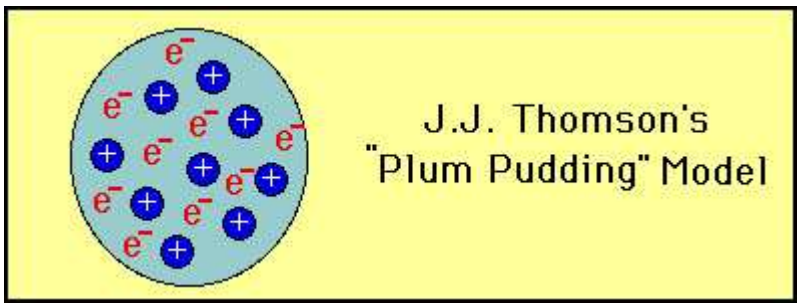
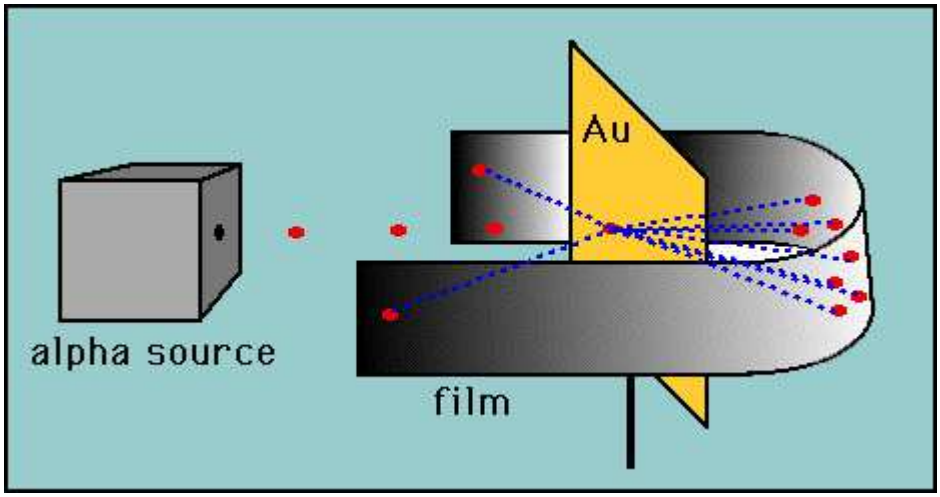
النظرية الذرية

I- نموذج رذرفورد (*Rutherford*)

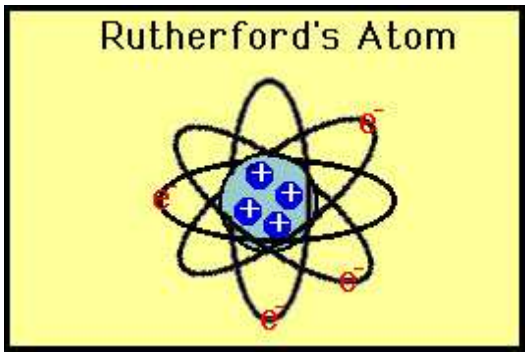
بحلول العام ١٩١١ كانت مكوّنات الذرات من بروتونات والكترونات قد أصبحت معروفة إلاّ أنّ تركيب الذرة كان لا زال مجهولاً. وقد اقترح تومسون (*Thomson*) النموذج التالي لتوزيع البروتونات والالكترونات في الذرة:

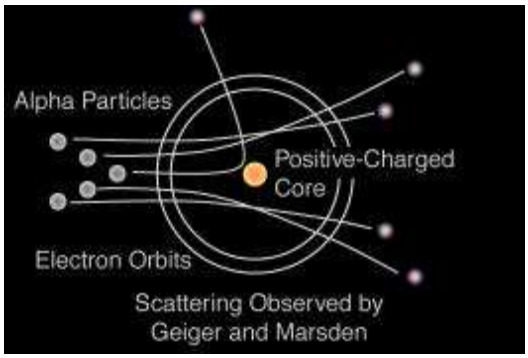


في محاولة منه للتأكد من صحة نموذج تومسون قام العالم رذرفورد بإجراء تجربة تتضمّن قذف صفيحة رقيقة من الذهب بجسيمات ألفا -particles (وهي جسيمات ثقيلة تعادل أنوية ذرات الهيليوم). لاحظ رذرفورد أن معظم جزيئات ألفا الموجهة إلى صفيحة الذهب تخترقها دون أن يحدث لها أي تغيير في اتّجاهها باستثناء جزء بسيط من جسيمات ألفا يرتدّ إلى الخلف وبزوايا كبيرة نسبيّاً.

