

الفصل الرابع:
التركيب الذري
Chapter 4:
Atomic Structure

Lecture 12

Phys. 251: **Modern Physics**
Physics Department
Yarmouk University 21163 Irbid Jordan
Chapter 4 : Atomic Structure

© Dr. Nidal Ershaidat
<http://daps.yu.edu.jo/physics/Courses/Phys251/Lec4-1>

المحاضرة ١٢

ف ٢٥١ : فيزياء حديثة ١
قسم الفيزياء - جامعة اليرموك
٢١١٦٣ إربد الأردن

الفصل الرابع : التركيب الذري

© د. نضال الرشيدات

Brief History

4th Century B.C: Democritus (ATOMOS = indivisible)

في عام 1911 كنا، بالإضافة للكيمياء وميكانيكا نيوتن، نعرف:

- النظرية الكهرومغناطيسية
- النظرية الحركية للغازات
- النسبية
- أشعة رونتغن
- ظاهرة النشاط الإشعاعي الطبيعي
- الطبيعة الجسيمية للضوء (بلانك، أينشتاين)

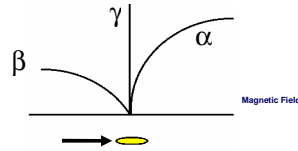
وكنا نعرف ثلاثة جسيمات أولية: الإلكترون والبروتون والفوتون

Radiations - Rutherford

وكما قلنا سابقاً فقد صَنَّف رذرفورد الاشعاعات الناتجة عن النشاط الإشعاعي الطبيعي الى ثلاثة:



Radioactive source



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

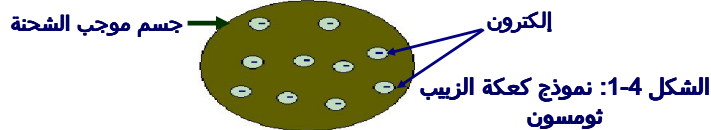
اشعاع بيتا (β) : وهي إلكترونات (شحنتها تساوي $-e$)

اشعاع غاما (γ) : وهي شبيهة بالأشعة السينية، أي أمواج كهرومغناطيسية

نموذج ثومسون للذرة

كان مفهوم الذرة كمكون أساسي للمادة متفقاً عليه في نهايات القرن التاسع عشر، وفهم الكيميائيون والفيزيائيون أن المواد مكونة من جزيئات هي نفسها عبارة عن "تجمع" من الذرات. فمثلاً كان معروفاً أن جزيئاً من غاز الهيدروجين مكون من ذرتين من عنصر الهيدروجين.

في نهاية القرن العشرين اقترح ثومسون، مكتشف الإلكترونات، نموذجاً للذرة يُسمى نموذج "الكعكة الزبيب"، وفيه يُشكل جسم الذرة جسم (الكعكة) موجب الشحنة ويحيط به إلكترونات سالبة الشحنة.



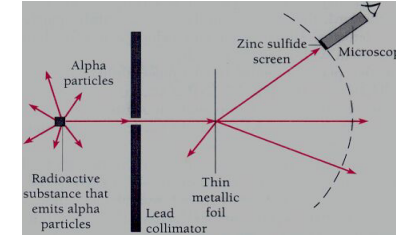
إلكترون

الشكل 1-4: نموذج كعكة الزبيب

ثومسون

تجربة غايغر - مارسدن

في عام 1911، أجرى غايغر ومارسدن تلميذا رذرفورد التجربة التالية (الشكل 2-4):



الشكل 2-4: تجربة غايغر - مارسدن

قذفت صفيحة معدنية رقيقة (من الذهب) باستخدام جسيمات ألفا الناتجة عن مصدر مشع (طبيعي). استخدم غايغر ومارسدن لوحة من كبريتيد الخارصين للكشف عن جسيمات ألفا التي تشتتت عن صفيحة الذهب، وكانت النتائج مذهلة.

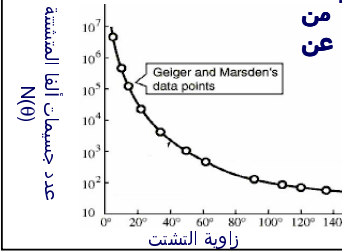
نتائج تجربة غايغر - مارسدن

شاهد غايغر ومارسدن ما يلي :

- 1) تستمر نسبة كبيرة من جسيمات ألفا الساقطة في طريقها (تشتت بزوايا أقل من 1°)
- 2) هناك نسبة صغيرة لكنها محسوسة تشتتت بزوايا أكبر من 1° وقد تتجاوز زاوية التشتت لبعض الجسيمات 90° ,
- 3) والملاحظة الأهم هي أن عدداً قليلاً من الجسيمات الساقطة يرتد بزوايا 180° عن الصفيحة الهدف!

الشكل 3-4:

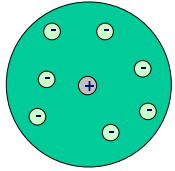
نتائج تجربة غايغر - مارسدن



تفسير رذرفورد

اقترح رذرفورد التفسير التالي:

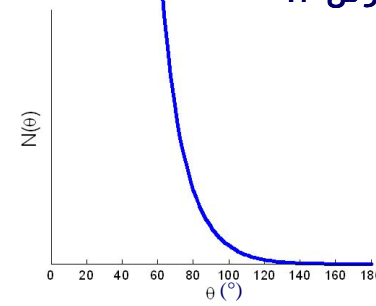
تتكون الذرة من جسم صلب (يحتوي معظم كتلة الذرة)، ذي كثافة عالية، وتجوّل حوله، على مسافات كبيرة مقارنة بأبعاد النواة، إلكترونات (عددها يساوي العدد الذري Z). لكي تبقى الذرة متعادلة الشحنة فيجب أن تكون شحنة النواة تساوي $+Ze$.



الشكل 3-4: نموذج رذرفورد للذرة

$dN(\theta)$

تغير الدالة مع θ حاد جداً. في الشكل المحور العمودي لوغاريتمي. تبين التجربة التي أكتدها صيغة رذرفورد أن 0.14% فقط من جسيمات ألفا تشتتت بزوايا أكبر من 11°



حساب $N(\theta)$

يُعطى عدد الجسيمات المتشتتة (بتأثير مركز تشتيت واحد (نواة واحدة)) بزوايا θ في وحدة الزمن $(N(\theta))$ بالعلاقة التالية (أنظر الملحق 1-M4):

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

1-4

حيث:

I عدد الجسيمات الساقطة الكلي في وحدة المساحة في وحدة الزمن (التدفق)

n = كثافة مراكز التشتيت الحجمية (m^{-3}) و t = سمك الصفيحة الهدف

r = المسافة بين الهدف والكاشف (الشاشة)

