

حساب ثابت ريد برج من خلال دراسة الأطياف الذرية باستخدام محزوزة الحيود

أ. حدهم عمر علي حسن

جامعة طرابلس , كلية التربية جنزور - قسم الفيزياء طرابلس ، ليبيا

E-mail aliamarmohamed1986@gmail.com

Abstract

This paper is devoted to the theoretical and practical study of the Reedberg constant calculation using the emission spectrum of the hydrogen atom in the visible light area (the largest wavelengths in the Palmer series) four lines of which are red , blue , blue green and violet, in the range of 656.3 - 410.2 nm . The laboratory study was performed using a spectrometer where the parallel optical beam was dispersed to its set of wavelengths in the form of several interference levels on either side of the zero scale. The study of the hydrogen atom spectrum was chosen because it is considered the simplest known spectra of elements. In this study, the emission spectrum of mercury atoms was also used to obtain the diffraction constant used in the study $d = 1.666 \mu m$. The theoretical study was based on Bohr's theoretical propositions and mathematical analysis. Thus, the median value of the Reedberg theorem was calculated theoretically $R_H = 1.0974 \times 10^7 m^{-1}$ and experimentally $R_H = 1.081 \times 10^7 m^{-1}$. The convergence of values proves that the Bohr theory proposals were true especially with the hydrogen atom.

الخلاصة

هذه الورقة مخصصة للدراسة النظرية والعملية لحساب ثابت ريدبرج باستخدام طيف الانبعاث لذرة الهيدروجين في منطقة الضوء المرئي (الأطوال الموجية الأكبر في سلسلة بالمر) وهي أربعة خطوط منها اللون الأحمر، الأزرق، الأزرق المخضر والبنفسجي تمتد في النطاق 656.3 - 410.2 نانومتر (nm). تمت الدراسة المعملية باستخدام المطياف حيث تنشبت الحزمة الضوئية المتوازية إلى مجموعة الأطوال الموجية المكونة لها على هيئة عدة رتب للتداخل على جانبي الرتبة صفر، وقد تم اختيار دراسة طيف ذرة الهيدروجين ، لأنه يعد أبسط أطياف العناصر المعروفة. وقد استخدم في هذه الدراسة طيف الانبعاث من ذرات الزئبق أيضاً وذلك للحصول على ثابت محزوزة الحيود المستخدمة في الدراسة بالطريقتين على التوالي $d = 1.666 \mu m$ ، $d=1.7 \mu m$. اعتمدت الدراسة النظرية على مقترحات نظرية بوهر والتحليل الرياضي لها وبناءً عليه تم حساب القيمة المتوسطة لثابت ريدبرج نظرياً $R_H = 1.0974 \times 10^7 m^{-1}$ وتجريبياً $R_H = 1.081 \times 10^7 m^{-1}$ ، $R_H = 0.99 \times 10^7 m^{-1}$. تقارب القيم يبرهن على أن مقترحات نظرية بوهر كانت صحيحة خاصة مع ذرة الهيدروجين.

الكلمات المفتاحية: الأطياف الذرية ، سلسلة بالمر، محزوزة الحيود، مقياس الطيف الضوئي ، طيف الهيدروجين الذري ، ثابت ريدبرج .

1. المقدمة .

تتكون القشرة الأرضية والغلاف الجوي من مجموعة عناصر كيميائية تختلف في نسبة وجودها وكذلك في كثافتها وعدد البروتونات والإلكترونات المكونة لذراتها، وعلى الرغم من ذلك يمكن تقسيمها إلى مجموعات محددة تتشابه كل مجموعة في سلوكها الكيميائي، وقد تنبه لذلك ديمتري مندلييف حين سجل كل العناصر الكيميائية المعروفة سنة (1869م) في جدول طبقاً لكتلة ذراتها وخصائصها الكيميائية^[1] . من ناحية أخرى يمكن أن تتشابه بعض هذه العناصر في خصائصها الفيزيائية، ولكن لكل عنصر بصمته الخاصة التي لا يمكن أن تتشابه مع العناصر الأخرى ، ألا وهي خطوط طيف الانبعاث المنطلقة من ذرات العناصر بعد إثارتها بإحدى الطرق المعروفة وغيرها ، لقد مثلت آلية انبعاث الضوء من المادة مشكلة كبيرة لم يستطع أحد حلها إلا بعد التخلي عن مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية بشأن الطاقة وظهور مقترحات متعددة نتيجة للتطور العلمي لحل مفهوم الذرة ، التي كان أنضجها مقترحات نيلز بوهر لبناء نموذج ذرة الهيدروجين في محاولة جادة لتفسير انطلاق الضوء على هيئة أطوال موجية منفصلة حتى من أبسط الذرات (ذرة الهيدروجين) ، وقد ظهر نموذج بوهر عام 1913م وأضيف إليه بعض التحسينات على مدار عدة سنوات تالية^[2,3] . ما يميز هذا النموذج ليس فقط توقعاته الصائبة لخطوط طيف الهيدروجين نظرياً ولكن أيضاً تحديد صيغة رياضية لثابت ريدبرج وهذه