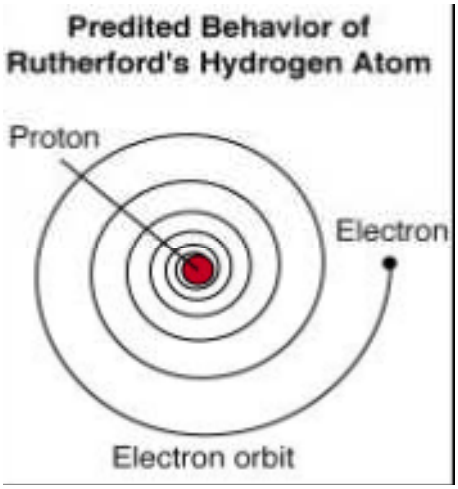


لم تكن هذه النتائج متفقةً مع نموذج تومسون والذي يقتضي توزيعاً متساوياً للكتلة في داخل الذرة. فجسيمات ألفا التي اخترقت الصفيحة لا شكّ بأنها اصطدمت بأجسام خفيفة جدّاً لم تؤثّر على مسارها (كأن تصطدم سيارة مسرعة بزجاجة ماء مثلاً)، أمّا العدد البسيط من الجسيمات والذي ارتد إلى الخلف فلا شكّ أنّه اصطدم بجسيمات ثقيلة كما أنّ زوايا الارتداد تشير إلى أنّها مشحونة شحنةً موجبة تشبه شحنة جسيمات ألفا. استنبط رذرفورد أنّ الجسيمات السالبة الخفيفة (الالكترونات) تشغل معظم حيّز الذرات وأنّ الجسيمات الموجبة الثقيلة (البروتونات) لا تشكّل إلاّ جزءاً يسيراً من هذا الحيز. يعرف هذا النموذج أيضاً بالنموذج الكوكبي (*planetary model*) حيث أنّ حركة الالكترونات حول البروتونات (النواة) تشبه حركة الكوكب حول الشمس.





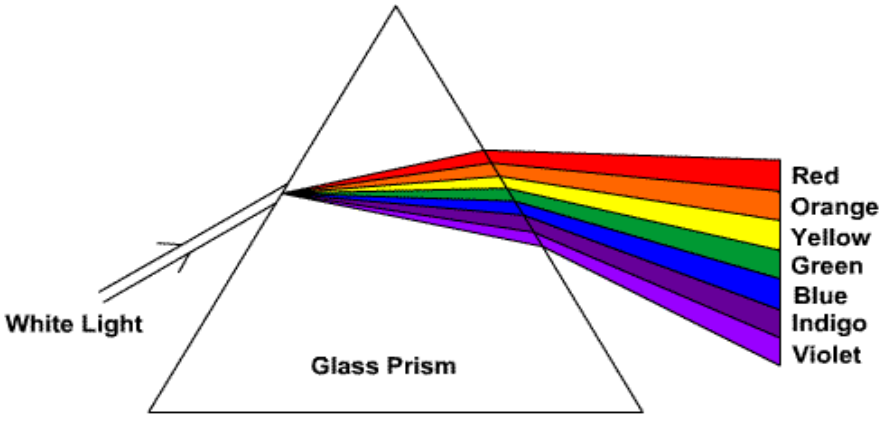
المشكلة في نموذج رذرفورد من وجهة نظر الفيزياء التقليدية هي أنّ الالكترونات عندما تقوم بحركة دائرية فإنه يفترض فيها أن تصدر أشعة كهرومغناطيسية، ذلك أنّ الحركة الدائرية هي حركة اهتزازية مُعجَّلة أو متسارعة (*accelerated motion*) ومن المعروف عمليّاً أنّه عندما تقوم الشحنات بحركة معجلة فإنّها تبعث أشعة (هذا هو مبدأ عمل المرسل في جهاز الراديو والذي يقوم بإرسال أشعة راديو إلى الجو، وهذه الظاهرة هي التي استخدمها هرتس *Hertz* في تكوين موجات كهرومغناطيسية ومن ثَمّ رصدها). ولكن إذا كانت الالكترونات تبعث أشعّة كهرومغناطيسية –وهي شكل من أشكال الطاقة- فإنّ قانون حفظ الطاقة يحتّم أن تنخفض طاقة الالكترون تدريجياً فيقترب بذلك أكثر فأكثر من البروتونات حتى يلتحم معها وتنهار بذلك الذرات وتختفي.