T_α = طاقة الجسيمات

Lecture 13

Phys. 251: Modern Physics

Physics Department

Yarmouk University 21163 Irbid Jordan

The Planetary Model

© Dr. Nidal Ershaidat

<http://ctaps.yu.edu.jo/physics/Courses/Phys251/Lec4-2>

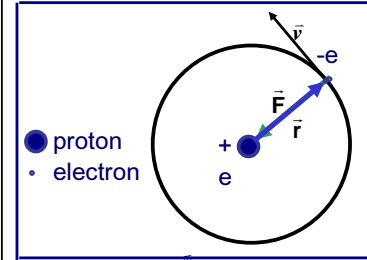
المحاضرة ١٣

ف ٢٥١ : فيزياء حديثة ١
قسم الفيزياء - جامعة اليرموك
٢١١٦٣ إربد الأردن
نموذج الذرة المداري -
الأطياف الذرية

© د. نضال الرشيدات

ذرة الهيدروجين

يُبين الشكل 4-5 التالي ذرة هيدروجين، وهي أبسط ذرة، إذ تحوي إلكترونًا واحدًا ونواة التي تحوي بروتونًا فقط. يؤثر البروتون على الإلكترون بقوة جذب كولومية \vec{F} والتي تعتمد عكسيًا على مربع المسافة بين الجسيمين وتُعطى بالعلاقة:



$$\vec{F}_e(r) = -K \frac{e \times e}{r^2} \hat{r} = -\frac{\chi}{r^2} \hat{r}$$

2-4

حيث \hat{r} متجه وحدة يمثل بعد الإلكترون عن البروتون والذي نأخذه كمركز إحداثيات والثابت χ هو:

$$\chi = K e^2 = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} = 14.4 \text{ (eV} \cdot \text{Å)}$$

(الشكل 4-5): ذرة الهيدروجين

نموذج الذرة المداري Planetary Model

حسن نموذج رذرفورد الصورة عن الذرة، وبدأ بذلك عصر جديد في محاولة فهمها وفهم الأطياف التي تُشاهد عند اخضاع العناصر خاصة الهيدروجين في تلك الأيام، لتفريغ كهربائي

إنّ نموذج رذرفورد يفرض على الإلكترونات أن تكون دائمة الحركة لأنها خاضعة للقوة الكولومية التي تؤثر بها النواة عليها

بسبب نجاح نموذج النظام الشمسي في تقدير حركة الأرض ولأنّ القوة الكولومية التي تتأثر بها الإلكترونات قوة مركزية (لا تعتمد إلاّ على مربع المسافة) مثلها مثل قوة الجذب بين الأرض والشمس فإنّ التفكير بنموذج مداري فرض نفسه وهذا ما عمله بور

الفرضية المدارية

تَلعب القوة الكولومية دور قوة مركزية (F_c) ونحن نعلم من دراستنا للحركة في ميكانيكا نيوتن أن

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

الفرضية المدارية التي اقترحها بور، أي أنّ الإلكترون يدور حول البروتون في مدار دائري كما تدور الأرض حول الشمس (بسرعة v) تعني أن:

$$F_e = \frac{\chi}{r^2} = F_c = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{\chi}{m r}} = \sqrt{\frac{K e^2}{m r}} \quad 3-4$$

تُعطي طاقة الحركة KE وطاقة الوضع (الكهربائية) PE للإلكترون، وهو غير نسبي هنا، بالعلاقين التاليين:

$$KE = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{K e^2}{2 r} = \frac{\chi}{2 r}$$

4-4

$$PE = \frac{-K e^2}{r} = -\frac{\chi}{r}$$

لاحظ أنّ $|PE| = 2 KE$

طاقة الإلكترون الكلية

الطاقة الكلية للإلكترون ($E = KE + PE$) تُساوي:

$$E = \frac{\chi}{2r} - \frac{\chi}{r} = -\frac{\chi}{2r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad 5-4$$

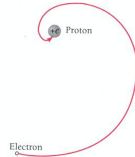
طاقة الإلكترون الكلية سالبة وهذا يعني أن الإلكترون مُقيد (bound).

وهذا هو الحال لأي إلكترون في أية ذرة، لأن طاقة موجبة تعني أن الإلكترون يستطيع الهروب من الذرة!

تُفسر هذه الصورة البسيطة لشحنتين ثبات الذرة وتجانسها عبر ارتباط الإلكترون بالنواة (البروتون هنا)

فشل الفيزياء الكلاسيكية

الإلكترون في الصورة السابقة يتسارع ($a_r = v / r$)، وحسب النظرية الكهرمغناطيسية، فإن جسمًا مشحونًا متسارعًا، كالإلكترون هنا، يُشع طاقة كهرمغناطيسية ويخسر تدريجيًا من طاقته حتى تصبح طاقته تُساوي صفرًا وعندها سوف يسقط في داخل النواة! (الشكل 6-4)



(الشكل 6-4): الإلكترون يهوي داخل النواة حسب الكهرمغناطيسية

إن هذا يعني أن الذرة سوف "تداعى" وهذا مناقض لمشاهداتنا اليومية في الحياة وفي المختبر والتي تُثبت أن الذرات متماسكة ومتجانسة

لماذا تفشل الفيزياء الكلاسيكية في المستوى الميكروسكوبي؟

ليست هذه هي المرة الأولى التي نرى فيها أن الميكانيكا الكلاسيكية تفشل في تفسير ظاهرة على المستوى الميكروسكوبي.

تتطرق الفيزياء الكلاسيكية إلى الأنظمة الفيزيائية باعتبارها أمواجًا بحثة أو باعتبارها أجسامًا مادية بحثة. إن هذا التناول للظواهر الفيزيائية مقبول في المستوى الماكروسكوبي (النظام الشمسي والحركة والغازات) لأن الطبيعة الموجبة مغمورة بالطبيعة المادية. (انظر مثالنا على حساب طول موجة دي بروي المُصاحبة لجسم كتلته 60 kg وسرعته 20 m/s).

لقد اتضح لنا من خلال دراستنا السابقة أنه كلما "صغرت" أبعاد النظام المدروس وضح أكثر عجز الفيزياء الكلاسيكية عن تفسير الظواهر التي تحدث.

* ونقصد بذلك الفيزياء التي سبقت تفسير بلانك لظاهرة اشعاع الجسم الأسود أي ميكانيكا نوبن ونظرية الكهرمغناطيسية التي وضع قواعدها ماكسويل والنظرية الحركية للغازات.

نموذج بور يُدخل مفاهيم جديدة على الفيزياء الكلاسيكية

في عام 1913 وضع نيلز بور نموذجًا للذرة يمزج بين الفيزياء الكلاسيكية ومفاهيم جديدة ونجح هذا النموذج في تفسير ظواهر عديدة تظهر أثناء دراستنا للذرات.

