

الفصل الثاني: نظرية بور للذرة

محتويات الفصل

1- التركيب الذري و الملاحظات التجريبية

2- نظرية بور

3- حالات الطاقة

4- فشل نظرية بور

1- التركيب الذري و الملاحظات التجريبية

1-1 نموذج رودرفورد:

لقد صنف رودرفورد الإشعاعات الناتجة عن النشاط الإشعاعي الطبيعي إلى ثلاثة أصناف:

* جسيمات ألفا (α): وهي أيونات هيليوم (ذات شحنة تساوي $+2e$)

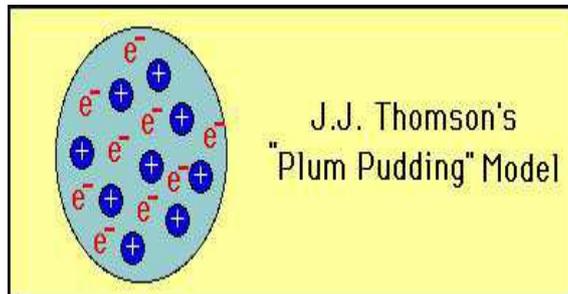
* إشعاع بيتا (β): هي الإلكترونات (شحنها تساوي $-e$)

* إشعاع غاما (γ): وهي شبيهة بالأشعة السينية. أي أمواج كهرومغناطيسية.

2-1 نموذج طومسون للذرة:

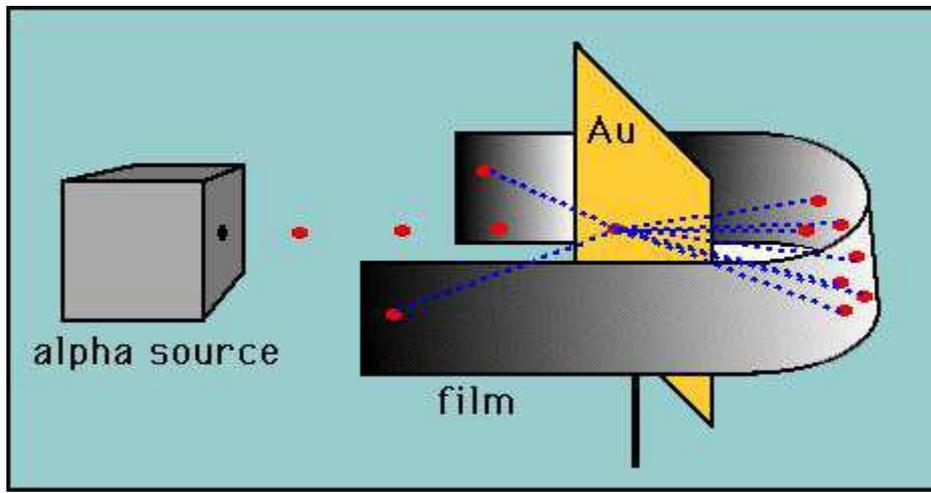
كان مفهوم الذرة كمكون أساسي للمادة متفقا عليه في نهايات القرن التاسع عشر وفهم الكيميائيون والفيزيائيون أن المواد مكونة من جزيئات هي نفسها عباره عن تجمع من الذرات.

في نهاية القرن العشرين اقترح طومسون مكتشف الإلكترونات نموذجا للذرة يسمى نموذج كعكة الزبيب وفيه يشكل جسم الذرة جسم الكعكة موجب الشحنة ويحيط به إلكترونات سالبة الشحنة.



3-1 تجربة غايغر-مارسدن:

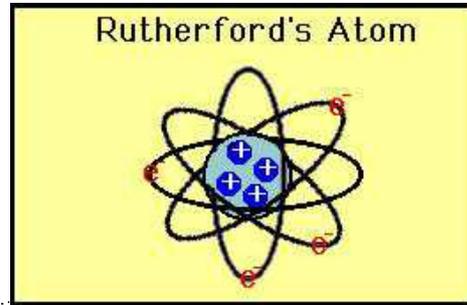
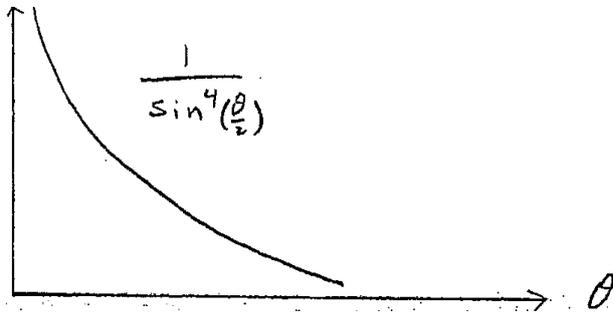
في عام 1911 أجرى كل من غايغر ومارسدن تلميذا رذرفورد التجربة التالية: قذفت صفيحة معدنية رقيقة من الذهب باستخدام جسيمات ألفا (α) الناتجة عن مصدر مشع. ف لوحظ تشتت هذه الأخيرة عن الصفيحة وكانت نتائج مذهلة.



