Chapter 4 continued\_ The Bohr Theory

نجح بور Bohr في تفسير الطيف الخطيLine Spectrum لذرات الهيدروجين وذلك بوضع فرضية جديدة وهي أن الزخم الدائري مكمم angular momentum is quantizedأي يأخذ قيما محددة فقط وليس أي قيمة كما في الفيزياء الكلاسيكية.

يبين الشكل أدناه الطيف المرئي لذرة الهيدروجين وهو يتكون من أربعة خطوط وهذه الخطوط هي جزء من



سلسلة كبيرة من الخطوط تدعى سلسلة بالمرBalmer series ولكن باقي السلسلة يقع في المنطقة فوق البنفسجية كما في الشكل 4.20 وبالتالي لا يمكن رؤيتها بالعين (ولكن بإمكاننا التأكد من وجودها باستعمال أفلام فوتوغرافية حساسة لها). وهذا الطيف الناتج عن الضوء المنبعث من الذرات المتهيجة يدعى طيف الانبعاثEmission Spectrum وستقومون بهذه التجربة في المختبر حيث يتم تهييج الذرات عن طريق تمرير تيار كهربائي في أنبوب زجاجي مغلق يحتوي على الغاز المراد دراسته كما في الشكل(b) أدناه. يتم تحليل الطيف إلى أطوال الموجات المختلفة عن طريق تمريرالضوء في منشور أو تمريره في محززة diffraction grating



لنحصل على خطوط الطيف أما إذا استعملنا ضوءا أبيض كالضوء المنبعث من الأجسام السوداء الساخنة جدا فنحصل على طيف متواصل بكافة ألوان الطيف ولكن إذا وضعنا غازا باردا في طريق الضوء الأبيض كما في الشكل(a) أعلاه فتظهر خطوط سوداء في نفس موجات الطيف التي ظهرت في الشكل (b) . هذه الخطوط السوداء هي خطوط طيف الامتصاصAbsorption Spectrum وتكون دائما متطابقة مع خطوط طيف الانبعاث Emission Spectrum لنفس الغاز، أي أن الذرات تمتص نفس أطوال الأمواج التي تطلقها.

يظهر الشكل أدناه طيف الامتصاص Absorption Spectrum الموجود في الأشعة التي تصلنا من الشمس ومن هذا الطيف نستطيع أن نستنتج نوع الغازات المحيطة بسطح الشمس حيث تمتص ذرات هذه الغازات



 أمواجا محددة من أشعة الشمس مما يترك فيها خطوطا سوداء كما نرى. وبإمكاننا بنفس الطريقة أن نعرف نوع الغازات المحيطة بأي نجم في الكون. ومن أشهر الخطوط الموجودة في طيف الامتصاص لضوء الشمس Absorption Spectrum of Sun light خطا الصوديومSodium D lines المشار لهما بالحرف D واللذان يقعان في منطقة الضوء الأصفر (وهما اللذان يعطيان اللون الأصفر لمصابيح الصوديوم الموجودة في بعض شوارعنا). كان خطا الصوديومSodium D lines النقطة الأساسية في تجربة Kirchhoff في العام 1859 التي تظهر في الشكل 4.19 في كتابنا حيث وضع بخار الصوديوم في طريق ضوء الشمس قبل تحليله فوجد أن خطا الصوديوم أصبحا أوضح حيث قامت ذرات الصوديوم بامتصاص ما تبقى من أشعة بهاتين الموجتين وبذلك أثبت وجود ذرات صوديوم في الغلاف الخارجي للشمس الأقل سخونة من سطحها.

كانت نقطة البداية في فهم طيف الهيدروجين حين اكتشف السويسري بالمرBalmer (وكان أستاذ مدرسة) عن طريق التجربة والخطأ أن أطوال أمواج الهيدروجين الأربعة المرئية والتي كان قد قاسها بدقة السويدي أنجستروم تحقق المعادلة 4.88 حيث تتخذn الأرقام الصحيحة = n3 ، 4، 5،... وقام بنشر نتائجه في العام 1885 وسرعان ما تم قياس باقي أطوال الأمواج في سلسلته التي تقع في الجزء فوق البنفسجي وكانت مطابقة لمعادلته باستعمال أرقام صحيحة أكبر مما دفعه للتنبؤ بوجود سلاسل أخرى كما في المعادلتين 4.19 و 4.20 . وفي الواقع تم اكتشاف عدة سلاسل كما يظهر في الجدول 4.1 ومن الممكن تلخيصها بالمعادلة 4.21 ومن أشهر هذه السلاسل سلسلة لايمانLyman series التي تقع بالكامل في الجزء فوق البنفسجي Ultraviolet وسلسلة باشن Paschen التي تقع بالكامل في المنطقة تحت الحمراء Infrared.