احتاج الأمر على الأقل لعشر سنوات أخرى حتى تظهر نظرية جديدة، تتحرر من قيود الفيزياء الكلاسيكية وتطور لتفسر معظم الظواهر التي تحدث على المستوى الميكروسكوبي



الأطياف الذرية – الخطوط الطيفية

إذا أردنا نموذجًا متكاملًا للذرة فبالإضافة لثبات الذرات الذي كان معروفًا ومفهومًا يجب أخذ الأطياف الذرية بعين الاعتبار أيضًا .

لقد فسّر بلانك اشعاع الجسم الأسود دون اعتبار مصدره أو نوعية المادة. وكان اعتبار هذا الاشعاع وكأنه خاصية "جماعية" للذرات كافيًا لتفسيره.

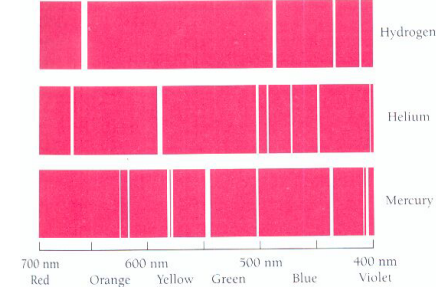
على النقيض من هذا، فقد لاحظ الفيزيائيون منذ زمن طويل أنّ اخضاع بعض الغازات لتفريغ كهربائي يسبب انبعاث ضوء (أمواج كهرومغناطيسية). هنا يُمكن اعتبار أنّ مصدر الاشعاع هو الذرات (أو الجزيئات) بشكل شبه فردي،

طيف الامتصاص

وهناك أيضًا امتصاص الذرة للاشعاع. إذا سلط ضوء أبيض على غاز فإن الطيف الناتج يشبه بطيف الانبعاث، حيث تظهر خطوط سوداء عند أطوال الموجة التي تمتصها المادة. وهي نفس الأطوال التي نراها عند الاشعاع!

الأطياف الذرية – الخطوط الطيفية

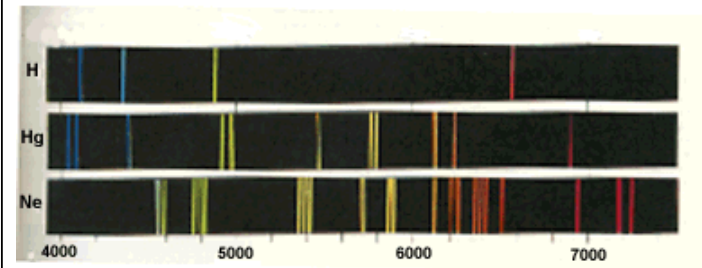
يبين الشكل 4-7 الخطوط الطيفية للهيدروجين والهيليوم والزنبق. (أنظر الملحق لمعرفة كيفية الحصول على هذه الأطياف)



الشكل 4-7 الخطوط الطيفية للهيدروجين (H) والهيليوم (He) والزنبق (Hg)

الأطياف الذرية – الخطوط الطيفية (٢)

يبين الشكل 4-8 الخطوط الطيفية للهيدروجين والصوديوم والزنبق.



الشكل 4-8 الخطوط الطيفية للهيدروجين والصوديوم والزنبق

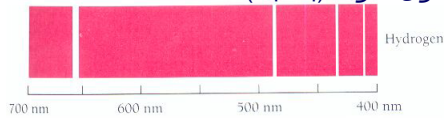
الأطياف الذرية – الامتصاص

يبين الشكل 9-4 طيف الامتصاص للهيدروجين. تمثل الخطوط السوداء أطوال الموجة التي تمتصها ذرة الهيدروجين.

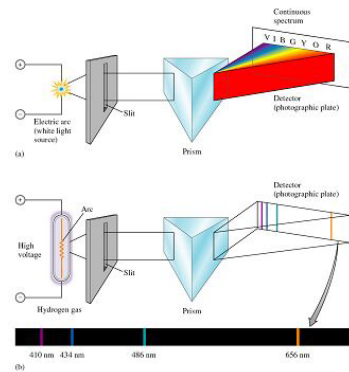


الشكل 9-4 طيف الامتصاص للهيدروجين

عند مقارنة طيف الامتصاص السابق بطيف الاشعاع الذي رأيناه، نرى أنهما يُظهران نفس أطوال الموجة (بالضبط)!



A simple spectroscope



الأطياف الذرية – سلسلة بالمر للهيدروجين

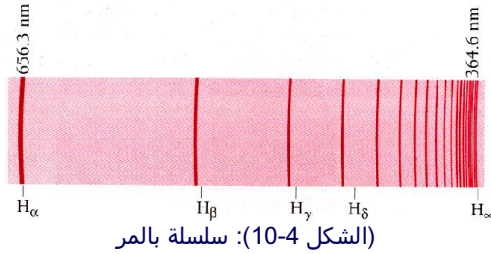
في نهاية القرن التاسع عشر كان معروفاً أنّ الخطوط الطيفية تترتب في سلاسل، وكان أولها تلك التي اكتشفها السويسري يوهان جاكوب بالمر (J. J. Balmer)، الاستاذ في مدرسة ثانوية، في عام 1885. لاحظ بالمر أنّ اخضاع غاز الهيدروجين لتفريغ كهربائي يُسبب ظهور سلسلة من الخطوط الطيفية (الشكل 10-4)

سلسلة بالمر Balmer Series



سلسلة بالمر للهيدروجين

تبدأ السلسلة بالخط (H_α) الذي طول موجته 6563 \AA يليه الخط H_β و الذي طول موجته ($\lambda = 4863 \text{ \AA}$) ثم H_γ ($\lambda = 4341 \text{ \AA}$) وهكذا حتى نصل الى طول الموجة $\lambda = 3646 \text{ \AA}$ الذي يُشكّل حدًّا لهذه السلسلة.



السلسلات الطيفية للهيدروجين

يُخصّص الجدول 1-4 التالي صيغة ريديرغ للسلسلات الأربع السابقة.

$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 2, 3, 4, \dots$	سلسلة ليمان (Lyman)
$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 4, 5, 6, \dots$	سلسلة باخن (Paschen)
$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 5, 6, 7, \dots$	سلسلة براكيت (Brackett)
$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 6, 7, 8, \dots$	سلسلة بفند (Pfund)

الجدول 1-4 : صيغة بالمر للسلسلات الطيفية للهيدروجين

فيما يلي تُعيد كتابة صيغة بالمر-ريديرغ للسلسلات الخمس

الأطياف الذرية - ثابت ريديرغ

وجد بالمر علاقة بسيطة تربط بين خطوط السلسلة السابقة على

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 2, 3, 4, \dots \quad \text{الصيغة: 6-4}$$

حيث R ثابت يُسمّى ثابت ريديرغ Rydberg's constant اشتقت قيمته من النتائج المخبرية ويساوي:

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

وظهرت لاحقاً أربع سلسلات مُشابهة لسلسلة بالمر سُميت بأسماء مكتشفها وأظهرت النتائج المخبرية أنّ صيغة بالمر صالحة لهذه السلسلات أيضاً بتغيير العدد 2 وقيمة n المرادفة.