• نتائج التجربة:

شاهد كل من غايغر ومارسدن ما يلي:

- 1- تستمر نسبة كبيرة من جسيمات ألفا الساقطة في طريقها بالتشتت بزوايا أقل من 1° .
- 2- هناك نسبة صغيرة لكنها محسوسة تشتت بزوايا أكبر من 1° وقد تجاوزت زاوية التشتت لبعض جسيمات 90°
- 3- المشاهدة الأهم هي ان عددا قليلا من الجسيمات الساقطة يرتد بزوايا 180° عن الصفيحة الهدف.



• تفسير رودرفورد :

اقترح رودرفورد التفسير التالي:

تتكون الذرة من جسم صلب يحوي معظم كتلة الذرة ذي كثافة عالية وتجول حوله على مسافات كبيرة مقارنة بأبعاد النواة إلكترونات (عددها الذري يساوي العدد الذري Z) لكي تبقى الذرة متعادلة الشحنة فيجب ان تكون شحنة النواة تساوي $+Ze$

• حساب $N(\theta)$:

يعطى عدد الجسيمات المشتتة (بتأثير مركز تشتيت واحد (نواة واحدة)) بدلالة زاوية θ في وحدة الزمن $(N(\theta))$ بالعلاقة التالية:

$$N(\theta) = \frac{I \cdot n \cdot t \cdot Z^2 \cdot e^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 \cdot r^2 \cdot T_\alpha \cdot \sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

حيث :

I عدد الجسيمات الساقطة الكلي في وحدة مساحة ووحدة الزمن (التدفق)

n : كثافة مراكز التشتت الحجمية (m^{-3})

t : سمك الصفيحة الهدف.

r : المسافة بين الهدف والكاشف

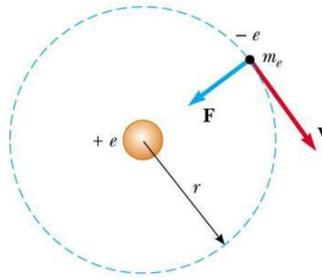
T_α : طاقة الجسيمات

4-1 النموذج المداري للذرة:

حسن نموذج رذرفورد الصورة عن الذرة وبدأ بذلك عصر جديد في محاولة فهمها وفهم الأطياف التي تشاهد عند إخضاع العناصر خاصة الهيدروجين في تلك الأيام لتفريع كهربائي. ان نموذج رذرفورد يفرض على الإلكترونات ان تكون دائمة الحركة لأنها خاضعة للقوة الكولومبية التي تؤثر بها النواة عليها.

1-4-1 ذرة الهيدروجين :

يبين الشكل الموالي ذرة الهيدروجين وهي أبسط ذرة إذ تحوي إلكترونًا واحدًا ونواتها التي تحتوي بروتونًا فقط.



ذرة الهيدروجين

يؤثر البروتون على الإلكترون بقوة جذب كولومبية F_e والتي تعتمد عكسيا على مربع المسافة بين الجسيمين وتعطى بالعلاقة:

$$\vec{F}_e(r) = -k \frac{e \cdot e}{r^2} \vec{r} = -k \frac{e^2}{r^2} \vec{r}$$

حيث: \vec{r} متجه وحدة يمثل بعد الإلكترون عند البروتون .