الصيغة استنتجها رايدبرج تجريبياً دون الإثبات الرياضي ، تمكن بوهر فيما بعد من إثباتها، حيث أستخدم في نموذج الفيزياء الكلاسيكية والكمية معاً . وأظهر التحليل الرياضي أن ثابت رايدبرج يعتمد على مجموعة من الثوابت الفيزيائية وكذلك الكتلة المختزلة للإلكترون بما يؤكد أن قيمة ثابت رايدبرج تقع ضمن نطاق محدد من القيم وليست قيمة واحدة لكل العناصر، ويظهر ذلك جلياً مع نظائر الهيدروجين الثلاثة.

منذ أن تم تحديد قيمة ثابت رايدبرج لأول مرة (1890)^[4] ، قُدمت العديد من المقترحات لإعادة تقييم هذا الثابت بعدة طرق مختلفة^[5-7] ، أعتد كثير منها على تحليل طيف الانبعاث والامتصاص للهيدروجين باعتباره أبسط الأنظمة الذرية حيث يمكن تحليل الضوء المرئي بعدة طرق منها المنشور ومحزوزة الحيود الانعكاسية أو الانكسارية، و حديثاً أُجريت قياسات حول الأطوال الموجية في سلسلة بالمر لتحديد ثابت رايدبرج باستخدام تقنيتين مختلفتين تعتمدان على أجهزة تحليل طيفي تعليمي من إنتاج شركة باسكو: الأولى بصرية والأخرى تعتمد على استخدام برامج الكمبيوتر^[8] ، وفي هذه الدراسة قمت بتحديد قيمة ثابت رايدبرج عملياً باستخدام المطياف مع الاستعانة بمحزوزة الحيود النافذة. ولتعيين ثابت المحزوزة عملياً استخدمت طيف الزئبق مع نفس الجهاز، استخدمت في الدراسة محزوزة حيود بها 600 خط في كل ميللي متر وبالتالي فإن السُمك النظري للخط الواحد نانومتر $d = 1666$. وللتأكد من قيمة d استخدم الضوء الصادر من مصباح الصوديوم خط الصوديوم المزدوج $D_1 = 589.59$ ، $D_2 = 588.99$ nm لمعايرة محزوزة الحيود في كل من الطريقتين المستخدمتين^[8]، أُجريت الدراسة لخطوط طيف الهيدروجين باستخدام جهاز تحليل الطيف مخصص لمعمل الطلاب، "إنتاج شركة باسكو"، واستخدم في الطريقة الثانية برنامج Data Studio لتجميع وتحليل البيانات وعرض الرسوم البيانية لخطوط طيف الصوديوم والهيدروجين مباشرة ، وتم حساب قيمة d كمتوسط لخمس محاولات (نانومتر $d = 1671.2$) وباعتبار أنها قيمة تجريبية فقد اعتمدت عند حساب الأطوال الموجية، ولضمان دقة قيم زوايا الحيود استخدم حساس حركة دوار rotary motion sensor بتقسيمات بلغت 1440 تقسيمة للدورة. في حين بلغت حساسية حساس الضوء بلغت حساسيته $X100$ وأظهرت الدراسة أن ثلاثة خطوط في سلسلة بالمر $(B_\alpha, B_\beta, B\gamma)$ من طيف الهيدروجين تم رصدهم بواسطة محلل الطيف البصري في حين تبين أن الخط الرابع في السلسلة ذو الطول الموجي 410 نانومتر لم تكن شدة إضاءته كافية لرصده ، وبواسطة مقياس محلل الطيف spectrophotometer لم يتم رصد سوى خطين B_α, B_β حتى مع حساس الضوء عند أعلى حساسية $X100$. وكانت قيمة ثابت رايدبرج المستنتجة بواسطة التقنيتين كانتا تقريباً متساوية $(R_H = 1.09928 \times 10^7 m^{-1}$ و $R_H = 1.09513 \times 10^7 m^{-1}$). بالمقارنة مع القيمة المتفق عليها $R_H = 1.097373 \times 10^7 m^{-1}$ يقع الفرق في نطاق الخطأ التجريبي حيث كانت النسبة المئوية للخطأ في قيمة R المحددة بواسطة محلل الطيف البصري والمزود ببرنامج الكمبيوتر 0.17% و 0.20% على التوالي^[8].

