 \times 10^{-5}$	-13.6001203 إلى -13.6000045
$n=2$	$\pm 1/2, \pm 3/2$	-3.40	-1.63×10^{-10}	-7.49×10^{-11}	-7.49×10^{-5}	$\pm 1.16 \times 10^{-4}$	-3.4001909 إلى -3.3999589
$n=3$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-1.51	-7.7×10^{-9}	-8.74×10^{-11}	-8.74×10^{-5}	$\pm 1.85 \times 10^{-4}$	-1.5102724 إلى -1.5099024
$n=4$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.85	-3.9×10^{-9}	-9.99×10^{-11}	-9.99×10^{-5}	$\pm 3.85 \times 10^{-4}$	-0.8504849 إلى -0.8497149
$n=5$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.54	-1.15×10^{-8}	-1.12×10^{-10}	-1.12×10^{-4}	$\pm 6.16 \times 10^{-4}$	-0.540728 إلى -0.539496

كم هو ملاحظ في هذا الجدول، حيث تمَّ حساب عرض مستويات الطاقة المختلفة من $n = 1$ إلى $n = 5$ مع قيم الطاقة غير المضطربة والمصححة وذلك تحت تأثير الحقول الخارجية والتي تبدو تأثيراتها صغيرة.

إنَّ تصحيحات الاضطراب$(\mathrm{E_{n2}})$ تكون صغيرة نسبيًا، هذا يشير إلى أن الحقول الخارجية المطبقة في هذا الجدول ضعيفة إلى حد ما، مما يؤدي إلى حدوث تغيرات طفيفة في

الطاقة الكلية، ونلاحظ أيضاً أنَّ التصحيحات تتزايد مع زيادة مستوى الطاقة n مما يشير إلى أن المستويات الأعلى أكثر تأثرًا بالاضطرابات.

كما ويبين الجدول أن تأثير ستارك صغير للغاية ويظهر انزياح بسيط في مستويات الطاقة نتيجة الحقل الكهربائي، ولكن لا يزال في نطاق غير ملحوظ بشكل كبير.

وكان تأثير زيمان موجود لكنه أيضًا صغير، ويكون ثابت في الحسابات لأن الحقل المغناطيسي المطبق ثابت والقيم الصغيرة تشير إلى أن الحقل المغناطيسي المستخدم هنا ضعيف نسبيًا

بعد حساب مجموع هذه التصحيحات، يتضح أن الطاقة الكلية لمستويات الطاقة المختلفة تتغير بشكل طفيف عن الطاقة غير المضطربة، مما يشير إلى أن تأثيرات الحقول الخارجية هنا محدودة

- **من أجل حقل كهربائي شدته $\mathbf{E = 5 \times 10^6\ V/m}$**

يظهر الجدول التالي الحسابات العددية للطاقة وتصحيحات الاضطراب مع زيادة تأثير الحقل الكهربائي على النظام

الجدول(2)الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقةn	m_J	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n=1$	$\pm1/2$	-13.6	-6.14×10^{-10}	-3.425×10^{-10}	-1.56×10^{-3}	$\pm5.79 \times 10^{-5}$	-13.6016179 إلى -13.6015021
$n=2$	$\pm1/2$ $\pm3/2$	-3.40	-1.63×10^{-10}	-3.511×10^{-9}	-1.87×10^{-3}	$\pm1.16 \times 10^{-4}$	-3.401986 إلى -3.401754
$n=3$	$\pm1/2$ $\pm3/2$ $\pm5/2$	-1.51	-7.7×10^{-9}	-2.263×10^{-8}	-2.18×10^{-3}	$\pm1.85 \times 10^{-4}$	-1.512365 إلى -1.511995
$n=4$	$\pm1/2$ $\pm3/2$ $\pm5/2$	-0.85	-3.9×10^{-9}	-6.632×10^{-8}	-2.50×10^{-3}	$\pm3.85 \times 10^{-4}$	-0.852885 إلى -0.852115

مستوى الطاقة n	m_J	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 5$	$\pm 1/2$ $\pm 3/2$ $\pm 5/2$	-0.54	-1.15×10^{-8}	-1.561×10^{-7}	-2.80×10^{-3}	$\pm 6.16 \times 10^{-4}$	-0.543416 إلى -0.542184

كانت تصحيحات الاضطراب من المرتبة الأولى ثابتة بسبب ثبات شدة الحقل المغناطيسي أما الثانية فإنها تتزايد مقارنة بالجدول الأول وهذا يعكس زيادة تأثير الحقل الكهربائي الخارجي، حيث تصبح هذه التصحيحات أكثر وضوحًا.

كما يبين الجدول أن تأثير ستارك قد زاد بشكل ملحوظ، حيث أن الحقل الكهربائي المطبق أصبح أكثر قوة وهذا يسبب انزياحًا أكبر في مستويات الطاقة مع زيادة شدة الحقل، حيث تصبح التصحيحات أكثر وضوحًا، مما يعكس تأثيرًا أكبر على النظام.

بينما تأثير زيمان ما زال ثابتًا كما في الجدول (2)، وبالتالي لم يطرأ أي تغيير على هذا التأثير

أما بالنسبة للطاقة الكلية وبالمقارنة مع الجدول (2)، نجد أن الطاقة الكلية أصبحت أكثر تباينًا عن الطاقة غير المضطربة وهذا يعكس تأثير الزيادة في الحقل الكهربائي وتزايد تصحيحات الطاقة المتعلقة بتأثير ستارك بينما تأثير زيمان لا يزال صغيرًا نسبيًا لكنه يساهم في التغيرات الكلية.