2-4-1 الفرضية المدارية :

تلعب القوة الكولومبية دور قوة مركزية F_c ونحن نعلم من دراسة الحركة في ميكانيك نيوتن ان :

$$\vec{F}_c = m \frac{v^2}{r} (-\vec{r})$$

الفرضية المدارية التي اقترحها بورتنص على ان الإلكترون يدور حول البروتون في مدار دائري كما تدور الأرض حول الشمس بسرعة v تعني ان :

$$F_c = F_e \Rightarrow m \frac{v^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2} \Rightarrow v^2 = \frac{ke^2}{mr}$$

تعطى الطاقة الحركية E_c والطاقة الكامنة E_p للإلكترون بالعلاقتين :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{ke^2}{2r}$$

$$E_p = -\frac{ke^2}{r}$$

طاقة الإلكترون الكلية هي :

$$E_T = E_c + E_p = \frac{ke^2}{2r} - \frac{ke^2}{r} = -\frac{ke^2}{2r} = -E_c$$

طاقة الإلكترون سالبة هذا يعني ان الإلكترون غير حر (مقيد).

وهذا هو الحال بالنسبة لأي إلكترون في الذرة لان طاقة موجبة يعني ان الإلكترون يستطيع الهروب أو مغادرة الذرة .
نتيجة: تفسير هذه الصورة البسيطة لشحنتين يعني ثبات الذرة وتجانسها عبر ارتباط الإلكترون بالنواة (البروتون).

3-4-1 فشل الفيزياء الكلاسيكية :

الإلكترون في الصورة السابقة بتسارع : $a = \frac{v^2}{r}$ و حسب النظرية الكهرومغناطيسية فان جسيم مشحون متسارع كالإلكترون هنا يشع طاقة كهرومغناطيسية و يخسر تدريجيا من طاقته حتى تصبح طاقتة تساوي صفرو عندها سوف يسقط داخل النواة.

ان هذا يعني ان الذرة سوف تتداعى و هذا مناقض لمشاهداتنا اليومية في الحياة و في المختبر و التي تثبت ان الذرات متماسكة و متجانسة.

2- نظرية بور :

1-2 مقدمة : في عام 1913 وضع نيلز بور نموذجا للذرة يمزج بين الفيزياء الكلاسيكية ومفاهيم جديدة ونجح هذا النموذج في تفسير ظواهر عديدة تظهر أثناء دراستنا للذرات .

ولتفسير ثبات الذرة اقترح بور التسليم بأن الذرة يمكن أن تتواجد بدون أن يكون هناك إشعاع للطاقة (ناتج عن إلكترونات الذرة المتسارعة والتي تدور في مسارات دائرية حول النواة (البروتين في ذرة الهيدروجين)) في واحدة من مجموعة منفصلة من حالات الطاقة المستقرة ذات طاقة ثابتة .

ولتفسير طيف ذرة الهيدروجين اقترح بور التسليم بأن الذرة يمكن أن تشع أو تمتص أمواجا كهرومغناطيسية فقط في عملية انتقال بين حالتين من حالات الطاقة المستقرة.

إذا كان الانتقال من حالة طاقة ابتدائية E_i الى حالة طاقة نهائية E_f فان تردد الاشعاع يساوي :

$$v = \frac{E_f - E_i}{h}$$

2-2- مسلمات بور :

1- يمكن أن تتواجد الذرة بدون أن يكون هناك إشعاع للطاقة في واحدة من مجموعة منفصلة من حالات الطاقة المستقرة ذات الطاقة الثابتة.

2- يمكن أن تشع الذرة أو تمتص أمواجاً كهرومغناطيسية فقط في عملية انتقال بين حالتين من حالات الطاقة المستقرة وبالتالي يكون تردد خط الطيف المرافق يساوي إلى:

$$v = \frac{E_f - E_i}{h}$$

2-3- نموذج بور وفرضية دي بروي :

كانت الفكرة وراء عمل دي بروي هي تفسير النموذج بور :

يعطى طول موجة دي بروي للإلكترون الذي يدور في مدار دائري حول النواة بالعلاقة :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} ; \text{avec: } E_c = -\frac{ke^2}{2r} = \frac{1}{2}mv^2$$

$$p = \sqrt{2m|E|} = \sqrt{\frac{ke^2}{r}}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{h^2}{2m|E|}} = \sqrt{\frac{(hc)^2 r}{mc^2 ke^2}} = 2\pi \sqrt{\frac{(\hbar c)^2 r}{mc^2 ke^2}}$$

$$\lambda = 2\pi r$$

وعليه يكون طول موجة دي بروي المصاحبة للإلكترون يساوي بالضبط محيط المدار الدائري .