في العام 1913 نشر بور Bohr نظريته حول ذرة الهيدروجين المكونة من إلكترون واحد وبروتون واحد حيث هزت هذه النظرية أركان الفيزياء الكلاسيكية وكانت مبنية على الفرضياتassumptions التالية:

1. يدور الإلكترون حول النواة (أي البروتون) في مدار دائري تحت تأثير الجذب الكهربائي (قوة كولومCoulomb force ) أي أنه اعتمد على نموج رذرفوردRutherford النووي.
2. هنالك مدارات محددة يستطيع أن يدور فيها الإلكترون دون أن يشع ويخسر طاقته وبالتالي تكون هذه المدارات مستقرة ويكون لكل مدار مستقر طاقة محددة.
3. تطلق الذرة إشعاعا عندما يقفز أو ينتقل الإلكترون من مداره الحالي إلى مدار آخر أقل طاقة منه وتكون طاقة الفوتون الذي تطلقه الذرة مساوية للفرق بين طاقتي المدارين كما في المعادلة 4.23. نلاحظ هنا أنه اعتمد على ما قاله بلانكPlanck وآينشتاين Einstein حول وجود الفوتونات وعلاقة طاقتها بذبذبتها كما نلاحظ أنه بهذه الفرضية فسر سبب وجود الأطياف الخطية حيث تكون طاقة كل فوتون تطلقه الذرة محددة بقيم معينة كما في المعادلة 4.23 وبالتالي تكون الذبذبات وأطوال الأمواج محددة بقيم محددة وهي القيم التي تظهر في الطيف الخطي. كما تفسر هذه الفرضية التطابق بين طيف الانبعاث وطيف الامتصاص، حيث تستطيع الذرة ان تمتص فوتون طاقته تساوي الفرق بين طاقتي مدارين لكي يستطيع الإلكترون أن ينتقل من المدار الأقل طاقة منهما إلى المدار الأكثر طاقة.
4. المدارات المستقرة stationary states of the electronهي التى يتخذ فيها الزخم الدوراني للإلكترونangular momentum of the electron قيما محددة كما في المعادلة 4.24. وهذه فرضية بور Bohr’s assumptionالجديدة والثورية التي تتناقض مع الميكانيكا الكلاسيكية حيث أدخل مفهوما جديدا وهو تكميم الزخم الدوراني quantization of angular momentum بالإضافة إلى مفهوم تكميم الطاقةquantization of energy الذي أدخله بلانكPlanck . نلاحظ هنا أن قيمة تكميم الزخم الدوراني quantization of angular momentum كما في المعادلة 4.24 تعتمد على الثابت حيث هو نفس ثابت بلانك Planck’s constant الذي استعمله بلانكPlanck لتكميم الطاقة quantization of energy مما يدل على أن هذا الثابت هو أساسي في عملية التكميم quantization .

وباستعمال هذه الفرضيات الأربع نستطيع أن نحصل على طاقات المدارات المستقرة للإلكترون في ذرة الهيدروجين وبالتالي على الطيف الخطيline spectrum لذرة الهيدروجين. ونبدأ بملاحظة أن طاقة الذرة في مدار معين تتكون من طاقة حركةkinetic energy وطاقة وضع electric potential energy ناتجة عن قوة الجذب الكهربائي بين الإلكترون والبروتون كما في المعادلة 4.25. (نلاحظ أننا نقول طاقة الذرة وليس طاقة الإلكترون وحده لأن البروتون يلعب دورا في طاقة الوضع كما يلعب دورا صغيرا في طاقة الحركة كما سنرى لاحقا).

والإن نطبق قانون نيوتن الثاني Newton’s Second Lawعلى حركة الإلكترون حيث أنه يتسارع نحو المركز وحاصل ضرب كتلة الإلكترون بهذا التسارع المركزيCentripetal acceleration يجب أن يساوي القوة المتجهة نحو المركز Centripetal force وهي قوة كولوم بينه وبين البروتون فنحصل على المعادلة غير المرقمة التي تلي المعادلة 4.25 . ومن هاتين المعادلتين نستطيع التوصل إلى المعادلة 4.26 و بعد ذلك المعادلة 4.27 والتي تظهر أن طاقة الذرة الكلية سالبة مما يدل على أن الإلكترون والبروتون مربوطين ببعضهماbound system وأننا نحتاج إلى طاقة لفصلهما عن بعضهما.