وأظهرت دراسة حديثة أخرى إمكانية تحديد قيمة ثابت رايدبرج عن طريق قياسات الأطوال الموجية في سلسلة بالمر من طيف الهيدروجين بواسطة محلل طيفي منخفض التكلفة يعتمد على استخدام إمّا محزوزة الحيود الانكسارية أو الانعكاسية مرتبطة مع كاميرا رقمية تجارية ، القيمة المستنتجة بواسطة محلل الطيف المستخدم لمحزوزة الحيود النافذة transmission grating كانت $R = 1.096 \pm 0.007 \times 10^7 m^{-1}$ بينما المستنتجة بواسطة محزوزة الحيود الانعكاسية كانت $R_H = 1.094 \pm 0.005 \times 10^7 m^{-1}$ مما يدل على أن الفرق أقل من 0.30% عند المقارنة بالقيمة المقبولة $R_H = 1.097373 \times 10^7 m^{-1}$ ^[9].

والغاية من هذه الدراسة هي التعرف على كيفية استخدام المطياف وسهولة مشاهدة هذه الخطوط ولوحظ لكل عنصر طيف خاص به يميزه عن غيره مثل بصمة الانسان ، دراسة طيف مصباح الزئبق والهيدروجين باستخدام محزوزة الحيود ، حساب الطول الموجي لكل خط ، إيجاد ثابت المحزوزة d وتعيين قيمة ثابت رايدبرج R_H

2. النظرية .

يلاحظ أن الطاقة الكلية للإلكترون تأخذ قيمة محددة فقط بشكل قفزات(كمات) تبعاً لقيمة العدد الكمي الرئيسي n وللحصول على مستويات الطاقة بالتعويض عن القيم في المعادلة $n = 1$ ، $Z = 1$ والثوابت الفيزيائية الأخرى نجد أن طاقة المستوى الأول $E_1 = -13.6eV$ وكذلك طاقة المستوى المتهيج الأول E_2 عند $n = 2$ هي $E_2 = -3.4 eV$ وهكذا لباقي المستويات المتهيجة الأخرى $n > 1$ ، فإذا انتقل الإلكترون من الحالة E_1 إلى الحالة E_2 يمتص الضوء ولا يمكن أن ينبعث أو يمتص الضوء إلا إذا قفز الإلكترون من مدار إلى مدار آخر فيكون تردده الإشعاع الصادر ν هو

$$\nu = \frac{E_1 - E_2}{h} = \frac{me^4 Z^2 k^2}{4\pi\hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

ويعرف العدد الموجي $\frac{1}{\lambda}$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{me^4 Z^2 k^2}{4\pi c h^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad ; m > n$$

حيث $c = \lambda \nu$ وثابت ريدبرج R_H هو

$$R_H = \frac{me^4 Z^2 k^2}{4\pi c h^3} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad ; m > n \quad (2)$$

حيث e كتلة الإلكترون ، Z العدد الذري ، k ثابت كولوم ، c سرعة الضوء .

انتقال الذرات من جميع الحالات المثارة $m > 2$ إلى $n = 2$ تنتج متسلسلة بالمر المنظورة وهناك سلاسل أخرى لخطوط طيف الهيدروجين تم اكتشافها بعد بوهر، وعند عودة الإلكترون من جميع إلى الحالات المثارة إلى $n = 1$ تنتج سلسلة ليمان وهكذا كما هو مدرج تفاصيلها بالجدول [11,10] (1)

جدول (1) يوضح السلاسل لخطوط طيف ذرة الهيدروجين

اسم السلسلة	n	m	العدد الموجي للسلاسل الطيفية	منطقة الطيف
ليمان	1	>1	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2} \right)$	فوق البنفسجية
بالمر	2	>2	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right)$	المنظور
باشن	3	>3	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2} \right)$	تحت الحمراء
براكيت	4	>4	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{m^2} \right)$	تحت الحمراء
فوند	5	>5	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{m^2} \right)$	تحت الحمراء