وقعت الفيزياء التقليدية مرّةً أخرى في مأزق حرج، فقوانينها تدلّ على عدم استقرار ذرة رذرفورد وبالتالي عدم إمكانية وجودها، في حين أنّ التجربة تؤكّد صحة النموذج. ما العمل؟ قدّم العالم بور (*Bohr*) نظرية تفسّر استقرار ذرة رذرفورد، ولكن مرّة أخرى، كانت نظريته خارج أطر الفيزياء التقليدية.

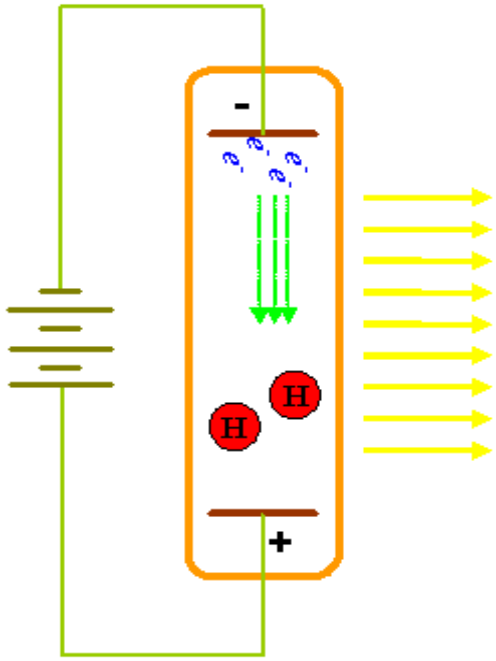
II- الطيف الخطّيّ (*Line Spectrum*)

قبل الانتقال إلى نظرية بور لا بدّ لنا من التعريج على ظاهرة الطيف الخطّيّ الذي كان معروفاً منذ نهاية القرن التاسع عشر ولكن لم يكن له تفسير مقبول.

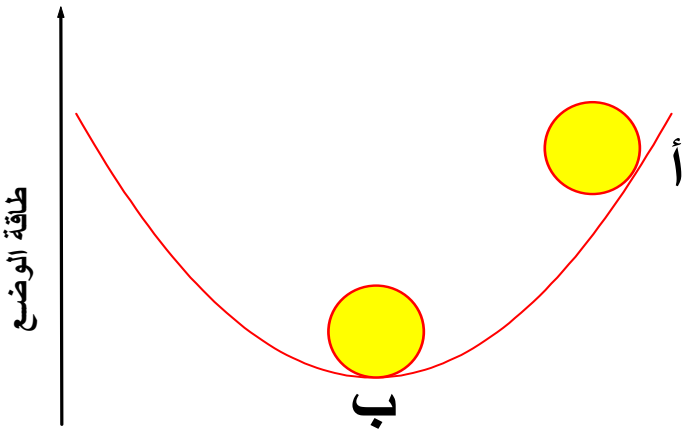


عند تسليط ضوء أبيض على محلّل (منشور زجاجي مثلاً) فإنّ الأمواج الضوئية المختلفة المكونة للضوء الأبيض سوف تنكسر بزوايا مختلفة بناءً على طولها الموجي ممّا يجعلها تبتعد عن بعضها فتظهر ألوانها للعين (ظاهرة قوس قزح). يسمّى الطيف الناتج بـ "الطيف المتّصل" وذلك لاحتوائه على جميع الأطوال الموجية الممكنة، فمصدر الضوء الأبيض (الشمس