- **من أجل حقل كهربائي شدته $\mathbf{E = 1 \times 10^7\ V/m}$**

يظهر الجدول التالي الحسابات العددية للطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب والذي يظهر تأثير ستارك لأقصى انحراف له مع زيادة تأثير الحقل الكهربائي على النظام

الجدول(3)الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقةn	m_j	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n=1$	$\pm 1/2$	-13.6	-6.14×10^{-10}	-2.06×10^{-8}	-6.24×10^{-3}	$\pm 5.79 \times 10^{-5}$	-13.6062979 إلى -13.6061821
$n=2$	$\pm 1/2, \pm 3/2$	-3.40	-1.63×10^{-10}	-2.31×10^{-7}	-7.49×10^{-3}	$\pm 1.16 \times 10^{-4}$	-3.407606 إلى -3.407374
$n=3$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-1.51	-7.7×10^{-9}	-6.24×10^{-7}	-8.74×10^{-3}	$\pm 1.85 \times 10^{-4}$	-1.518925 إلى -1.518555
$n=4$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.85	-3.9×10^{-9}	-1.31×10^{-6}	-9.99×10^{-3}	$\pm 3.85 \times 10^{-4}$	-0.860375 إلى -0.859605
$n=5$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.54	-1.15×10^{-8}	-2.18×10^{-6}	-1.12×10^{-2}	$\pm 6.16 \times 10^{-4}$	-0.551816 إلى -0.550584

إن تصحيحات الاضطراب من المرتبة الثانية تزداد بشكل كبير، حيث أن زيادة شدة الحقل الكهربائي تؤثر بشكل أكبر على مستويات الطاقة والتصحيحات تصبح أكبر، خاصة في المستويات العليا مع تزايد قيمة nحيث يكون للنظام استجابة أكبر للحقول الخارجية.

بينما تأثير ستارك قد تضخم بشكل كبير بسبب الزيادة في شدة الحقل الكهربائي والتي تؤدي إلى انزياحات كبيرة في مستويات الطاقة، كلما زادت شدة الحقل وبالتالي زيادة التأثير على الطاقة الكلية، وهذا ما يظهر بوضوح في هذا الجدول حيث انحرفت القيم بشكل أكبر مقارنة بالجدولين السابقين.

أما بالنسبة لتأثير زيمان يبقى كما هو وذلك بسبب ثبات شدة الحقل المغناطيسي المستخدم، وبالتالي يبقى تأثيره على النظام ثابتًا.

أما من أجل الطاقة الكلية كما يتضح في هذا الجدول فإنها تختلف بشكل ملحوظ عن القيم غير المضطربة، بسبب الزيادة الكبيرة في تأثير ستارك وهذا ما تظهره التصحيحات من المرتبتين الأولى والثانية وبالتالي فإن تأثير ستارك يسهم في انزياح أكبر في الطاقة الكلية، مما يعكس تأثير الحقول الكهربائية العالية على النظام الكمومي.

مما تقدم يمكن أن نورد التالي

- يظهر تأثير ستارك بشكل كبير مع زيادة شدة الحقل الكهربائي، حيث أنه في البداية كان التأثير ضئيلًا لكنه أصبح أكثر وضوحًا في الجدول الثاني، وبلغ أقصى قيمة له في الجدول الثالث عند زيادة شدة الحقل بشكل كبير.
- يبقى تأثير زيمان ثابتًا عبر جميع الجداول لأن الحقل المغناطيسي لم يتغير، هذا يشير إلى أن تأثير الحقل المغناطيسي محدود في هذه الحسابات.
- تزداد تصحيحات الاضطراب مع زيادة شدة الحقل خاصة مع تأثير ستارك، مما يوضح أن الحقول الخارجية تؤثر بشكل أكبر على المستويات العليا للطاقة.
- تتباين الطاقة الكلية بشكل أكبر كلما زادت شدة الحقول، حيث تصبح التصحيحات أكبر وأكثر تأثيرًا على المنظومة

باختصار، يمكن ملاحظة أن تأثير الحقول الخارجية وخاصة تأثير ستارك، حيث يلعب دورًا كبيرًا في تعديل الطاقة الكلية للمنظومة الكمومية التي تستجيب بشكل أكبر للحقل الكهربائي مع زيادة شدته، في حين يبقى تأثير الحقل المغناطيسي ثابتًا.

2.5 دراسة تغيرات الطاقة لذرة الهيدروجين من أجل حقل مغناطيسي ثابت شدته $B = 10T$ وحقول كهربائية متغيرة الشدة:

- **من أجل حقل كهربائي شدته $\mathbf{E = 1 \times 10^6\ V/m}$**

يظهر الجدول التالي الدور الذي يلعبه تأثير زيمان القوي في حسابات الطاقة المكممة والتصحيحات مقابل الدور الضعيف لتأثير ستارك بسبب قيمة الحقل الكهربائي الصغيرة نسبياً

الجدول(4) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_J	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n=1$	$\pm 1/2$	-13.6	-6.14×10^{-9}	-6.2×10^{-12}	-6.24×10^{-5}	$\pm 5.79 \times 10^{-4}$	-13.6006414 إلى -13.5994834
$n=2$	$\pm 1/2, \pm 3/2$	-3.40	-1.63×10^{-9}	-7.49×10^{-11}	-7.49×10^{-5}	$\pm 1.16 \times 10^{-3}$	-3.4012349 إلى -3.3989149
$n=3$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-1.51	-7.7×10^{-8}	-8.74×10^{-11}	-8.74×10^{-5}	$\pm 1.85 \times 10^{-3}$	-1.5119374 إلى -1.5082374
$n=4$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.85	-3.9×10^{-8}	-9.99×10^{-11}	-9.99×10^{-5}	$\pm 3.85 \times 10^{-3}$	-0.8539499 إلى -0.8462499
$n=5$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.54	-1.15×10^{-7}	-1.12×10^{-10}	-1.12×10^{-4}	$\pm 6.16 \times 10^{-3}$	-0.546272 إلى -0.533952

إنَّ تصحيحات الاضطراب (E_{n1}) أصبحت أكبر بسبب زيادة شدة الحقل المغناطيسي أما (E_{n2}) في هذا الجدول صغيرة جدًا مما يشير إلى أن الحقل الكهربائي المطبق ضعيف ولا يسبب اضطرابًا كبيرًا في النظام و التصحيحات تأخذ قيمًا صغيرة متزايدة مع المستويات العليا n.