أضينت محزوزة الحيود باستخدام حزمة من الأشعة المتوازية الساقطة عمودياً على سطح محزوزه هذه الموجات الخارجة من المحزوزة ستقطع مسافات مختلفة وينتج أن فرق المسار Δ من الموجات المتعاقبة تعطي بالعلاقة $\Delta = d \sin \theta$ حيث d (ثابت المحزوزة) . ويحدث التداخل البناء بين هذه الموجات إذا كانت صدورها متفقة في الطور أو كان فرق المسار بينهما مساوياً عدداً صحيحاً من الأطوال الموجية أو مساوياً للصفر ولهذا يتحقق شرط التداخل البناء عندما $\Delta = n\lambda$ حيث $n = 0, 1, 2, \dots$ وتمثل رتب الطيف وبالتالي فإن معادلة المحزوزة Grating Equation تعطي بالعلاقة التالية^[12]

$$n\lambda = d \sin \theta \quad (3)$$

حيث أخذنا قراءات الرتبة الأولى للألوان الطيفية $n = 1$

3- التجربة .

في هذه الدراسة تم استخدام كلاً من مطياف ، محزوزة حيود (600 Lines/mm) ، مصباح زئبق ، مصباح الهيدروجين ، منضدة لترتيب الأدوات ، مصدر لتوليد الجهد العالي ، حامل المحزوز شكل (1) .

1- نثبت مصباح الزئبق على بعد قريب من شق المجمع بحيث يكون مستوى المصباح على مستوى المطياف نفسه .

2- نهيئ المطياف للعمل كما هو معروف ، ثم نضع محزوزة الحيود في مركز قاعدة مقياس الزوايا وبشكل عمودي عليها ، ثم نحرك التلسكوب

إلى اليمين سنشاهد خطوطاً ملونة ونلاحظ هذه الخطوط تتكرر كلما تحرك التلسكوب لليمين $n > 1$

3- نحرك التلسكوب لليسا نلاحظ خطوطاً طيفية مناظرة للخطوط عند تحريكه لليمين .

4- نجعل الخط البنفسجي إلى اليمين للرتبة الأولى $n = 1$ ينطبق مع السلكين المتعامدين وذلك نحصل عليه بتحريك التلسكوب ونسجل زاوية لليمين θ_R ونحرك التلسكوب لليسار ونسجل زاوية الخط الطيفي نفسه (اللون البنفسجي) θ_L لنفس الرتبة تم نحسب زاوية حيود المقابلة للون البنفسجي من العلاقة $\theta = \frac{\theta_R - \theta_L}{2}$ ونكرر الخطوات بالنسبة للألوان الأخرى التي يمكن مشاهدتها .

5- نضع النتائج في جدول (2) وبمعلومية الأطوال الموجية للزئبق وهي الأصفر 758 nm ، الأخضر 546 nm ، والبنفسجي 436 nm يتم حساب ثابت المحزوزة من المعادلة (3) لكل لون ثم نحسب المتوسط.

6- بعد إطفاء مصدر الجهد العالي نستبدل أنبوبة الزئبق بأنبوبة الهيدروجين نكرر الخطوات 1-4 سوف نتحصل على أربعة خطوط وهي بنفسجي ، أزرق ، أخضر وأصفر ، نحقق معادلة بالمر (2) وباستخدام قيمة ثابت المحزوزة المحسوبة سابقاً نحسب الطول الموجي لكل من الأربع خطوط الهيدروجين وهي H_α ، H_β ، H_γ ، H_σ وندون النتائج في جدول (3).

7- نحسب قيمة ثابت رايدبرج من العلاقة (2) ومن ثم نوجد المتوسط من الجدول (3).