السلسلات الطيفية للهيدروجين

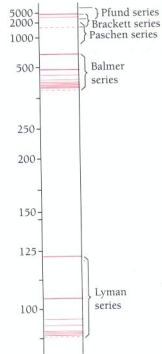
$$\frac{1}{\lambda(m, n)} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = m+1, m+2, m+3, \dots \quad \text{7-4}$$

يُخصّص الجدول 2-4 التالي قيمة أطول خط موجي ($m, n=m+1$) وأقصر خط موجي والمرادف للقيمة ($m, n=\infty$) (أي أول وآخر خطين طيفيين)

$\lambda(m, \infty) (\text{ \AA})$	$\lambda(m, m+1) (\text{ \AA})$	m	السلسلة
912	1215	1	سلسلة ليمان (Lyman)
3646	6563	2	سلسلة بالمر (Balmer)
8204	18752	3	سلسلة باخن (Paschen)
14598	40514	4	سلسلة براكيت (Brackett)
22789	74584	5	سلسلة بفند (Pfund)

الجدول 2-4 : طول موجة أول خط طيفي وآخر خط طيفي للسلسلات الطيفية للهيدروجين

السلسلات الطيفية للهيدروجين



في الشكل التالي تمثيل للخطوط الطيفية لسلسلات ذرّة الهيدروجين بدلالة طول الموجة.

يشكل وجود هذه السلسلات، والتي شوهدت وقيست لعناصر أعقد من الهيدروجين، بالإضافة لتشابه طيفي الاشعاع والامتصاص تحدياً ووسيلة لفحص أي نموذج ذري.

الشكل 4-11 سلسلات الهيدروجين

Bohr's Model

Bohr's model explained the atomic spectra.

Bohr's model treated the problem of the hydrogen atom by considering the Coulomb (now we say electromagnetic force) between the electron and the proton. He put the first postulates of the Quantum Theory

Stationary States:

An atom can exist without radiating in any one of a discrete set of stationary states of fixed energy.

The Frequency Postulate:

An atom can emit or absorb radiation only in a transition between these stationary states, the frequency of the radiation (and hence that of the corresponding spectral line) is $\nu = |E_j - E_i| / h$

Lecture 14

Phys. 251: Modern Physics

Physics Department

Yarmouk University 21163 Irbid Jordan

Bohr's Model

© Dr. Nidal Ershaidat

<http://ctaps.yu.edu.jo/physics/Courses/Phys251/Lec4-3>

المحاضرة ١٤

ف ٢٥١ : فيزياء حديثة ١

قسم الفيزياء - جامعة اليرموك

٢١١٦٣ إربد الأردن

نموذج بور

© د. نضال الرشيدات

إلكترون الذرة غير نسبي

إلكترون الذرة جسيم غير نسبي

لقد رأينا أن الطاقة الكلية لإلكترون ذرة الهيدروجين تُعطى بالعلاقة:

$$E = \frac{\chi}{2r} - \frac{\chi}{r} = -\frac{\chi}{2r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

تُثبت التجربة أن الطاقة اللازمة لفصل إلكترون ذرة الهيدروجين عن بروتونها تساوي 13.6 eV (وتسمى هذه الطاقة طاقة التأين). وبما أن طاقة الإلكترون الحركية KE = |E| فإن النسبة بين طاقته الحركية وطاقة السكون له

$$\frac{KE}{m_0 c^2} = -\frac{|E|}{m_0 c^2} = \frac{13.6 \text{ eV}}{511000 \text{ eV}} \approx 3.06 \times 10^{-5} \ll 0.1 \quad 8-4$$

أقل بكثير من 10%، وهذا يعني أن الإلكترون ليس نسبياً. في كل ما سيأتي سنستخدم حسابات الميكانيكا الكلاسيكية لدراسة خواص الذرة.

39

حساب r و v

بأخذ $E = -13.6 \text{ eV}$ فإن نصف قطر المدار الذي يدور فيه الإلكترون هو:

$$r = -\frac{\chi}{2E} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 E} = -\frac{14.4 \text{ eV } \text{Å}}{2 \times -13.6 \text{ eV}} \approx 0.53 \text{ Å} \quad 9-4$$

يُسمى نصف القطر هذا نصف قطر بور ونستخدم عادة الرمز a_0 للتعبير عنه.

$$a_0 = 0.53 \text{ Å} \quad 10-4$$

وسرعته تساوي:

$$\Rightarrow v = c \sqrt{\frac{\chi}{m c^2 r}} = c \sqrt{\frac{14.4}{511000 \times 0.53}} = 0.0073 c \ll c \quad 11-4$$

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 4 : Atomic Structure Lecture 14

نموذج بور



نموذج بور

لتفسير ثبات الذرة اقترح بور التسليم بأن الذرة يمكن أن تتواجد بدون أن يكون هناك اشعاع للطاقة (نتج عن إلكترونات الذرة المتسارعة التي تدور في مسارات دائرية حول النواة (البروتون في ذرة الهيدروجين)) في واحدة من مجموعة منفصلة (**discrete**) من حالات الطاقة المستقرة ذات الطاقة الثابتة

ولتفسير طيف ذرة الهيدروجين اقترح بور التسليم بأن الذرة يمكن أن تشع أو تمتص أمواجاً كهرومغناطيسية فقط في عملية انتقال بين حالتين من حالات الطاقة المستقرة. إذا كان الانتقال من حالة طاقة ابتدائية (طاقتها E_i) إلى حالة طاقة نهائية (طاقتها E_f), فإن تردد الاشعاع (وبالتالي تردد خط الطيف المرادف) يساوي:

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

مسلّميتا بور

1 - يمكن أن تتواجد الذرة بدون أن يكون هناك اشعاع للطاقة في واحدة من مجموعة منفصلة (**discrete**) 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. إذا كان الانتقال من حالة طاقة ابتدائية (طاقتها E_i) إلى حالة طاقة نهائية (طاقتها E_f), فإن تردد الاشعاع (وبالتالي تردد خط الطيف المرادف) يساوي:

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

Bohr's Model

Bohr's model treated the problem of the hydrogen atom by considering the Coulomb (now we say electromagnetic force) between the electron and the proton. He put the first postulates of the Quantum Theory

Stationary States:

An atom can exist without radiating in any one of a discrete set of stationary states of fixed energy.

The Frequency Postulate:

An atom can emit or absorb radiation only in a transition between these stationary states, the frequency of the radiation (and hence that of the corresponding spectral line) is $\nu = |E_f - E_i| / h$

Bohr's model explained the atomic spectra.



نموذج بور وفرضية دي بروي

كانت الفكرة وراء عمل دي بروي هي تفسير نموذج بور.