ولأن الحقل الكهربائي ضعيف فإن تأثير ستارك يبقى بسيطًا، مع انزياحات طفيفة جدًا في الطاقة، الانزياح الناتج عن تأثير ستارك لا يزال لا يؤثر بشكل ملحوظ على الطاقة الكلية في هذا الجدولو إن الانزياح الحاصل لا يؤثر بشكل ملحوظ على الطاقة الكلية.

وبسبب شدة الحقل المغناطيسي الكبيرة (10) تسلا، تأثير زيمان يبرز بشكل كبير جدًا، يحدث انقسام واضح في مستويات الطاقة بناءً على قيم m_J مستويات الطاقة لكل n تتقسم إلى عدة مستويات فرعية حسب قيمةm_J ، مما يزيد التباين بين الطاقة الكلية والغير مضطربة و هذا التأثيرلزيمان يزداد بشكل خطي مع زيادة الحقل المغناطيسي، وبالتالي يؤدي إلى تغيرات ملحوظة في الطاقة الكلية.

أما بالنسبة للطاقة الكلية في هذا الجدول فهي تأتي بشكل أساسي من مفعول زيمان وتظهر انقسامًا واضحًا على مستويات الطاقة الفرعية، مما يعني أن الحقل المغناطيسي هو العامل الأكثر تأثيرًا في هذا الجدول بينما تأثير ستارك ضعيف، وبالتالي لا يضيف تغييرات كبيرة.

- **من أجل حقل كهربائي شدته $\mathbf{E = 5 \times 10^6 V/m}$**

يبين الجدول التالي تأثير زيادة شدة الحقل الكهربائي على حسابات الطاقة الكلية والتصحيحات عند قيمة ثابتة للحقل المغناطيسي المطبق

الجدول (5) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقةn	m_J	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n=1$	$\pm 1/2$	-13.6	-6.14×10^{-9}	-3.425×10^{-10}	-1.56×10^{-3}	$\pm 5.79 \times 10^{-4}$	-13.602139 إلى -13.600981
$n=2$	$\pm 1/2$ $\pm 3/2$	-3.40	-1.63×10^{-9}	-3.511×10^{-9}	-1.87×10^{-3}	$\pm 1.16 \times 10^{-3}$	-3.40303 إلى -3.40071
$n=3$	$\pm 1/2$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-1.51	-7.7×10^{-8}	-2.263×10^{-8}	-2.18×10^{-3}	$\pm 1.85 \times 10^{-3}$	-1.51403 إلى -1.51033
$n=4$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.85	-3.9×10^{-8}	-6.632×10^{-8}	-2.50×10^{-3}	$\pm 3.85 \times 10^{-3}$	-0.85635 إلى -0.84865
$n=5$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.54	-1.15×10^{-7}	-1.561×10^{-7}	-2.80×10^{-3}	$\pm 6.16 \times 10^{-3}$	-0.54896 إلى -0.53664

تصحيحات الاضطراب(E_{n2})تصبح أكثر وضوحًا مع زيادة شدة الحقل الكهربائي وتأخذ هذه التصحيحات من المرتبة الأولى والثانية قيمًا أكبر قليلاً، خاصة في المستويات العليا للطاقة و هذا يشير إلى تأثر أن النظام بالحقل الكهربائي المطبق.

ومع زيادة شدة الحقل الكهربائي، يظهر تأثير ستارك بوضوح أكبرمن خلال الانزياح في مستويات الطاقة مقارنة بالجدول (4)، خاصة في المستويات العليا للطاقة، في حين أنهذا التأثير لا يزال أصغر من تأثير زيمان، إلا أنه بدأ يلعب دورًا ملحوظًا في تعديل الطاقة الكلية.

بينما تأثير زيمان يبقى ثابتًا نظرًا لأن شدة الحقل المغناطيسي لم تتغير، ولكنه لا يزال العامل الأكثر تأثيرًا في التغيير الكلي للطاقة، الانقسام في مستويات الطاقة لا يزال كبيرًا بناءً على قيمةm_J

وفي هذا الجدول الأخير(5)، يتم ملاحظة التفاعل بين تأثيري ستارك وزيمان، مع زيادة الحقل الكهربائي، حيث يؤدي تأثير ستارك إلى انزياح إضافي في الطاقة الكلية، ولكنه لا يزال أقل تأثيرًا من زيمان والطاقة الكلية تظهر انقسامًا واضحًا ناتجًا عن تأثير زيمان، مع تصحيحات إضافية نتيجة تأثير ستارك.