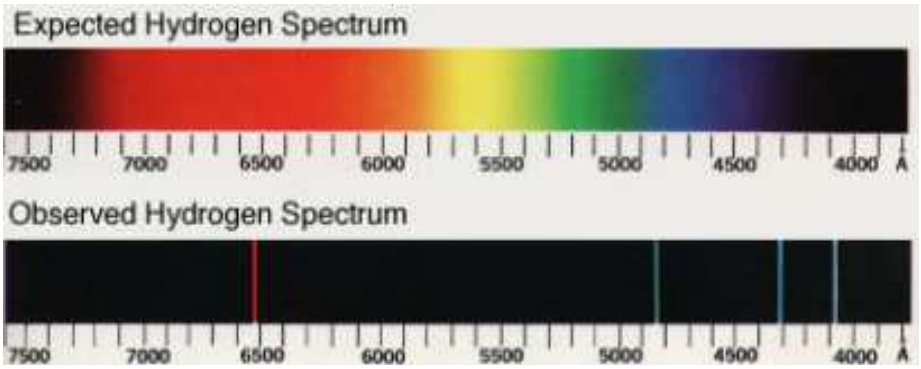
مثلاً) ما هو إلاّ جسم أسود يبعث أشعة بشتّى الأطوال. لكن ماذا يحدث إذا وضعنا لمبة هيدروجين بدلاً من مصدر الضوء الأبيض؟



لمبة الهيدروجين هي في حقيقة الأمر مجرّد أنبوب تفريغ مليء بغاز الهيدروجين، وعند وضع فرق جهد عالٍ (*3-10* ***kV***) بين القطبين فإن الإلكترونات تنفلت من القطب السالب (*cathode*) وتتجه متسارعة نحو القطب الموجب (*anode*) حيث تصطدم في طريقها بجزيئات الهيدروجين فتحوّلها إلى ذرات مثارة (*excited*)، أي ذرات بطاقات عالية أعلى من حالة الاستقرار (حين يكون الالكترون في فلك ***1s***). لا تلبث ذرّات الهيدروجين المثارة أن تفقد الطاقة التي اكتسبتها عند اصطدامها بالإلكترونات وترجع إلى حالة الاستقرار حيث تكون طاقتها أقل ما يمكن، تماماً كما تفعل الكرة "المثارة" في الموقع أ بانتقالها إلى حالة الاستقرار في الموقع ب.



برجوع ذرات الهيدروجين المثارة إلى حالة الاستقرار ينبعث فرق الطاقة بين الحالة المثارة وحالة الاستقرار على شكل أشعّة. يمكننا الآن تحليل هذه الأشعة بواسطة تمريرها خلال المنشور الزجاجي أعلاه ورصد الطيف الناتج على شاشة أو فيلم مثلاً.



ما نتوقّع أن نراه هو طيف متّصل، فحسب الفيزياء التقليدية، تستطيع ذرّة الهيدروجين أن تمتلك في حالة الإثارة أيّة قيمة من قيم الطاقة (انظر الرسم في الصفحة الثامنة، يمين)، وعليه فإنّه يفترض حال رجوعها إلى حالة الاستقرار أن تبعث كلّ الأطوال الموجية الممكنة. إلاّ أنّ المشاهَد هو طيف خطّي، بمعنى أنّ ما نحصل عليه هو عدد يسير جدّاً من الموجات بأطوال موجية محدّدة (أربعة أمواج فقط ضمن الأشعة المرئية)، ممّا يشير إلى أنّ هذه الذرّات المثارة لا يسمح لها أن تمتلك أيّة قيمة شاءت من الطاقة!

وجد العلماء أنّ الطيف الخطي لا يقتصر فقط على الأشعة المنبعثة من لمبة الهيدروجين بل يمكن الحصول عليه باستخدام العناصر الأخرى المختلفة، فأية ذرّة مثارة تبعث أمواجاً

بأطوال محدّدة فقط عند رجوعها إلى حالة الاستقرار (الطيف الذرّيّ يشكلٍ عامّ خطيّ وليس متّصلاً). إلاّ أنّ طيف الهيدروجين نال اهتماماً خاصّاً من العلماء في نهاية القرن التاسع عشر الذين عكفوا على محاولة استنباط علاقة بين الأطوال الموجية في طيف الهيدروجين، نذكر منهم ليمان (*Lyman*) وبالمر (*Balmer*) وباشن (*Paschen*). وقد استطاع العالم ريدبرج (*Rydberg*) أن يلخّص جهود من سبقه من العلماء على شكل معادلة تجريبية *empirical equation* (معنى ذلك أنّ هذه المعادلة لم يتم اشتقاقها من أسس نظرية وإنّما وجد بالتجريب أنّها مناسبة لوصف نتائج التجارب):

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$$

حيث أنّ R هو ثابت ريدبرج وقيمته $1.09678\times10^7\ m^{-1}$، n_1 و n_2 هي أعداد صحيحة موجبة.