من معادلة 4.24 التي تنص على تكميم الزخم الدوراني quantization of angular momentum نستنتج أن

وبتعويض هذه النتيجة في 4.26 نحصل على النتيجة 4.28 والتي تدل على أن الإلكترون يستطيع الدوران فقط في مدارات محددة بأنصاف أقطار محددة حول النواة (وليس أي نضف قطر كما في الميكانيكا الكلاسيكية) كما نرى في الشكل 4.23 ونرى من ذلك أن هذا ناتج عن فرضية تكميم الزخم الدوراني quantization of angular momentum التي أدخلها بورBohr وأن نصف القطر يحقق المعادلة

حيث هو نصف قطر أصغر مدار لللإلكترون وبالتالي هو نصف قطر الذرة في حالتها العادية وقيمته حسب المعادلة 4.29 هي 0.529 أنجستروم 0.529Ǻ وهو ما يتفق مع نصف قطر الذرة الذي كان قد تم قياسه عمليا وهذا ما اعتبر في حينه نصرا لنظرية بور. Bohr

وبتعويض قيمة أعلاه في المعادلة 4.27 نحصل على المعادلة 4.30 التي تعطي القيم المسموح بها لطاقة ذرة الهيدروجين allowed energies of the H atom والتي تعطينا عدديا النتيجة 4.31 وهي أن قيمة طاقة ذرة الهيدروجين المسموح بها هي

 (4.31)

والتي عليكم تذكرها واستعمالها دائما.

نلاحظ أن أصغر طاقة لذرة الهيدروجين هي عندما تكون حيث تكون الطاقة وهذه الحالة تدعى حالة الحضيض ground stateوهي التي تكون الذرة فيها مستقرة بينما الحالة التي تليها في الطاقة هي وتدعى الحالة المتهيجة الأولىfirst excited state وتكون طاقتها

= ثم تليها الحالة المتهيجة الثانيةsecond excited state وتكون طاقتها= الخ.. كما نرى في الشكل 4.24

وإذا كانت الذرة في حالة متهيجة *ni* طاقتها *Ei* فإنها لا تبقى في تلك الحالة إلا لفترة قصيرة تنتقل بعدها إلى حالة أخرى نهائية *nf*  ذات طاقة أدنى*Ef* وتطلق فوتون تكون طاقته مساوية للفرق بين الطاقتين

وبالتالي تكون ذبذبته كما في المعادلة 4.32 وطول موجته كما في المعادلة 4.33 والتي كما نرى من 4.34 هي العلاقة التي اكتشفها بالمرBalmer بالتجربة وبذلك استطاع بور أن يحصل على قيمة ثابت ريدبرغ Rydberg constant الموجود في علاقة بالمر Balmer (المعادلة 4.21).

ملاحظة: لا حاجة لحفظ كل هذه المعادلات، فقط تذكروا المعادلة 4.31.

ونلاحظ من الشكل 4.24 أن الفوتونات الناتجة عن الانتقال من أية حالة عليا إلى الحالة النهائية= 1 أي لحالة الحضيضground state تعطينا سلسلة لايمن Lyman series بينما تلك الناتجة عن الانتقال من أية حالة عليا إلى الحالة النهائية= 2 أي للحالة المتهيجة الأولى first excited state تعطينا سلسلة بالمرBalmer series وتلك الناتجة عن الانتقال للحالة النهائية= 3 أي للحالة المتهيجة الثانية Second excited state تعطينا سلسلة باشن Paschen series وهكذا. وبذلك استطاع بور Bohrأن يفسر كامل طيف ذرة الهيدروجين.

وبإمكاننا تطبيق نتائج بور لذرة الهيدروجين على أية أيونات تحتوي على إلكترون واحد مثل He+ و Li++ وBe+++ إذا انتبهنا إلى أن شحنة النواة في هذه الحالة هي Ze وليس e حيث Z=2 للهيليوم و Z=3 لليليثيوم الخ...وبالتالي إذا عدنا إلى المعادلات التي قمنا باشتقاقها أعلاه واحللنا Ze محل e نستنتج أن نصف قطر هذه الأيونات يكون أصغر (يتناسب عكسيا مع Z كما في المعادلة 4.35) بينما تتناسب طاقة المدارات المختلفة طرديا مع Z2 كما في المعادلة 4.36.

وكتطبيق على هذه النتيجة الأخيرة نحل المثال 4.6 والذي يتعلق بنجم يدعىZeta Puppis حيث لوحظ أن الضوء المنبعث من هذا النجم يعطي طيفا خطيا شبيها بطيف الهيدروجين كما في علاقة بالمر ولكن باستعمال أنصاف أرقام صحيحة وكما نرى من الحل أن ذلك ناجم عن وجود أيونات الهيليوم He+  في هذا النجم وهذا يؤدي إلى تناسب طاقات المدارات طرديا مع Z2  حيث Z تسوي 2.