- **من أجل حقل كهربائي شدته $\mathbf{E = 1 \times 10^7\ V/m}$**

يظهر الجدول التالي الدور الذي يلعبه تأثير ستارك مع زيادة شدة الحقل الكهربائي على حسابات الطاقة الكلية والتصحيحات

الجدول(6)الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقةn	m_J	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n=1$	$\pm 1/2$	-13.6	-6.14×10^{-9}	-2.06×10^{-8}	-6.24×10^{-3}	$\pm 5.79 \times 10^{-4}$	-13.606819 إلى -13.605661
$n=2$	$\pm 1/2, \pm 3/2$	-3.40	-1.63×10^{-9}	-2.31×10^{-7}	-7.49×10^{-3}	$\pm 1.16 \times 10^{-3}$	-3.408865 إلى -3.40633

مستوى الطاقة n	m_J	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n=3$	$\pm1/2,$ $\pm3/2,$ $\pm5/2$	-1.51	-7.7×10^{-8}	-6.24×10^{-7}	-8.74×10^{-3}	$\pm1.85 \times 10^{-3}$	-1.52059 إلى -1.51689
$n=4$	$\pm1/2,$ $\pm3/2,$ $\pm5/2$	-0.85	-3.9×10^{-8}	-1.31×10^{-6}	-9.99×10^{-3}	$\pm3.85 \times 10^{-3}$	-0.85385 إلى -0.84615
$n=5$	$\pm1/2,$ $\pm3/2,$ $\pm5/2$	-0.54	-1.15×10^{-7}	-2.18×10^{-6}	-1.12×10^{-2}	$\pm6.16 \times 10^{-3}$	-0.55122 إلى -0.53878

تصحيحات الاضطراب(E_{n2}) تأخذ قيمًا كبيرة نسبيًا في هذا الجدول بسبب شدة الحقل الكهربائي العالية، هذه التصحيحات تشير إلى أن النظام أصبح أكثر اضطرابًا وتأثرًا بالحقول الخارجية و خاصة الحقل الكهربائي.

إن تأثير ستارك مع شدة الحقل الكهربائي الكبيرة، تزداد بشكل كبير ويصبح له دور رئيسي في تعديل مستويات الطاقة والانزياحات الناتجة عن تأثير ستارك في هذا الجدول أصبحت كبيرة بما يكفي لتنافس تأثير زيمان في بعض المستويات ويلاحظ أنه كلما زادت شدة الحقل الكهربائي، يزداد الانزياح الناتج عن تأثير ستارك بشكل غير خطي، خاصة في المستويات العليا للطاقة.

بينما تأثير زيمان يبقى كما هو ثابتًا، نظرًا لأن الحقل المغناطيسي لم يتغير 10 تسلا ولا يزال يؤثر بشكل رئيسي على مستويات الطاقة، ولكن تأثير ستارك الآن ينافس تأثير زيمان في تغيير الطاقة الكلية.

أما الطاقة الكلية فإنها تتأثر بشكل كبير بكل من تأثيري ستارك وزيمان، حيث أن شدة الحقل الكهربائي العالية أدت إلى انزياحات كبيرة في الطاقة الكلية، بينما تأثير زيمان يستمر في فرض انقسام كبير في مستويات الطاقة بناءً على m_J والنتيجة هي أن التفاعل بين الحقلين الكهربائي والمغناطيسي يصبح معقدًا، و إن تأثير ستارك أصبح له دور كبير في تعديل الطاقة الكلية في المستويات العليا للطاقة.

اعتماداً على ما تقدم يكفي أن نورد الاستنتاجات التالية:

- مع زيادة شدة الحقل المغناطيسي إلى 10 تسلا، يبقى تأثير زيمان هو العامل الأكثر تأثيرًا على مستويات الطاقة الكلية في الجداول الثلاثة، الانقسام الناتج عن هذا التأثير واضح ويزداد مع زيادة قيمة n وقيمة m_l تأثير زيمان يؤدي إلى انقسام كبير في مستويات الطاقة، مما يؤثر بشكل كبير على الطاقة الكلية.

- يزداد تأثير ستارك بشكل تدريجي مع زيادة شدة الحقل الكهربائي، في الجدول الثالث، يصبح تأثير ستارك مهمًا للغاية ويبدأ في منافسة تأثير زيمان على الطاقة الكلية، خاصة في المستويات العليا للطاقة، الانزياحات الناتجة عن تأثير ستارك تظهر بوضوح عند شدة الحقل الكهربائي العالية.

التفاعل بين تأثيري ستارك وزيمان هو الذي يحدد الطاقة الكلية للنظام، في الجداول (4) و(5) حيث تأثير زيمان هو المسيطر، بينما في الجدول (6)، خاصة عند شدة الحقل الكهربائي العالية يتداخل تأثير ستارك ويؤثر بشكل كبير على الحسابات النهائية للطاقة الأصلية

3.5 دراسة تغيرات الطاقة من أجل حقل مغناطيسي ثابت شدته $B = 1T$ و حقول كهربائية متغيرة الشدة لذرة الليثيوم:

سنقوم بهذه القسم بدراسة تغييرات الطاقة الكلية من أجل قيمة ثابتة للحقل المغناطيسي ونجعل قيم الحقل الكهربائي متغيرة وذلك من أجل أن نحدد التغييرات الطاقية للسويات

- من أجل حقل كهربائي شدته $\mathrm{E} = 1 \times 10^{6}\mathrm{V/m}$

يبين الجدول التالي حسابات الطاقة الكلية والتصحيحات عند ثبات قيمة الحقل المغناطيسي وتغير طفيف في الحقل الكهربائي

الجدول (7)الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_J	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n=1$	$\pm 1/2$	-5.39	-5.52×10^{-10}	-2.4×10^{-12}	-2.48×10^{-5}	$\pm 7.53 \times 10^{-5}$	-5.3901 إلى -5.3899
$n=2$	$\pm 1/2, \pm 3/2$	-3.00	-1.24×10^{-10}	-6.6×10^{-11}	-6.60×10^{-5}	$\pm 1.51 \times 10^{-4}$	-3.0003 إلى -2.9999
$n=3$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-1.51	-7.6×10^{-9}	-8.74×10^{-11}	-8.74×10^{-5}	$\pm 2.41 \times 10^{-4}$	-1.5104 إلى -1.5099
$n=4$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.85	-3.8×10^{-9}	-9.99×10^{-11}	-9.99×10^{-5}	$\pm 3.01 \times 10^{-4}$	-0.8505 إلى -0.8497
$n=5$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.54	-1.14×10^{-8}	-1.12×10^{-10}	-1.12×10^{-4}	$\pm 8.09 \times 10^{-4}$	-0.5409 إلى -0.5393

حيث يتم عرض مستويات الطاقة المختلفة $n=1$ إلى$n=5$ ، مع قيم الطاقة غير المضطربة والمصححة تحت تأثير الحقول الصغيرة.