8- نرسم العلاقة البيانية بين $\frac{1}{m^2}$ على محور الأفقي و $\frac{1}{\lambda}$ على محور الرأسى للبيانات في الجدول (3) ، نحسب الميل فيكون هو قيمة ثابت رايدبرج^[11]

[13]

وفي حالة تعذر توفر جهاز المطياف في المعمل يمكن أتباع الخطوات التالية :

1- نضع محزوزة الحيود أمام مصباح الزئبق ونثبت شاشة خلف المصباح على أن تكون المسافة بين الشاشة والمحزوزة $d = 50 \text{ cm}$

2- يتم مشاهدة صور الخطوط على الشاشة من خلال النظر من المحزوزة ونسجل 2L للألوان الطيفية المشاهدة ونحسب ثابت المحزوزة g من خلال العلاقة (3)

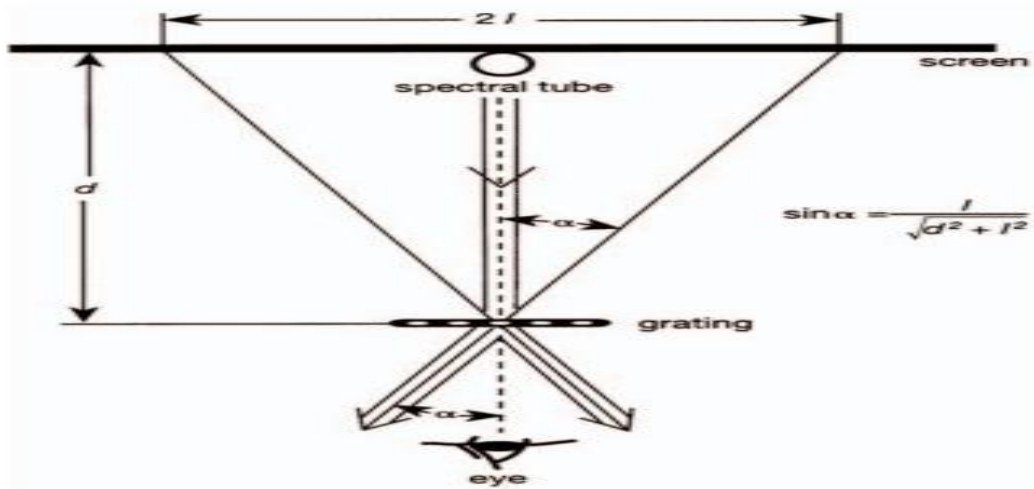
$$g \frac{L}{\sqrt{d^2 + L^2}} = n\lambda$$

3- نكرر الخطوات السابقة مع استبداله بمصباح الهيدروجين بدلاً من مصباح الزئبق ووضع الشاشة على بعد 45cm من المحزوزة نسجل

2L لكل لون وباستخدام ثابت المحزوزة من الجدول (4) نحسب الطول الموجي من العلاقة (3) ثم نوجد ثابت رايدبرج من العلاقة (2)^[11]



الشكل (1) يوضح الأدوات المستخدمة في هذه التجربة



شكل (2) يوضح الرسم التخطيطي للطريقة الثانية

4. النتائج والمناقشة:

في هذه الدراسة تم الحصول على ثابت محزوزة الحيود وتعيين قيمة ثابت رايدبرج من الحسابات بطريقتين: الأولى بالاستعانة بالمطياف و المحزوزة والثانية باستخدام الشاشة و المحزوزة. باستخدام ثلاثة أطوال موجية (البنفسجي ، الأخضر والأصفر) في طيف الانبعاث للزئبق كما وردت بالجدول (2) ثم حساب قيمة ثابت محزوزة الحيود وإيجاد القيمة المتوسطة لها $1.68 \mu m$. من ناحية أخرى وباستخدام ثلاثة أطوال موجية (الأحمر ، الأزرق المخضر والبنفسجي) من طيف الهيدروجين، تم حساب قيمة ثابت رايدبرج من ظهور قياسات زاوية الحيود لبعض الخطوط ومن ثم حساب القيمة المتوسطة وهي $1.081 \times 10^7 m^{-1}$. على الرغم من التدرج في الزيادة الطفيفة في قيمة ثابت رايدبرج مع تناقص الطول الموجي فإن هذا لا يعني اعتمادها على الطول الموجي ولكن تعتمد على مجموعة من الثوابت الفيزيائية ومنها كتلة الإلكترون المعادلة (1). ويؤدي هذا التغير الطفيف إلى الخطأ التجريبي الذي يقع ضمن نطاق الخطأ الإحصائي المقبول حيث كانت النسبة المئوية للخطأ في قيمة R_H المحسوبة بواسطة محلل الأطياف 1.4% .