2-3-1- موجة دي بروي المصاحبة للإلكترون

موجة دي بروي المصاحبة للإلكترون دائرية ولذا فإذا أردنا أن يدور الإلكترون في مدار دائري مستقر فأن نصف قطر المدار الدائري لا يمكن أن يأخذ إلا قيماً محددة (منفصلة) من طول الموجة .

$$r_n = n \frac{\lambda}{2\pi} ; n = 1, 2, 3, \dots$$

$$r_n = n \sqrt{\frac{(\hbar c)^2 r}{mc^2 ke^2}} ; \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$r_n = n^2 \frac{(\hbar c)^2}{mc^2 ke^2} = n^2 a_0$$

$$0.53 \text{Å} = \frac{(1970)^2}{511000 \times 14.4} = a_0 = \frac{(\hbar c)^2}{mc^2 ke^2} \quad \text{تطبيق عددي :}$$

2-3-2- العدد الكمي الرئيسي n

سمي العدد الصحيح n بالعدد الكمي الرئيسي وسوف نرى انه يحدد مستوى الطاقة التي يمكن للإلكترون أن يمتلكها.

4-2- مستويات الطاقة وتأيين الذرة :

لقد رأينا أن الطاقة الكلية للإلكترون ذرة الهيدروجين تعطى بالعلاقة :

$$E_T = -E_c = -\frac{ke^2}{2r}$$

باستخدام قيمة r_n من علاقة نصف قطر المدار الدائري نجد أن :

$$E_n = -\frac{k^2 \cdot e^4 \cdot m_e}{2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

$$E_n = -\frac{E_1}{n^2}$$

حيث E_1 هي الطاقة المرافقة للعدد الكمي $n = 1$

تطبيق عددي :

$$n = 1 \rightarrow E_1 = -\frac{E_1}{1^2} = -13.6 \text{eV}$$

$$n = 2 \rightarrow E_2 = -\frac{E_1}{2^2} = -3.4 \text{eV}$$

$$n = 3 \rightarrow E_3 = -\frac{E_1}{3^2} = -1.51 \text{eV}$$

$$n = 4 \rightarrow E_4 = -\frac{E_1}{4^2} = -0.84 \text{eV}$$

3- حالات الطاقة:

- إذا كان النظام (الإلكترون هنا) يمتلك الطاقة E_n فإننا نقول أنه في الحالة E_n وأنه موجود في المدار n
- تسمى أقل قيمة للطاقة للنظام المكون من الإلكترون والبروتون طاقة الحالة الأساسية ونقول أن النظام (الذرة) موجود في حالته الأساسية (الأرضية).
- إذا كانت طاقة الذرة أكبر من طاقة الحالة الأساسية فإننا نقول أن الذرة موجودة في حالة مثارة.

1-3- الحالات الأساسية والحالات المثارة:

نلخص في الجدول التالي قيم الطاقة ونصف قطر المدار لعدة مستويات في ذرة الهيدروجين :

| الحالة | العدد الكمي n | $E_n (eV)$ | $r_n (A^0)$ |
|-----------------|-----------------|----------------|----------------------|
| الأساسية | 1 | $E_1 = -13.6$ | $r_n = a_0 = 0.53$ |
| المثارة الأولى | 2 | $E_2 = -3.4$ | $r_2 = 4a_0 = 2.12$ |
| المثارة الثانية | 3 | $E_3 = -1.51$ | $r_3 = 9a_0 = 4.77$ |
| المثارة الثالثة | 4 | $E_4 = -0.84$ | $r_4 = 16a_0 = 8.48$ |
| | | | |
| | ∞ | $E_\infty = 0$ | $r_n = \infty$ |

2-3- مسلمة بور الأولى: الحالات المستقرة

- نلاحظ أن جميع قيم الطاقة التي يمكن للإلكترون أن يمتلكها سالبة أي أنه مقيد أيًا كانت الحالة التي يتواجد فيها.
- كما اقترح بور فإن مستويات الطاقة منفصلة (discrete) ونقول أن الطاقة مكممة ويقل تباعد مستويات الطاقة الواحد عن الآخر كلما زاد العدد الكمي n ، ونصل إلى منطقة يصعب تمييز مستويات الطاقة فيها.
- أكبر قيمة للطاقة هي $E_\infty = 0$ وهذا يعني أن الإلكترون مقيد دوماً.
- تسمى الطاقة اللازمة لانتزاع الإلكترون من الذرة في حالتها الأساسية أي E_1 طاقة التأين وتساوي في ذرة الهيدروجين إلى $13.6 eV$.