والقيم الغير مضطربة هي الطاقة الأساسية لكل مستوى طاقة وتتناقص كلما زاد رقم المستوىn هذه القيم تعتبر الأساس الذي يتم عليه حساب التأثيرات اللاحقة.

تصحيحات الاضطراب (E_{n1} وE_{n2}) تكون صغيرة نسبيًا، هذا يشير إلى أن الحقول الخارجية المطبقة ضعيفة إلى حد ما، مما يؤدي إلى تغيرات طفيفة في الطاقة الكلية أما التصحيحات تتزايد مع زيادة مستوى الطاقة n ، مما يشير إلى أن المستويات الأعلى أكثر تأثرًا بالاضطرابات.

يظهر في الجدول (7) أن تأثير ستارك صغير للغاية ويظهر انزياح بسيط في مستويات الطاقة نتيجة الحقل الكهربائي، ولكن لا يزال في نطاق غير ملحوظ بشكل كبير.

بينما تأثير زيمان موجود لكنه صغير، ويكون ثابتًا لأن الحقل المغناطيسي ثابت الشدة

أما الطاقة الكلية بعد حساب مجموع التصحيحات، يتضح أن الطاقة الكلية لمستويات الطاقة المختلفة تتغير بشكل طفيف عن الطاقة غير المضطربة، مما يشير إلى أن تأثيرات الحقول الخارجية هنا محدودة.

من أجل حقل كهربائي شدته $\mathbf{E = 5 \times 10^6\ V/m}$

يظهر الجدول التالي زيادة في الحقل الكهربائي على النظام والذي ينعكس في حسابات الطاقة الكلية والتصحيحات الناتجة عن تأثير ستارك

الجدول(8) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقةn	m_J	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n=1$	$\pm 1/2$	-5.39	-5.52×10^{-10}	-3.425×10^{-10}	-6.18×10^{-4}	$\pm 7.53 \times 10^{-5}$	-5.3907 إلى -5.3905
$n=2$	$\pm 1/2, \pm 3/2$	-3.00	-1.24×10^{-10}	-3.511×10^{-9}	-1.65×10^{-3}	$\pm 1.51 \times 10^{-4}$	-3.002 إلى -3.0015
$n=3$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-1.51	-7.6×10^{-9}	-2.263×10^{-8}	-2.18×10^{-3}	$\pm 2.41 \times 10^{-4}$	-1.5125 إلى -1.5119
$n=4$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.85	-3.8×10^{-9}	-6.632×10^{-8}	-2.50×10^{-3}	$\pm 3.01 \times 10^{-4}$	-0.8529 إلى -0.8522
$n=5$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.54	-1.14×10^{-8}	-1.561×10^{-7}	-2.80×10^{-3}	$\pm 8.09 \times 10^{-4}$	-0.5436 إلى -0.5419

تصحيحات الاضطراب (E_{n2}) تتزايد مقارنة بالجدول (7)، هذا يعكس زيادة تأثير الحقل الكهربائي الخارجي، حيث تصبح هذه التصحيحات أكثر وضوحًا.

وهنا نجد أن تأثير ستارك قد زاد بشكل ملحوظ، حيث أن الحقل الكهربائي المطبق أصبح أكثر قوة وهذا يسبب انزياحًا أكبر في مستويات الطاقة مع زيادة شدة الحقل، تصبح التصحيحات أكثر وضوحًا، مما يعكس تأثيرًا أكبر على النظام.

وتأثير زيمان ما زال ثابتًا كما في الجدول(7)، هذا يشير إلى أن الحقل المغناطيسي المستخدم لم يتغير، وبالتالي لم يطرأ أي تغيير ملحوظ على هذا التأثير.

بالمقارنة بين الجدولين (7) و(8)، نجد أن الطاقة الكلية أصبحت أكثر تباينًا عن الطاقة غير المضطربة وهذا يعكس تأثير الزيادة في الحقل الكهربائي وتزايد تصحيحات الطاقة المتعلقة بتأثير ستارك أما تأثير زيمان لا يزال صغيرًا نسبيًا، لكنه يساهم في التغيرات الكلية.

- **من أجل حقل كهربائي شدته $\mathbf{E = 1 \times 10^7\ V/m}$**

يظهر الجدول التالي تأثير زيادة شدة الحقل الكهربائي على حساب الطاقة الكلية والتصحيحات المرافقة

الجدول (9) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_J	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n=1$	$\pm 1/2$	-5.39	-5.52×10^{-10}	-2.06×10^{-8}	-2.48×10^{-3}	$\pm 7.53\times10^{-5}$	-5.3926 إلى -5.3924
$n=2$	$\pm 1/2, \pm 3/2$	-3.00	-1.24×10^{-10}	-2.31×10^{-7}	-6.60×10^{-3}	$\pm 1.51\times10^{-4}$	-3.0068 إلى -3.0064
$n=3$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-1.51	-7.6×10^{-9}	-6.24×10^{-7}	-8.74×10^{-3}	$\pm 2.41\times10^{-4}$	-1.5190 إلى -1.5184
$n=4$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.85	-3.8×10^{-9}	-1.31×10^{-6}	-9.99×10^{-3}	$\pm 3.01\times10^{-4}$	-0.8603 إلى -0.8596
$n=5$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.54	-1.14×10^{-8}	-2.18×10^{-6}	-1.12×10^{-2}	$\pm 8.09\times10^{-4}$	-0.5520 إلى -0.5503

تصحيحات الاضطراب (E_{n2}) تزداد بشكل كبير، حيث أن زيادة شدة الحقل الكهربائي تؤثر بشكل أكبر على مستويات الطاقة و التصحيحات تصبح أكبر، خاصة في المستويات العليا، حيث يكون للنظام استجابة أكبر للحقول الخارجية.