بالرغم من أنّ معادلة ريدبيرج تصف النتائج التجريبية بدقّة إلاّ أنّه لم يكن مفهوماً من أين جاء هذا الثابت وما معناه كما أنّه لم يكن مفهوماً ما هي هذه الأعداد الصحيحة.

III- نموذج بور (*Bohr*)

وضع بور نموذجاً للذرة يتوافق مع نتائج تجارب رذرفورد وتجارب الطيف الذري واعتمد في هذا النموذج على المسلّمات التالية (المسلّمات هي عبارات لا برهان على صحّتها ولكنّنا "نسلّم" بصحّتها طالما لم يثبت خلافها):

أ) يدور الإلكترون حول النواة بمدارات دائريّة، منجذباً نحو النواة بواسطة قوى التجاذب الكولوميّة التقليدية (قوى التجاذب الإلكتروستاتيكي *Coulombic forces*).

ب) هناك عدد محدّد من المدارات يسمح للالكترون بالتواجد فيها، وعلى ذلك فهناك قيم محدّدة من الطاقة يسمح للإلكترون بامتلاكها حيث أنّ كلّ مدار له طاقة محدّدة.

ت) عند انتقال الإلكترون من مدار إلى آخر فإنّ فرق الطاقة بين المدارين يتمّ امتصاصه أو انبعاثه على شكل موجات كهرومغناطيسية تردّدها هو مقدار فرق الطاقة بين المدارين مقسوماً على ثابت بلانك h.

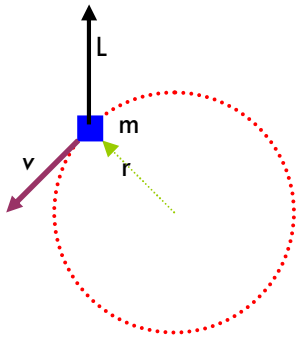
$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{|E_f - E_i|}{h}$$

E_i هي طاقة المدار الابتدائي الذي كان فيه الإلكترون قبل الانتقال و E_f هي طاقة المدار النهائي الذي انتقل إليه الإلكترون.

ث) عزم دوران الإلكترون حول النواة (العزم الزاويّ) هو من مضاعفات $h/2\pi$.

$$L = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$
$$n = 1, 2, 3, \ldots$$

لتوضيح مفهوم العزم الزاويّ، انظر الرسم التالي حيث تدور الكتلة ***m*** في مدار دائري نصف قطره ***r*** وبسرعة ثابتة مقدارها **v**:



العزم الزاويّ ***L*** يساوي $\vec{L} = \vec{r} \times (m\vec{v}) = \vec{r} \times \vec{p}$. وهو قيمة متّجهة متعامدة على متّجهي السرعة ونصف القطر وتنطبق عليها قاعدة اليد اليمنى.

و استناداً إلى النظرية الكمية، فإن الإلكترونات في الذرات تشغل مستويات الطاقة الأدنى ويقال عن الذرات في هذه الحالة بأنها في المستويات الأرضية. فإذا اكتسبت هذه الإلكترونات طاقة من أي مصدر من مصادر الطاقة فإنها تثار وتحتل مستويات طاقة أعلى ويقال حينئذ أن الذرات في الحالة المثارة. والذرات المثارة إلى مستوى طاقة أعلى ليست مستقرة ولذلك ستحاول العودة إلى وضعها السابق وذلك ببعث طاقة . وبناءً على نموذج بور للذرة فإن الإلكترونات تمتلك مدارات محددة حول النواة، فإذا ما أرادت الانتقال من مستوى إلى مستوى آخر فلابد أن تبعث طاقة على شكل فوتونات ضوئية مقدارها يساوي الفرق بين طاقتي المستوى الأعلى n و الأدنى m أي أن

$$E_m - E_n = h\upsilon_{mn}$$

(٥-١)

وبما أن مستويات الطاقة للذرة مكممة فإن انبعاث الفوتونات سيكون على شكل مجموعات منفصلة من الترددات υ_{mn} وليس بشكل مستمر.