3-3- مسلمة بور الثانية: الأطياف الذرية

إذا انتقل إلكترون ذرة الهيدروجين من حالة الطاقة E_2 إلى حالة الطاقة E_1 (المستوى الأساسي) فإن فرق الطاقة $\Delta E = E_2 - E_1$ موجب وتردد الإشعاع الصادر في هذه الحالة (الفوتون) هو:

$$v = \frac{E_2 - E_1}{h} = \frac{-3.4 - (-13.6)}{12400} \cdot 3 \cdot 10^{16}$$

$$v = 2.47 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

وطول الموجة المرافق هو:

$$1215 \text{ \AA} = \lambda = \frac{c}{v} = \frac{hc}{\Delta E}$$

وهو طول موجة أول خط من سلسلة ليمان

وإذا كان الانتقال من المنطقة المتصلة ($n = \infty; E_{\infty} = 0$) إلى المستوى الأساسي ($n = 1; E_1 = -13.6 \text{ eV}$)، فإن طول

$$912 \text{ \AA} = \lambda = \frac{c}{v} = \frac{hc}{\Delta E} \quad \text{موجة الأشعاع الصادر هي:}$$

وهو طول موجة آخر خط من سلسلة ليمان.

4-3- سلسلة بالمر للهيدروجين:

في نهاية القرن التاسع عشر كان معروفا أن الخطوط الطيفية تترتب في سلاسل، وكان أولها تلك التي اكتشفها السويسري يوهان جاكوب بالمر (J. Balmer). لاحظ هذا الأخير أن إخضاع غاز الهيدروجين لتفريغ كهربائي يسبب ظهور سلسلة من الخطوط الطيفية.

تبدأ السلسلة بالخط H_{α} الذي طول موجته 656 \AA يليه الخط H_{β} وطول موجته 4863 \AA ثم H_{δ} ذو الطول الموجي 4341 \AA وهكذا حتى نصل إلى طول موجة 3646 \AA الذي يشكل حد لهذه السلسلة.

• ثابت ريدبارغ

وجد بالمر علاقة بسيطة تربط بين خطوط السلسلة السابقة على الصيغة:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right); \quad m = 2, n = 3, 4, 5, \dots$$

حيث R ثابت يسمى ثابت ريدبارغ اشتقت قيمته من النتائج المخبرية ويساوي:

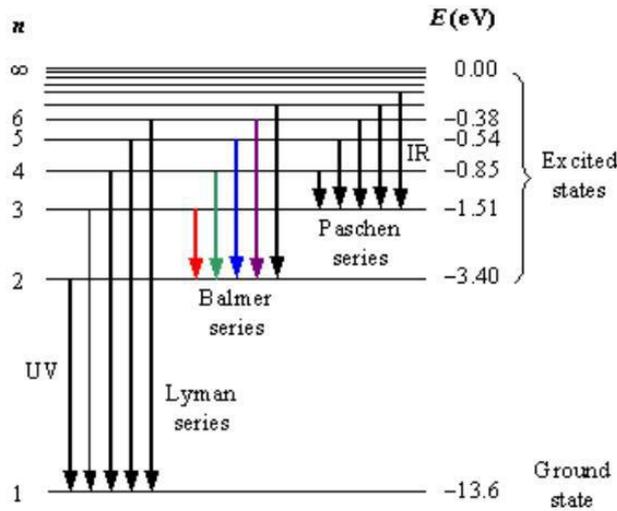
$$R = 1.096 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1} = 0.001096 \text{ \AA}^{-1} = 0.01096 \text{ nm}^{-1}$$

وظهرت لاحقا أربع سلاسل مشابهة لسلسلة بالمر سميت بأسماء مكتشفها وأظهرت النتائج المخبرية أن صيغة بالمر صالحة لهذه السلاسل أيضا وذلك بتغيير قيم كل من m و n المرافقة.