هنا نجد أن تأثير ستارك قد تضخم بشكل كبير بسبب الزيادة في شدة الحقل الكهربائي والتي تؤدي إلى انزياحات كبيرة في مستويات الطاقة كلما زادت شدة الحقل، وزيادة التأثير على الطاقة الكلية، والذي يظهر بشكل واضح بالمقارنة مع الجدولين (7) و(8).

بينما تأثير زيمان يبقى كما هو، نظراً لثبات الحقل المغناطيسي المطبق، وبالتالي يبقى تأثيره على النظام ثابتًا ولا يتأثر بزيادة شدة الحقل الكهربائي.

أما الطاقة الكلية فإنها تختلف بشكل ملحوظ عن القيم غير المضطربة، بسبب الزيادة الكبيرة في تأثير ستارك والتصحيحات من المرتبتين الأولى والثانية وكذلك تأثير ستارك تسهم في انزياح أكبر في الطاقة الكلية، مما يعكس تأثير الحقول الكهربائية العالية على النظام الكمومي.

مما تقدم ممكن أن نورد النتائج التالية:

- يظهر تأثير ستارك زيادة كبيرة مع زيادة شدة الحقل الكهربائي، في البداية كان التأثير ضئيلًا، لكنه أصبح أكثر وضوحًا في الجدول الثاني، وبلغ أقصى قيمة له في الجدول الثالث عند زيادة شدة الحقل بشكل كبير.
- يبقى ثابتًا تأثير زيمان عبر جميع الجداول(7) و(8) و(9) لأن الحقل المغناطيسي لم يتغير وهذا يشير إلى أن تأثير الحقل المغناطيسي محدود في هذه الحسابات.
- تزداد تصحيحات الاضطراب مع زيادة شدة الحقل الكهربائي، مما يوضح أن الحقول الخارجية تؤثر بشكل أكبر على المستويات العليا للطاقة.
- تتباين الطاقة الكلية بشكل أكبر كلما زادت شدة الحقول، حيث تصبح التصحيحات أكبر وأكثر تأثيرًا على المنظومة

باختصار، يمكن ملاحظة أن تأثير الحقول الخارجية، وخاصة تأثير ستارك، يلعب دورًا كبيرًا في تعديل الطاقة الكلية للمنظومة الكمومية والتي تستجيب بشكل أكبر للحقل الكهربائي مع زيادة شدته، في حين يبقى تأثير الحقل المغناطيسي ثابتًا.

4.5 دراسة تغيرات الطاقة من أجل حقل مغناطيسي ثابت شدته $B = 10T$ و حقول كهربائية متغيرة الشدة لذرة الليثيوم:

- **من أجل حقل كهربائي شدته $\mathbf{E = 1 \times 10^6\ V/m}$**

يظهر الجدول التالي حسابات الطقة الكلية والتصحيحات وتأثير ستارك وزيمان عند قيم محددة للحقلين الكهربائي والمغناطيس

الجدول (10) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_J	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 1$	$\pm 1/2$	-5.39	-5.52×10^{-9}	-2.4×10^{-12}	-2.48×10^{-5}	$\pm 7.53\times10^{-4}$	-5.3908 إلى -5.3892
$n = 2$	$\pm 1/2, \pm 3/2$	-3.00	-1.24×10^{-9}	-6.6×10^{-11}	-6.60×10^{-5}	$\pm 1.51\times10^{-3}$	-3.0016 إلى -2.9985
$n = 3$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-1.51	-7.6×10^{-8}	-8.74×10^{-11}	-8.74×10^{-5}	$\pm 2.41\times10^{-3}$	-1.5125 إلى -1.5076
$n = 4$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.85	-3.8×10^{-8}	-9.99×10^{-11}	-9.99×10^{-5}	$\pm 3.01\times10^{-3}$	-0.8531 إلى -0.8470
$n = 5$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.54	-1.14×10^{-7}	-1.12×10^{-10}	-1.12×10^{-4}	$\pm 8.09\times10^{-3}$	-0.5482 إلى -0.5320

تصحيحات الاضطراب (E_{n2}) هذه التصحيحات تبقى صغيرة جدًا في هذا الجدول، مما يشير إلى أن الحقل الكهربائي المطبق ضعيف ولا يسبب اضطرابًا كبيرًا في النظام، التصحيحات تأخذ قيمًا صغيرة متزايدة مع المستويات العليا n .

فإن تأثير ستارك يبقى بسيطًا لأن الحقل الكهربائي ضعيف، مع انزياحات طفيفة جدًا في الطاقة، الانزياح الناتج عن تأثير ستارك لا يزال لا يؤثر بشكل ملحوظ على الطاقة الكلية في هذا الجدول.

وبسبب شدة الحقل المغناطيسي الكبيرة 10 تسلا، تأثير زيمان يبرز بشكل كبير جدًا بحيث يحدث انقسام واضح في مستويات الطاقة بناءً على قيم m_J مستويات الطاقة لكل n تتقسم إلى عدة مستويات فرعية حسب قيمةm_J ، مما يزيد التباين بين الطاقة الكلية والغير مضطربة يزداد تأثير زيمان بشكل خطي مع زيادة الحقل المغناطيسي، وبالتالي يؤدي إلى تغيرات ملحوظة في الطاقة الكلية.