بتحديد العلاقة بين العدد الموجي (مقلوب الطول الموجي) ومقلوب مربع رقم مستوى الطاقة ، وُجد أن العلاقة خطية كما يتضح من الشكل رقم (3) ومن ميل الخط المستقيم نحصل على قيمة ثابت رايدبرج $1.0974 \times 10^7 m^{-1}$. وهي أقرب ما يكون للقيمة المثالية المتعارف عليها. لقد تم الاعتماد على طيف الرتبة الأولى فقط وذلك لتعذر الحصول على الخطوط من الرتبة الثانية بسبب عدد الخطوط في وحدة الأطوال للمحزوزة ومن المتوقع إمكانية رصد الرتبة الثانية بوضوح عند زيادة هذا العدد أي تناقص قيمة ثابت المحزوزة . لأن هذا قد يعطي نتيجة تقريبية تُحسن من الفرق بين النتيجة التجريبية لثابت رايدبرج والقيمة النظرية ، و لضمان الابتعاد عن الخطأ التجريبي، أو تقليل أثره على النتائج ، يجب أن تكون المحزوزة عمودية تماماً على شعاع الضوء الساقط عليها ، هذا يتطلب أن تكون متوازية مع فتحة مصدر الضوء وعدسات المجمع والتلسكوب ويحدث ذلك عند رصد الرتبة صفر من الطيف.

من خلال نتائج هذا العمل التجريبي يتضح أن الطريقتين المتبعين تعطى وسيلة جيدة من حيث الدقة لقياس الأطوال الموجية لخطوط الطيف في نطاق الضوء المرئي ، مع التنويه إلى أن العين البشرية ليست حساسة بشكل متساوٍ لكل أطوال موجات الضوء المرئي [8]. عند استعمالنا لمطياف مقياس الزواياحيث يسمح جهاز مقياس باسكو الضوئي لطلاب الفيزياء والمعلمين من إجراء هذه التجارب بكل سهولة وبأقل مجهود تم مشاهدة الطول الموجي لسلسلة بالمر وقياسه لعدد محدد من خطوط الطيف التي ينتجها مصدر الضوء المستخدم ، وتقدير قيمة ثابت رايدبرج بالرغم من الفرق الكبير بين الدراسة الحالية والدراسات السابقة في نوع المعدات المستخدمة وتكلفتها، إلا أن نتائج ثابت رايدبرج كانت متقاربة إلى حدٍ مع الدراسات الأخرى ، ويتوافق مع القيمة المعروفة التي تنبأت بها ميكانيكا الكم .

جدول (2) تعيين ثابت المحزوز باستخدام مصباح الزئبق

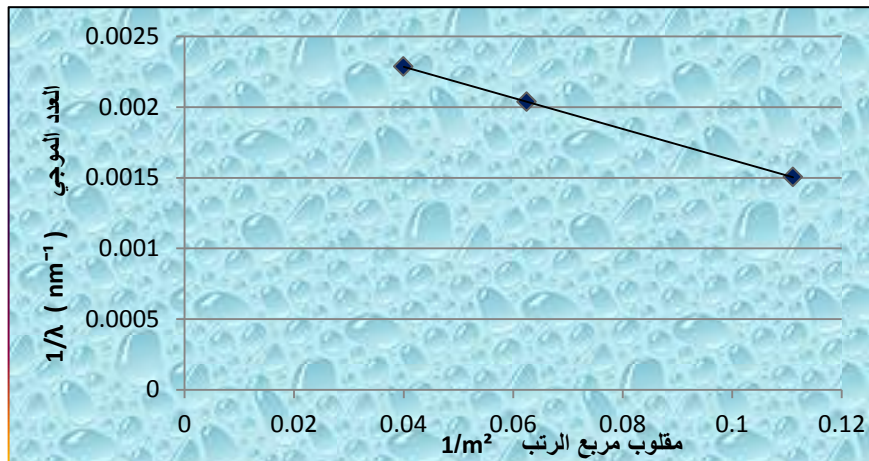
الأصفر	الأخضر	بنفسجي	اللون
578	546	436	الطول الموجي λ (nm)
198.4	197.1	193.1	قراءة التلسكوب θ_R°
158	159.3	163.1	قراءة التلسكوب θ_L°
20.2	18.9	15	زاوية الحيود $\theta^\circ = \frac{R\theta - \theta_L}{2}$
1.67	1.68	1.68	ثابت المحزوزة (μm)