يُعطي طول موجة دي بروي للإلكترون الذي يدور في مدار دائري حول النواة

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m v}$$

$$p = \sqrt{2 m |E|} = \sqrt{\frac{m \chi}{r}} = -\sqrt{\frac{e^2 m}{4 \pi \epsilon_0 2 r}}$$

وباستخدام

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

نجد أن:

$$12-4$$

$$\lambda = 2 \pi r$$

$$13-4$$

إذاً يكون طول موجة دي بروي المُصاحبة للإلكترون يُساوي بالضبط محيط المدار الدائري!

الموجة الديبروية المُصاحبة للإلكترون

الموجة الديبروية المُصاحبة للإلكترون دائرية (مثل تلك التي تنتشر في سلك دائري) ولذا فإذا أردنا أن يدور الإلكترون في مدار دائري مستقر فإن نصف قطر المدار الدائري لا يُمكن أن يأخذ إلا قيماً محددة (منفصلة) من طول

الموجة

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

$$13-4$$

$$\lambda = 2 \pi \sqrt{\frac{(hc)^2}{m c^2 \chi}} r$$

وباستخدام العلاقة (12-4):

$$r_n = n \sqrt{\frac{(hc)^2}{m c^2 \chi}} r, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

نجد أن:

$$r_n = n^2 \frac{(hc)^2}{m c^2 \chi} = n^2 a_0, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$14-4$$

العدد الكمي n Quantum Number

يُسمى العدد الصحيح n ($n=1, 2, 3, \dots$) العدد الكمي وسوف نرى أنه يُحدّد (مستوى) الطاقة التي يُمكن للإلكترون أن يمتلكها.

نجد هنا أيضاً نصف قطر بور (Bohr radius) والذي سبق ورأيناه، والذي يساوي نصف قطر المدار الأول.

$$a_0 = r_1 = \frac{(hc)^2}{m c^2 \chi} = \frac{(1970)^2}{511000 \cdot 14.4} = 0.53 \text{ \AA}$$

$$15-4$$

$$a_0 = r_1 = 0.53 \text{ \AA}$$

Lecture 15

Phys. 251: Modern Physics

Physics Department

Yarmouk University 21163 Irbid Jordan

Energy Levels - Atomic Excitation

© Dr. Nidal Ershaidat

<http://ctaps.yu.edu.jo/physics/Courses/Phys251/Lec4-4>

المحاضرة ١٥

ف ٢٥١ : فيزياء حديثة ١
قسم الفيزياء - جامعة اليرموك
٢١١٦٣ إربد الأردن

مستويات الطاقة - تهيج الذرة

© د. نضال الرشيدات

51

حساب E_n

لقد رأينا أنّ الطاقة الكلية لإلكترون ذرة الهيدروجين تُعطى بالعلاقة:

$$E_1 = -\frac{m_0 c^2 \chi^2}{2 (\hbar c)^2} \cong -\frac{511000 (14.4)^2}{2 (1970)^2} = -13.6 \text{ eV}$$

$$n = 2 \rightarrow E_2 = E_1 / (2)^2 = E_1 / 4 = -3.4 \text{ eV}$$

$$n = 3 \rightarrow E_3 = E_1 / (3)^2 = E_1 / 9 = -1.51 \text{ eV} \quad 16-4$$

$$n = 4 \rightarrow E_4 = E_1 / (4)^2 = E_1 / 16 = -0.84 \text{ eV}$$

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 4: Atomic Structure Lecture 15

50

Energy Levels

مستويات الطاقة

لقد رأينا أنّ الطاقة الكلية لإلكترون ذرة الهيدروجين تُعطى بالعلاقة:

$$E = -\frac{\chi}{2r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

وباستخدام قيمة r_n من العلاقة (14-4) السابقة نجد أنّ:

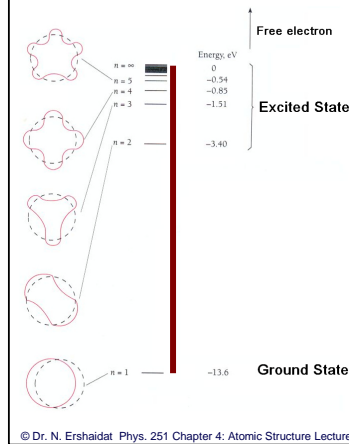
$$E_n = -\frac{\chi}{2r} = -\frac{\chi}{2 \left(\frac{\hbar c}{m_0 c^2 \chi} n^2 \right)} = -\frac{m_0 c^2 \chi^2}{2 (\hbar c)^2} \left(\frac{1}{n^2} \right) = \frac{E_1}{n^2} \quad 16-4$$

حيث E_1 هي الطاقة المرادفة للعدد الكمي $n=1$:

$$E_1 = -\frac{m_0 c^2 \chi^2}{2 (\hbar c)^2} = \frac{m_0 e^4}{8 \epsilon_0 \hbar^2}$$

52

حالات الطاقة



إذا كان النظام (الإلكترون هنا) يمتلك الطاقة E_n فإننا نقول أنه في الحالة E_n وأنه موجود في المدار رقم n

تُسمى أقل قيمة للطاقة للنظام المكون من الإلكترون والبروتون (الحالة E_1) طاقة الحالة الأرضية ونقول أنّ النظام (الذرة) موجود في حالته الأرضية

إذا كانت طاقة الذرة أكبر من طاقة الحالة الأرضية فإننا نقول أنّ الذرة موجودة في حالة متهيجة (مُثارة).

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 4: Atomic Structure Lecture 15

الحالة الأرضية والحالات المثيَّجة

نلخص في الجدول 3-4 التالي قيم الطاقة (ونصف قطر المدار) لعدة مستويات في ذرة الهيدروجين

الحالة	العدد الكمي (n)	E_n (eV)	r_n (Å)
الأرضية	1	$E_1 = -13.6$	$r_1 = a_0 = 0.53$
المثيَّجة الأولى	2	$E_2 = -3.4$	$r_2 = 4 a_0 = 2.12$
المثيَّجة الثانية	3	$E_3 = -1.51$	$r_3 = 9 a_0 = 4.77$
المثيَّجة الثالثة	4	$E_4 = -0.84$	$r_4 = 16 a_0 = 8.48$
...
	∞	$E_\infty = 0$	$r_\infty = \infty$

الجدول 3-4 : قيم الطاقة (ونصف قطر المدار) لعدة مستويات في ذرة الهيدروجين

مسلمية بور الأولى: الحالات المستقرة

نلاحظ أن جميع قيم الطاقة التي يُمكن للالكترون أن يمتلكها سالبة، أي أنه مقيدٌ أيًا كانت الحالة التي يتواجد فيها.