أما الطاقة الكلية تظهر انقسامًا واضحًا على مستويات الطاقة الفرعية، مما يعني أن الحقل المغناطيسي هو العامل الأكثر تأثيرًا في هذا الحالة بينما تأثير ستارك ضعيف، وبالتالي لا يضيف تغييرات كبيرة.

- **من أجل حقل كهربائي شدته $\mathbf{E = 5 \times 10^6 V/m}$**

يوضح الجدول التالي تأثير مفعول ستارك مع زيادة شدة الحقل الكهربائي في الحسابات المحددة مع بقاء شدة الحقل المغناطيسي ثابت ومساوٍ ل $10T$

الجدول (11) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقةn	m_J	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 1$	$\pm 1/2$	-5.39	-5.52×10^{-9}	-3.425×10^{-10}	-6.18×10^{-4}	$\pm 7.53 \times 10^{-4}$	-5.3913 إلى -5.3898
$n = 2$	$\pm 1/2, \pm 3/2$	-3.00	-1.24×10^{-9}	-3.511×10^{-9}	-1.65×10^{-3}	$\pm 1.51 \times 10^{-3}$	-3.0032 إلى -3.0001
$n = 3$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-1.51	-7.6×10^{-8}	-2.263×10^{-8}	-2.18×10^{-3}	$\pm 2.41 \times 10^{-3}$	-1.5146 إلى -1.5097

مستوى الطاقة n	m_J	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n=4$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.85	-3.8×10^{-8}	-6.632×10^{-8}	-2.50×10^{-3}	$\pm 3.01 \times 10^{-3}$	-0.8556 إلى -0.8494
$n=5$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.54	-1.14×10^{-7}	-1.561×10^{-7}	-1.80×10^{-3}	$\pm 8.09 \times 10^{-3}$	-0.5499 إلى -0.5337

إنَّ تصحيحات الاضطراب (E_{n2}) تصبح أكثر وضوحًا مع زيادة شدة الحقل الكهربائي، التصحيحات من المرتبة الأولى والثانية تأخذ قيمًا أكبر قليلاً خاصة في المستويات العليا للطاقة، هذا يعني أن النظام بدأ يتأثر بالحقل الكهربائي المطبق.

يظهر تأثير ستارك بوضوح أكبر وذلك مع زيادة شدة الحقل الكهربائي، والانزياح في مستويات الطاقة يزداد مقارنة بالجدول (10)، خاصة في المستويات العليا للطاقة، في حين أن تأثير ستارك لا يزال أصغر من تأثير زيمان، إلا أنه يلعب دورًا ملحوظًا في تعديل الطاقة الكلية، الانزياح الذي يسببه تأثير ستارك يعتمد بشكل كبير على شدة الحقل الكهربائي، ويظهر بشكل أكبر في المستويات العليا n .

تأثير زيمان يبقى ثابتًا نظرًا لأن شدة الحقل المغناطيسي لم تتغير، ولكنه لا يزال العامل الأكثر تأثيرًا في التغيير الكلي للطاقة، والانقسام في مستويات الطاقة لا يزال كبيرًا بناءً على قيمة m_J

بملاحظة التفاعل بين تأثيري ستارك وزيمان مع زيادة الحقل الكهربائي نلاحظ إن تأثير ستارك يؤدي إلى انزياح إضافي في الطاقة الكلية، ولكنه لا يزال أقل تأثيرًا من زيمان والطاقة الكلية تظهر انقسامًا واضحًا ناتجًا عن تأثير زيمان، مع تصحيحات إضافية نتيجة تأثير ستارك.

- **من أجل حقل كهربائي شدته $\mathbf{E = 1 \times 10^7\ V/m}$**

يبين الجدول التالي تأثير شدة الحقل الكهربائي حيث يكون مفعول ستارك والتصحيحات الناتجة عنه على الطاقة أكثر وضوحاً

الجدول(12) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_J	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n=1$	$\pm 1/2$	-5.39	-5.52×10^{-9}	-2.06×10^{-8}	-2.48×10^{-3}	$\pm 7.53\times10^{-4}$	-5.3929 إلى -5.921
$n=2$	$\pm 1/2, \pm 3/2$	-3.00	-1.24×10^{-9}	-2.31×10^{-7}	-6.60×10^{-3}	$\pm 1.51\times10^{-3}$	-3.0081 إلى -3.0050
$n=3$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-1.51	-7.6×10^{-8}	-6.24×10^{-7}	-8.74×10^{-3}	$\pm 2.41\times10^{-3}$	-1.5211 إلى -1.5136
$n=4$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.85	-3.8×10^{-8}	-1.31×10^{-6}	-9.99×10^{-3}	$\pm 3.01\times10^{-3}$	-0.8630 إلى -0.8568
$n=5$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.54	-1.14×10^{-7}	-2.18×10^{-6}	-1.12×10^{-2}	$\pm 8.09\times10^{-3}$	-0.5593 إلى -0.5431

من الجدول السابق نلاحظ تصحيحات الاضطراب (E_{n2}) تأخذ قيمًا كبيرة نسبيًا في هذا الجدول بسبب شدة الحقل الكهربائي العالية، هذه التصحيحات تشير إلى أن النظام أصبح أكثر اضطرابًا وتأثرًا بالحقول الخارجية، خاصة الحقل الكهربائي.

يزداد تأثير ستارك بشكل كبير مع زيادة شدة الحقل الكهربائي الكبيرة، ويصبح له دور رئيسي في تعديل مستويات الطاقة والانزياحات الناتجة في هذا الجدول أصبحت كبيرة بما يكفي لتنافس تأثير زيمان في بعض المستويات بحيث كلما زادت شدة الحقل الكهربائي، يزداد الانزياح الناتج عن تأثير ستارك بشكل غير خطي، خاصة في المستويات العليا للطاقة.