5-3 السلاسل الطيفية للهيدروجين:

يلخص الجدول التالي صيغة ريدبارغ للسلاسل الأربعة :

| | | |
|--|----------------------|------------------------|
| $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ | $n = 2, 3, 4, \dots$ | سلسلة ليمان - Lyman |
| $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ | $n = 3, 4, 5, \dots$ | سلسلة بالمر - Balmer |
| $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ | $n = 4, 5, 6, \dots$ | سلسلة باشن - Paschen |
| $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ | $n = 5, 6, 7, \dots$ | سلسلة براكت - Brackett |
| $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ | $n = 6, 7, 8, \dots$ | سلسلة بوند - Pfund |



Energy levels of the hydrogen atom with some of the transitions between them that give rise to the spectral lines indicated.

مجموع السلاسل الطيفية المعروفة

6-3 نموذج بور لذرة الهيدروجين والذرات الشبيهة بالهيدروجين

يتبين من كل ما سبق نجاح نموذج بور في تفسير ظواهر عديدة خاصة بالذرة والتركيب الذري. وبقي بور سيد الموقف عدة سنوات قبل أن يواجه ظواهر جديدة احتاج تفسيرها لنموذج أكثر تطوراً.

- تتكون الذرة ذات العدد الذري Z ، حسب نموذج بور من نواة موجبة الشحنة $+Ze$ يدور حولها Z الكترون في مدارات دائرية واعتباراً من: $Z = 2$ (ذرة الهيليوم) فإنه يجب أخذ عدد الإلكترونات بعين الاعتبار وهنا تختلف الحسابات البسيطة التي توصل إليها بور مع النتائج المخبرية.

- هناك مجموعة من الذرات تشبه في خواصها ذرة الهيدروجين وهي تلك التي تملك إلكترونات وحيدا في مدار حول النواة وتسمى الذرات الشبيهة بالهيدروجين. تنطبق عليها حسابات بور السابقة بوضع الشحنة $+Ze$ بدلا من الشحنة $+e$

7-3- نموذج بور لذرة الهيدروجين وتكميم الطاقة

كان للعالم بور فضلا كبيرا في إدخال مفهوم تكميم الطاقة، أي حقيقة أن الطاقة على المستوى الذري لا يمكن أن تأخذ قيما متصلة كما هو الحال في ميكانيك نيوتن بالرغم من أن نموذج بور لم يكن كافيا لتفسير جميع الظواهر على المستوى الذري.

4- فشل نظرية بور

وجدنا أن نموذج بور حقق نجاحا في تفسير السلاسل الطيفية وفي حساب ثابت ريدبارغ وكذلك في حل المشاكل التي عجز عنها نموذج رذرفورد. علاوة على ذلك فقد بينت التجارب صحة توقعات نموذج بور فيما يتعلق بمستويات الطاقة المكتملة. ومع هذا النجاح إلا أن هناك أمورا لم يستطع هذا النموذج مناقشتها أو التعرض لها وتشكل في مجملها قصورا في هذا النموذج يدعو إلى البحث عن تطوير أو استحداث نماذج أخرى. ومن مظاهر القصور في نموذج بور مايلي:

- 1- لم يستطع نموذج بور تفسير أطيف الذرات الأكثر تعقيدا من ذرة الهيدروجين التي تحتوي على أكثر من إلكترون واحد.
 - 2- أفترض أن الإلكترون يدور في مدارات محددة وفي مستوى واحد حول النواة مما يعني أن ذرة الهيدروجين مسطحة مما يناقض ما ثبت بعد ذلك من أن الذرة مجسمة.
 - 3- أفترض أن الإلكترون جسيم مادي ولم يعتبر الطبيعة الموجية للإلكترونات.
 - 4- أفترض أنه يمكن تعيين كلا من مكان وسرعة الإلكترون في نفس الوقت بدقة وهذا عمليا مستحيل لأن جهاز القياس المستخدم سوف يغير المكان أو السرعة.
 - 5- لم يعتبر بور احتمال تجاوز الإلكترون للمدارات الثابتة التي حددها واحتمال وجوده في منطقة حول هذا المدار الثابت.
- كل تلك الأمور شكلت صعوبات في نموذج بور وللتغلب عليها فقد اقترح شرودينغر نظرية جديدة في ذلك الوقت هي نظرية الكم التي تعتمد على مفاهيم ميكانيكا الكم والتي استطاعت معالجة كثير من تلك الصعوبات في نموذج بور.