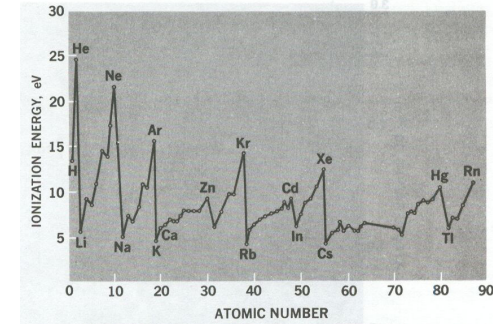
كما اقترح بور فإن مستويات الطاقة منفصلة (discrete). ونقول أن الطاقة مُكمَّاة (quantized). ويقبل تباعد مستويات الطاقة الواحد عن الآخر كلما زاد العدد الذري n. ونصل إلى منطقة يصعب تمييز مستويات الطاقة ونسمي هذه المنطقة (continuum)

أكبر قيمة للطاقة هي $E_\infty = 0$ ، وهذا يعني أن الالكترون مقيدٌ دومًا.

تُسمى الطاقة اللازمة لانتزاع الكترون من الذرة في حالتها الأرضية، أي $|E_1|$ ، طاقة التأين وتساوي للهيدروجين 13.6 eV

طاقة التأين

يبين الشكل 13-4 طاقة التأين لجميع الذرات (بدلالة Z)



مسلمية بور الثانية : الأطياف الذرية

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

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{E_2 - E_1}{h} = \frac{-3.4 - (-13.6)}{12400} \times 3 \times 10^{18} = 2.47 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

وطول الموجة المرادف هو: $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{h c}{\Delta E} = \frac{12400}{10.2} = 1215 \text{ \AA}$ وهو طول موجة أول خط من سلسلة ليمان!

وإذا كان الانتقال من المنطقة المتصلة $(n=0)$ ، $E_\infty = 0$ إلى المستوى الأرضي $(n=1, E_1 = -13.6 \text{ eV})$ فإن طول موجة الاشعاع الصادر هي

$$\lambda = \frac{h c}{E_\infty - E_1} = \frac{12400}{0 - 13.6} \approx 912 \text{ \AA}$$

وهو طول موجة آخر خط من سلسلة ليمان!

مسلمية بور الثانية : سلسلة بالمر

إذا كان الانتقال من حالة الطاقة E_3 (المستوى المتهيج الثاني) إلى حالة الطاقة E_2 (المستوى المتهيج الأول) فإن طول موجة الاشعاع الصادر في هذه الحالة هو

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{12400}{1.51 - (-3.4)} \cong 6561 \text{ \AA}$$

وهو طول موجة أول خط من سلسلة بالمر!

من السهل التأكد أن طول موجة آخر خط طيفي والذي يساوي 3646 \AA ناتج عن انتقال الالكترون من المنطقة المتصلة ($n = \infty$) إلى المدار الثاني ($n = 2$)

نموذج بور وصيغة بالمر

بشكل عام إذا كان الانتقال من حالة الطاقة E_m المتهجة إلى حالة الطاقة E_n الأكثر استقراراً فإن طول موجة الاشعاع الصادر في هذه الحالة هو

$$\lambda \left(\text{\AA} \right) = \frac{hc}{E_n - E_m} = \frac{12400}{13.6 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)}$$

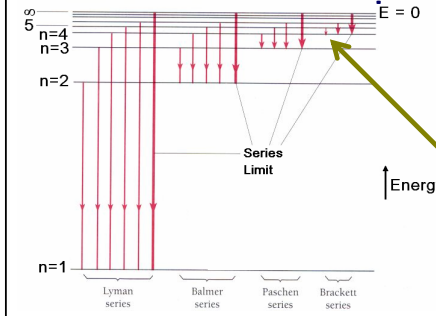
$$\frac{1}{\lambda \left(\text{\AA} \right)} = \frac{E_n - E_m}{hc} = \frac{E_1}{hc} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \cong 0.001096 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{و}$$

وهي صيغة بالمر-ريدبيرغ التي رأيناها وكان استنباطها أساساً مبنياً على النتائج المخبرية. وقيمة ثابت ريدبيرغ هي:

$$R = \frac{E_1}{hc} = \frac{13.6 \text{ eV}}{12400 \text{ eV} \cdot \text{\AA}} \cong 0.001096 \text{ \AA}^{-1} = 1.096 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \quad \text{17-4}$$

نموذج بور وسلسلات ذرة الهيدروجين

يبين الشكل 4-14 التالي الانتقالات المسؤولة عن سلسلات ذرة الهيدروجين الخمس التي رأيناها سابقاً.



مثال: الخط الطيفي الأول في سلسلة براكيت ناتج عن انتقال الذرة من الحالة المتهجة الرابعة ($n=5$) إلى الحالة المتهجة الثالثة ($n=4$)

الشكل 4-14 سلسلات ذرة الهيدروجين

نموذج بور وطيف الامتصاص

كانت كل الانتقالات السابقة بين مستويين، القيمة المطلقة لطاقة المستوى النهائي فيها أكبر من القيمة المطلقة لطاقة المستوى الابتدائي. أن الفرق الموجب بين طاقتي المستويين ΔE سوف يثبت على شكل اشعاع (فوتون) تردده يساوي $\Delta E/h$

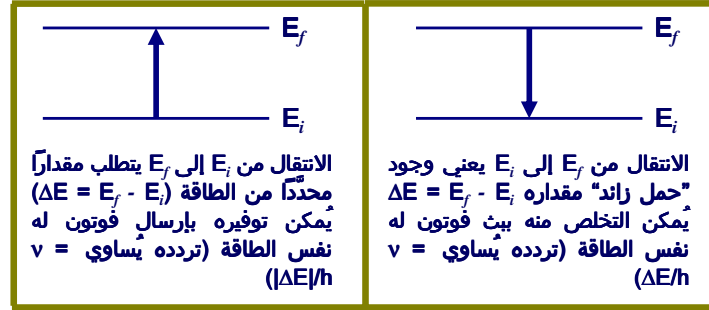
إذا امتصت الذرة الموجودة في مستوى الطاقة E_i فوتوناً طاقته (تردده $h \times$) يساوي الفرق في الطاقة بين هذا المستوى ومستوى أعلى طاقته يساوي E_f فإن الذرة سوف تنتقل من الحالة E_i إلى الحالة E_f

وهذا يُفسر أن طيف الامتصاص شبيه بطيف الاشعاع، فترددات الانتقالات هي نفسها في حالة الاشعاع أو الامتصاص.

61

نموذج بور - طيف الاشعاع وطيف الامتصاص

يبين الرسم التالي تمثيلاً لعملية اشعاع الطاقة وامتصاصها من قبل ذرة الهيدروجين. اتجاه السهم هو اتجاه "الانتقال"



© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 4: Atomic Structure Lecture 15

63

نموذج بور لذرة الهيدروجين وتكميم الطاقة

كان لبور فضل كبير في ادخال مفهوم تكميم الطاقة، أي حقيقة أن الطاقة على المستوى الذري لا يمكن أن تأخذ قيمة متصلة كما هو الحال في ميكانيكا نيوتن.