فإذا اعتبرنا ذرة الهيدروجين، وحسب نموذج بور، فإن الزخم الزاوي للإلكترون مكمم وأن القيم المسموح بها تعطى بالعلاقة

$$mvr_n = \frac{nh}{2\pi}, \qquad n = 1,2,3,.....$$

(٥-٢)

حيث n العدد الكمي و m كتلة الإلكترون وv سرعة الإلكترون و r_n نصف قطر مدار الإلكترون في المستوى n و h ثابت بلانك.

كما أن القوة الكهربائية التجاذبية بين الإلكترون والبروتون تعطى بقانون كولوم

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r_n^2}$$

(٥-٣)

ونتيجة لدوران الإلكترون حول النواة، تنتج قوة مركزية تعطى بالعلاقة

$$F = \frac{mv^2}{r_n}$$

(٥-٤)

ثم بمساواة القوتين في المعادلتين (٥-٣) و (٥-٤) ينتج لدينا

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r_n^2} = \frac{mv^2}{r_n}$$

(٥-٥)

ومن العلاقتين (٥-٢) و (٥-٥) نجد أن

$$r_n = \varepsilon_0 \frac{n^2 h^2}{\pi m e^2}$$

(٥-٦)

وأيضا

$$v_n = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{e^2}{2nh}$$

(٥-٧)

وتعطى الطاقة الحركية للإلكترون في المدار n بالعلاقة

$$k_n = \frac{1}{2} m v_n^2$$

(٥-٨)

وبالتعويض عن قيمة v_n في المعادلة (٥-٨) بقيمتها من المعادلة (٥-٧)، نحصل على

$$k_n = \frac{1}{\varepsilon_0^2} \frac{me^4}{8n^2 h^2}$$

(٥-٩)

أما طاقة الوضع فتعطى بالعلاقة

$$U_n = -\frac{1}{\varepsilon_0^2} \frac{me^4}{4n^2 h^2}$$

(٥-١٠)

وبالتالي فالطاقة الكلية هي

$$E_n = k_n + U_n = -\frac{1}{\varepsilon_0^2}\frac{me^4}{8n^2h^2}$$

(٥-١١)

لقد تم تعديل العلاقة (٥-١١) بناءً على المشاهدات العملية التي تتحدث عن أن النواة ليست ساكنة بل هي والإلكترون يتحركون حول مركز كتلتهما القريب جداً من النواة بحكم كتلة البروتون الأكبر من الإلكترون. فغذا اخذنا بعين الاعتبار هذه الحقيقة فإن طاقة المستوى n لذرة الهيدروجين، تحت الدراسة، تعطى بالعلاقة

$$E_n = -\frac{\mu e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}\cdot\frac{1}{n^2} = -\frac{R}{n^2}, \qquad n = 1,2,3,.....$$

(٥-١٢)

حيث $\mu = \frac{m_p m_e}{m_p + m_e}$ وتسمى الكتلة المختزلة و m_p, m_e كتلة الإلكترون وكتلة البروتون على الترتيب و e هي الشحنة الأساسية وتساوي $1.6\times10^{-19}C$ و h ثابت بلانك ويساوي $6.626\times10^{-34}Js$ بينما ε_0 سماحية الفراغ وتساوي $8.85\times10^{-12}F/m$ أما R فيعرف بثابت ريدبرج وتعطى قيمته، لذرة الهيدروجين، من المعادلة (٥-١٢)، حيث

$$R = \frac{\mu e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} = 13.6eV$$

(٥-١٣)

فإذا كان الانتقال من المستوى n (الأعلى طاقة) إلى المستوى m (الأدنى طاقة) ففرق الطاقة بين المستويين (الطاقة المنبعثة)، استناداً إلى المعادلة (٥-١)، يعطى كما يلي

$$\Delta E_{nm} = \frac{hc}{\lambda_{nm}} = \frac{\mu e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

(٥-١٤)

وأخيراً فإن الطول الموجي لخطوط طيف الهيدروجين تعطى بمعادلة ريدبرج حيث،

$$\frac{1}{\lambda_{nm}} = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \qquad m = 2, \quad n = 3,4,5$$

(١٥-٥)

وفي هذه الحالة فإن ثابت ريدبرج R يعطى بالعلاقة

$$R = \frac{\mu e^4}{8\varepsilon_0^2 c h^3} = 0.01097 nm^{-1}$$

(١٦-٥)

ونموذج بور يكون صالحاً فقط لذرة الهيدروجين والعناصر المشابهة.