average $d = 1.68 \mu m$

جدول (3) تعيين ثابت رايدبرج باستخدام مصباح الهيدروجين

بنفسجي	الأزرق المخضر	الأحمر	اللون
206.1	208	214	قراءة التلسكوب θ_R°
175.6	173.6	167.4	قراءة التلسكوب θ_L°
15.25	17.2	23.3	زاوية الحيود $\theta^\circ = \frac{\theta_R - \theta_L}{2}$
441.8	491.1	664.5	الطول الموجي λ (nm)
1.077	1.085	1.083	ثابت رايدبرج ($10^7 m^{-1}$) R_H
0.04	0.0625	0.1111	$\frac{1}{m^2}$
0.0022	0.0020	0.0015	$\frac{1}{\lambda} (nm^{-1})$

average $R_H = 1.081 \times 10^7 m^{-1}$



شكل (3) يوضح العلاقة الخطية بين مقلوب مربع الرتب والعدد الموجي

من الرسم نجد أن الميل هو

$$R_H = \frac{(0.0002285192 - 0.001504891) \times 10^9}{0.1111 - 0.04} = 1.0974 \times 10^7 m^{-1}$$

جدول (4) تعيين ثابت المحزوز من الأطوال الموجية لطيف الزيتيق

اللون	الأصفر	الأخضر	الأزرق
2L (mm)	365	335	260
الطول الموجي λ (nm)	578	546.1	434.8
ثابت المحزوز d (μm)	1.68	1.71	1.72

$$\text{average } d = 1.7 \mu\text{m}$$

جدول (5) تعيين ثابت رايدبرج لطيف الهيدروجين (سلسلة بالمر)

اللون	الأحمر	الأصفر	الأزرق	البنفسجي
الخط	H_α	H_β	H_γ	H_σ
2L (mm)	380	330	275	242
الطول الموجي λ (nm)	666.1	585.2	496.7	441.4
ثابت رايدبرج R_H (10^7 m^{-1})	1.08	0.91	0.95	1.01

$$\text{average } R_H = 0.99 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

المراجع :

- [1]- John ,W. Moore, Conrad L. Stanitski, Peter C. Jurs. Principles of Chemistry - The Molecular Science, Chapter 2 atoms and elements , Brooks /Cole, Cengage Learning (2010) p 55.
- [2]- Rm Eisberg . R, Resnick. Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles. Ch. 4: Bohr's Model of The Atom, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. (1985).
- [3]- C , Baily." Early atomic models – from mechanical to quantum (1904 –1913)". Eur. Phys. J. H Vol. 38. (2013) p1–38
- [4]-Erik Gregersen. "The Britannica Guide to the Atom, Physics Explained series" Britannica Encyclopedia, Inc. (2011) p. 20.
- [5]-R, Serway. C, Moses and C, Moyer." Modern Physics" Ch. 4: The Particle Nature of Matter. 3rd ed. Thomson Learning, Inc. (2005).
- [6]-P, Tipler and R , A , Llewellyn. Modern Physics. Ch.4: The Nuclear Atom . 6th ed . Freeman and company (2012) pp 163–4.
- [7]-Peter , J, Nolan . Fundamentals of modern Physics. Ch. 4: Atomic Physics. First ed. Physics Curriculum & Instruction, Inc. (2014).
- [8]-D, Amrani." Hydrogen Balmer series measurements and determination of Rydberg's constant using two different spectrometers". Eur. J. Phys. 35. (2014). 045001. pp12.
- [9]-P, Onorato. M , Malgieri and A , De , Ambrosio." Measuring the hydrogen Balmer series and Rydberg's constant with a homemade spectrophotometer ". Eur. J. Phys. 36. (2015). 058001. (p8)
- [10] فخري اسماعيل حسن ، مقدمة في الفيزياء الحديثة ، دار نوبار للطباعة ، (1997 م) .

- [11] كريمة محمد الشريف ، يوسف ميلود حسن ، فرج جمعة المزوغي ، محبوبة محمد لياس ، تجارب في الفيزياء المتقدمة الجزء الثاني ، منشورات جامعة الفاتح ، دار الكتاب الجديد المتحدة ، (2005 م) .
- [12] محمد شحادة الدغمة، محمد عبد الكريم، الفيزياء الأساسية الجزء الثاني، مكتبة الفلاح، (2000 م)
- [13] محمد سالم اللبد ، الفيزياء التجريبية ، مكتبة مصر، (1999 م) .