وعلى الرغم من أن نموذج بور لم يكن كافياً لتفسير جميع الظواهر في المستوى الذري، فقد عمم مفهوم تكميم الطاقة لاحقاً بفضل أعمال شرودينجر (Schrödinger) وآخرين (أنظر المساقات ف 253، ف 352 و ف 353)

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 4: Atomic Structure Lecture 15

62

نموذج بور لذرة الهيدروجين والذرات شبيهة الهيدروجين

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

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

هناك مجموعة من الذرات تُشبه في خواصها ذرة الهيدروجين وهي تلك التي تملك إلكترونات وحيداً في مدار حول الذرة وتسمى الذرات شبيهة الهيدروجين (Hydrogenlike atoms) تنطبق عليها حسابات بور السابقة بوضع الشحنة ($+Ze$) بدلاً من الشحنة ($+e$)، شحنة بروتون نواة الهيدروجين.

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 4: Atomic Structure Lecture 15

64

ميكانيكا الكم Quantum Mechanics

جميع خواص الأنظمة المايكروسكوبية مكمّاة. فالشحنة والكتلة والمتغيرات الديناميكية مثل الزخم الخطي والزخم الزاوي كميات مكمّاة أيضاً. ولا نرى هذه الخواص في المستوى الماكروسكوبي لأننا ببساطة نتعامل مع أنظمة أعدادها الكمية كبيرة جداً.

ابتدع الفيزيائيون إطاراً رياضياً جديداً وأنيقاً للتعامل مع الأنظمة المايكروسكوبية هو ميكانيكا الكم (الفصل الخامس)

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 4: Atomic Structure Lecture 15

Lecture 16

Phys. 251: Modern Physics

Physics Department

Yarmouk University 21163 Irbid Jordan

The Correspondence Principle

© Dr. Nidal Ershaidat

<http://claps.yu.edu.jo/physics/Courses/Phys251/Lec4-5>

المحاضرة ١٦

ف ٢٥١ : فيزياء حديثة ١

قسم الفيزياء - جامعة اليرموك

٢١١٦٣ إربد الأردن

مبدأ الترادف

© د. نضال الرشيدات

67

مبدأ الترادف The Correspondence Principle

تردد الأمواج الكهرومغناطيسية (ν) الصادرة عن جسيم مشحون يسير في حركة دائرية (يتسارع مركزياً) يساوي تردد الدوران ($1/T$) حسب النظرية الكهرومغناطيسية. تُعطى سرعة الإلكترون بالعلاقة:

$$\nu = c \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_0 c^2 r}} = c \sqrt{\frac{\chi}{m_0 c^2 r}} \quad 18-4$$

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi r} = \frac{\sqrt{\frac{\chi}{m_0 r}}}{2\pi r} = c \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\chi}{m_0 c^2 r^3}} \quad \text{فتكون قيمة } \nu \text{ هي:}$$

$$r_n = n^2 \frac{(\hbar c)^2}{m c^2 \chi} = n^2 a_0 \quad \text{وباستخدام العلاقة 14-4}$$

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(\hbar c)^6 \chi^4}{m_0^2 n^6}} = \frac{m_0 c^2 e^4}{8\epsilon_0 (\hbar c)^3} \left(\frac{2}{n^3}\right) = \frac{|E_1|}{h} \left(\frac{2}{n^3}\right) \quad \text{نجد أن:}$$

19-4

68

متى تقترب ميكانيكا الكم من الميكانيكا الكلاسيكية؟

عندما يكون الإلكترون في مدار أبعاده قريبة من المسافات التي نستطيع قياسها، ولنقل $10\mu\text{m}$. تكون قيمة العدد الذري في هذه

$$n = \sqrt{\frac{r_n}{a_0}} = \sqrt{\frac{10^5}{0.53}} \approx 435 \quad \text{الحالة هي:}$$

وطاقة الإلكترون المُرادفة تُساوي: $E_{435} = 13.6/(435)^2 \approx 71 \mu\text{eV}$

إنّ مثل هكذا ذرّة غير موجودة عملياً لأنّ إلكترونها لا يحتاج إلى طاقة كبيرة لمغادرتها. ومع ذلك فإنّ هكذا ذرّة، من حيث المبدأ، يمكن أن تكون موجودة نظرياً.

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 4: Atomic Structure Lecture 16

انتقال الذرة من المستوى n إلى المستوى n-p

حسب نموذج بور يكون تردد الفوتون الناتج عن مثل هذا الانتقال هو:

$$v = \frac{c}{\lambda} = c R \left(\frac{1}{(n-p)^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{E_1}{h} \left(\frac{n^2 - (n-p)^2}{n^2 (n-p)^2} \right)$$

فتكون قيمة v هي:

$$v = c R \left(\frac{2np - p^2}{n^2 (n-p)^2} \right) \xrightarrow{n \gg p} c \frac{E_1}{h c} \left(\frac{2p}{n^3} \right)$$

ولقيمة p=1 نجد بالضبط قيمة التردد التي تُعطيها النظرية الكهرمغناطيسية.

$$v = c \frac{E_1}{h c} \left(\frac{2}{n^3} \right) \quad 20-4$$

ولمضاعفات لـ p (أي p=1,2,3,...) نجد مضاعفات (توافقية) لقيم التردد السابقة!

مبدأ الترادف The Correspondence Principle

لأعداد كمية كبيرة (n > 400)، وجدنا العلاقة 4-20 التي تُعطي التردد بين مستويين n و n-p وهو نفس التردد الناتج عن النظرية الكهرمغناطيسية (العلاقة 4-19).

للأعداد الكمية الكبيرة جداً تُؤول نتائج ميكانيكا الكم إلى نتائج الميكانيكا الكلاسيكية.

صاغ بور هذه الحقيقة وتسمى

مبدأ الترادف Correspondence Principle

The Correspondence Principle

فرضية بور الأصلية

درسنا نموذج بور بناءً على معرفتنا بموجات دي بروي. ولكن حقيقة الحال أن بور وضع فرضية بسيطة تستند على تكميم الزخم الزاوي والتي تؤدي باستخدام مفاهيم الميكانيكا الكلاسيكية إلى ميكانيكا الكم

افترض بور أن الإلكترون يدور في مدار مستقر، دون اشعاع للطاقة، إذا فقط إذا كان زخمه الزاوي يساوي عدداً صحيحاً من \hbar (ثابت بلانك مقسوماً على 2π).

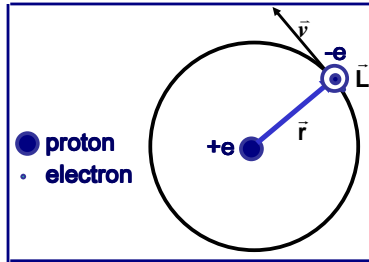
$$L = m v r = n \hbar \quad 21-4$$

يظهر في هذه العلاقة المزج بين الميكانيكا الكلاسيكية (الحد الأيسر)، التي تتعامل مع الخواص المادية للإلكترون وميكانيكا جديدة أساسها العدد الصحيح n وثابت بلانك!