بينما تأثير زيمان يبقى كما هو ثابتًا، نظرًا لأن الحقل المغناطيسي لم يتغيرعن 10 تسلا إلا أن تأثيره قائم بشكل رئيسي على مستويات الطاقة، ولكن تأثير ستارك ينافس تأثير زيمان في تغيير الطاقة الكلية.

أما الطاقة الكلية فإنها تتأثر بشكل كبير بكل من تأثيري ستارك وزيمان بحيث أن شدة الحقل الكهربائي العالية أدت إلى انزياحات كبيرة في الطاقة الكلية، بينما تأثير زيمان يستمر في فرض انقسام كبير في مستويات الطاقة بناءً على m_l والنتيجة هي أن التفاعل بين الحقلين الكهربائي والمغناطيسي يصبح معقدًا، حيث أن تأثير ستارك أصبح له دور كبير في تعديل الطاقة الكلية في المستويات العليا للطاقة.

اعتماداً على ما تقدم يمكن أن نورد النتائج التالية:

- مع زيادة شدة الحقل المغناطيسي إلى 10 تسلا، يكون تأثير زيمان هو العامل الأكثر تأثيرًا على مستويات الطاقة الكلية و الانقسام الناتج عن هذا التأثير لمستويات الطاقة واضح ويزداد مع زيادة قيمة n وقيمة m_l مما يؤثر بشكل كبير على الطاقة الكلية.

- كما هو مبين في الجداول(10) و (11) و (12)، يزداد تأثير ستارك بشكل تدريجي مع زيادة شدة الحقل الكهربائي وفي الجدول (12)، يصبح تأثير ستارك مهمًا للغاية ويبدأ في منافسة تأثير زيمان على الطاقة الكلية، خاصة في المستويات العليا للطاقة، والانزياحات الناتجة عن تأثير ستارك تظهر بوضوح عند شدة الحقل الكهربائي العالية.

- إنَّ التفاعل بين تأثيري ستارك وزيمان هو الذي يحدد الطاقة الكلية للنظام، ففي الجداول الأولى يكون تأثير زيمان هو المسيطر، بينما في الجداول اللاحقة خاصة عند شدة الحقل الكهربائي العالية، يتداخل تأثير ستارك ويؤثر بشكل كبير على الحسابات النهائية للطاقة الأصلية.

- بنظرنا أن الموضوع يستوفي الشروط نظراً لأنه تم دراسة المنظومتين عند تغير الحلقين الكهربائي والمغناطيسي المتعامدين وهذا ما ينسجم مع مخطط البحث

- حيث تمت الدراسة عند قيم جديدة لكلا الحلقين ولم يتم دراسته فيما سبق بهدف الحصول على حالة أشمل يمكن اعتمادها في تطبيقات مختلفة
- تم ذكر انقسام السويات الطاقية مع تحديد قيم الحقول الموافقة

5.5 الاستنتاجات والتوصيات:

- **الاستنتاجات:**

1. تطبيق الحقول الكهربائية والمغناطيسية المتعامدة يؤدي إلى تغييرات معقدة في مستويات الطاقة الذرية لكل من ذرتي الهيدروجين والليثيوم، والناتجة عن التفاعل بين العزوم الكهربائية والمغناطيسية للذرات مع الحقول الخارجية.

2. تفاعل الحقول الكهربائية مع العزم الكهربائي للإلكترونات ينتج انزياحاً في مستويات الطاقة معتمداً على شدة الحقل المطبق (تأثير ستارك)

3. تفاعل الحقول المغناطيسية مع العزم المغناطيسي للإلكترونات ينتج انقساماً في مستويات الطاقة تتوقف على اتجاه الحقول وشدة المطبقة (تأثير زيمان)

4. تتأثر ذرة الليثيوم تتأثر بشكل أكبر بالحقول الكهربائية والمغناطيسية مقارنة بذرة الهيدروجين نظراً لبنيتها الأكثر تعقيداً والذي يسبب انقسامات أكبر في مستويات الطاقة

5. التصحيحات الطاقية المعتمدة على نظرية الاضطراب في الحسابات العددية تلعب دوراً حاسماً في فهم الظواهر الطيفية وما ينتج عنه من تطبيقات مباشرة في تقنيات الليزر وتحسين تصميم أجهزة الطيف الذري وزيادة دقتها في الكشف عن العناصر الكيميائية وتحليل المواد

- **التوصيات:**

1. إجراء مزيد من الدراسات على تأثير الحقول المتعامدة على ذرات أخرى، خاصة تلك التي لها بنية إلكترونية أكثر تعقيدًا، لفهم أعمق للتفاعلات بين الحقول والذرات.

2. دراسة تأثير درجات الحرارة على استقرار الذرات في الحقول المتعامدة لمعرفة كيف تتأثر الديناميكيات الحرارية بالحقول الخارجية.

المراجع:

1. Stark, J. (1914**). Observation of the separation of spectral lines by an electric field**. Annalen der Physik, 348(4), 965-982.
2. Bethe, H. A., & Salpeter, E. E. (1957). **Quantum mechanics of one- and two-electron atoms. Springer.**
3. Zimmerman, M. L., Littman, M. G., Kash, M. M. & Kleppner, D. (1979). **Stark structure of the Rydberg states of alkali-metal atoms**. Physical Review A, 20(6), 2251.
4. Sakurai, J. J., & **Napolitano, J. (2017). Modern quantum mechanics. Cambridge University Press**.
5. Gallagher, T. F. (1994). **Rydberg atoms. Cambridge University Press.**
6. Lorentz, H. A. (1895). Versuch einer .**Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Bodies.** E. J. Brill in Leiden.