الزخم الزاوي للالكترون

يبين الشكل التالي الزخم الزاوي للالكترون والمعرف بالعلاقة:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m \vec{v} = \begin{cases} m \vec{v} r \\ \vec{r}, \vec{v} \text{ \& } \vec{L} = \text{a right handed system} \end{cases}$$



بور ودي بروي

بالعودة إلى العلاقة (21-4) نجد فرضية دي بروي:

$$2 \pi r = n \lambda$$

21-4

والتي تقول، كما قلنا سابقاً، أن الالكترون يدور في مدار مستقر، دون اشعاع للطاقة، إذا وفقط إذا كان محيط مداره يحوي عدداً صحيحاً من طول الموجة المصاحبة له.

طاقة الالكترون الكلية حسب فرضية بور الأصلية

$$r = \frac{n \hbar}{m_0 v} = \frac{n \hbar}{m_0 c \sqrt{\frac{\chi}{m_0 c^2 r}}}$$

وباستخدام العلاقة 15-4 التي تعطي السرعة نجد أن (أنظر المسألة 8 من كتاب Beiser):

$$r = \frac{n^2 \hbar^2}{m_0^2 c^2 \frac{\chi}{m_0 c^2 r}} = \frac{n^2 \hbar^2 c^2}{m_0 c^2 \chi}$$

وبالتربيع

$$E_n = -\frac{\chi}{2 r_n} = -\frac{m_0 c^2 \chi^2}{2 (\hbar c)^2} \left(\frac{1}{n^2} \right) = -|E_1| \left(\frac{1}{n^2} \right)$$

ومنها:

$$|E_1| = \frac{m_0 c^2 \chi^2}{2 (\hbar c)^2} = 13.6 \text{ eV}$$

حيث

وهو التعبير الذي وجدناه باستخدام منطق دي بروي.

Lecture 16

Phys. 251: **Modern Physics**
Physics Department
Yarmouk University 21163 Irbid Jordan
Problems in Atomic Structure

المحاضرة ١٦

ف ٢٥١ : فيزياء حديثة ١
قسم الفيزياء - جامعة اليرموك
٢١١٦٣ إربد الأردن
مسائل : التركيب الذري

© د. نضال الرشيدات

المسألة 1:

ما هو قطر التصادم لبروتون طاقته 1.00 MeV ساقط على نواة من الذهب؟

قطر التصادم هو المسافة التي تكون عندها طاقة حركة البروتون تُساوي بالضبط طاقة وضعه الكهربائية، أي

$$D = \frac{K Z e \times e}{T_p} = \frac{\chi}{T_p} = \frac{79 \times 1.44 \text{ MeV F}}{1.00 \text{ MeV}} = 113 \text{ F}$$

وتسمى هذه المسافة أيضاً مسافة أكثر اقتراب (distance of closest approach)

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 4: Atomic Structure Lecture Problems

80

المسألة 2:

ما هو أقصر طول موجة في سلسلة براكيت؟

الحل: سلسلة براكيت هي السلسلة التي يكون الانتقال فيها إلى المستوى $n=4$ من المستويات $5 \leq n \leq \infty$. أقصر خط طول موجة λ_{\min} هو ذلك المرادف لأبعد انتقال (ΔE أكبر ما يمكن)، أي أن:

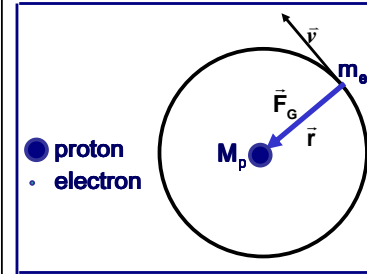
$$\frac{1}{\lambda_{\min}} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{\infty^2} \right) = \frac{R}{16} \rightarrow \lambda_{\min} = \frac{16}{0.001096} = 14598 \text{ \AA}$$

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 4: Atomic Structure Lecture Problems

المسألة 3:

بافتراض أن الجاذبية هي المسؤولة عن تماسك ذرة الهيدروجين، جد نصف قطر المستوى الأرضي، وطاقة تأيين ذرة الهيدروجين.

الحل: قوة الجاذبية بين الإلكترون والبروتون تُساوي



$$\vec{F}_G(r) = -G \frac{m_e \times M_p}{r^2} \hat{r} = -\frac{\chi_G}{r^2} \hat{r}$$

حيث:

$$\chi_G = G m_e M_p = \frac{G m_e c^2 M_p c^2}{c^4}$$

© Dr. N. Ershaidat Phys. 251 Chapter 4: Atomic Structure Lecture 14

المسألة 3: نصف قطر المدار الأول

$$\chi_G = G m_e M_p = \frac{6.673 \times 10^{-11} \times 0.511 \times 10^6 \times 940 \times 10^6}{(3 \times 10^8)^4}$$

$$\chi_G = 0.24732 \text{ eV } \overset{\circ}{\text{A}}$$

يكفي استبدال الثابت في حالة التفاعل الكهرومغناطيسية بالثابت في حالة التفاعل الجاذبي في كافة التعابير الرياضية التي حصلنا عليها من العلاقة 4-14 التي تُعطينا نصف قطر المدار الدائري نجد أن:

$$r_n = n^2 \frac{(\hbar c)^2}{m c^2 \chi_G} = n^2 a_{0G} \quad \text{G-14-4}$$

$$a_{0G} = r_{1G} = \frac{(1970)^2}{511000 \times 0.247} = 30.75 \overset{\circ}{\text{A}}$$

المسألة 3: طاقة التأيين

$$E_{nG} = -\frac{\chi_G}{2 r_{nG}} = -\frac{0.247 \text{ eV } \overset{\circ}{\text{A}}}{2 \times 30.9} \cong -4.00 \text{ meV} \quad \text{G-9-4}$$

لنحسب النسبة بين نصف قطر المدار في حالة التفاعل الكهرومغناطيسي ونصف قطر المدار في حالة تفاعل الجاذبية:

$$\frac{a_{0G}}{a_0} = \frac{r_{1G}}{r_1} = \frac{\chi}{\chi_G} = \frac{14.4}{0.247} \cong 58.3 = \frac{r_{nG}}{r_n}$$

$$a_{0G} \cong 58.3 \times a_0 = 30.9 \overset{\circ}{\text{A}} \quad \text{ومنها نجد:}$$

$$E_{nG} = \frac{\chi_G}{\chi} \frac{r_n}{r_{nG}} = \frac{0.247}{14.4} \frac{.53}{30.9} \cong 2.94 \times 10^{-4} \quad \text{وفي حالة الطاقة:}$$

$$E_{1G} \cong 2.94 \times 10^{-4} \times E_1 = -0.004 \text{ eV}$$

Next Lecture

الجلسة القادمة

الفصل الخامس: ميكانيكا الكم

Chapter 5 Quantum Mechanics

End of Lecture 16