Example 4.7 an excited H atom (initially at rest) makes a transition from n=2 state to n=1 state:

1. Find the energy, wavelength and frequency of the emitted photon

لاحظوا أنني بعكس الكتاب لا أستعمل المعادلات المعقدة مثل 4.34 بل استعمل فقط المعادلة 4.31:

Energy of emitted photon = Ei –Ef = E2 –E1= -3.4 eV – (-13.6eV) = 10.2 eV

From we conclude that which gives and

1. Calculate the recoil kinetic energy of the atom.

From conservation of momentum the atom must recoil(ترتد) . The initial total momentum is zero because the atom was initially at rest. So the final momentum must be zero. But the photon has momentum so the atom must have an equal but opposite momentum to make the final total momentum zero and so the atom must recoil!

Katom = = which is a very small quantity but not zero. So the photon does not really take all the 10.2 eV, the atom takes a very small part from it which is

Example 4.9 (page 137): calculate the temperature at which a hydrogen gas will contain many atoms (about 10%) in the first excited state?

في درجات الحرارة العادية تكون الأغلبية الساحقة من الذرات في كمية من غاز الهيدروجين في حالة الحضيضground state ولكن إذا سخنا غاز الهيدروجين إلى درجات حرارة مرتفعة تتهيج بعض هذه الذرات نتيجة الاصطدامات مع بعضها بعضا وتنتقل إلى حالة متهيجة أكثر طاقة (نلاحظ هنا أن الذرة لا تتهيج فقط نتيجة امتصاص فوتون بل أيضا نتيجة الاصطدامات غير المرنة مع بعضها بعضا التي تتحول فيها طاقة الحركة إلى طاقة تهيج داخلية). والسؤال هو ما هي درجة الحرارة المطلوبة؟ سنجيب على السؤال بطريقتين:

الطريقة الأولى تقريبية وهي كما يلي: تحتاج ذرة الهيدروجين إلى 10.2 eV لكي تنتقل من حالة الحضيضground state إلى حالة التهيج الأولى first excited stateولذا فيجب أن تكون قيمة طاقة حركة كل ذرة تقريبا بنفس المقدار حتى تستطيع الذرة أن تكسب طاقة كافية في الاصطدام. نحن نعرف من الثرموديناميكا أن متوسط طاقة الحركة لذرات غاز هي وبالتالي نستطيع أن نفترض:

مما يعطينا أن درجة الحرارة هي حوالي 79,000 K.

الطريقة الثانية تعتمد على أن عدد ذرات الغاز التي تكون في حالة طاقتها E يتناسب مع

 (وهذه النتيجة أيضا من الثرموديناميكا) وبالتالي تكون نسبة عدد ذرات غاز الهيدروجين في حالة التهيج الأولى first excited state وطاقتها E2 إلى عدد ذرات الغاز في حالة الحضيض ground state وطاقتهاE1 هي

منها نستنتج أن درجة الحرارة المطلوبة هي 51,000 K ومع أن الطريقتين تعطيان أرقاما مختلفة بعض الشيء إلا أنهما تتفقان على أن درجات الحرارة المطلوبة عالية جدا ولا تتواجد إلا في داخل النجوم مثل شمسنا.

ملاحظة: صفحة 138 ملغية

Section 4.5 The Correspondence Principleمبدأ التوافق

 وينص هذا المبدأ على وجوب أن يكون هنالك توافق بين أية نظرية قديمة وبين أية نظرية حديثة تحل محلها في الحالات التي كانت النظرية القديمة تعطي فيها الجواب الصحيح. مثلا لا يوجد تكميم للطاقة للأجسام العادية بينما يوجد تكميم للأجسام الصغيرة جدا مثل الذرات. ولكن لننظر إلى ذرة الهيدروجين فكما وجدنا سابقا أن نصف قطرها يزداد مع مربع العدد

فلو كانت كبيرة (مثلا تساوي 20,000 ) لكان نصف قطر الذرة حوالي سنتمترين وبذلك للحالات التي تكون فيها كبيرة يجب أن يكون هنالك توافق بين نظرية بور وبين الفيزياء الكلاسيكية وهذا ما سنثبته.

مثلا سنثبت (راجع المسألة 37 صفحة 149) أنه في مثل هذه الحالات تكون ذبذبة الفوتون الذي تطلقه ذرة الهيدروجين مساويا لذبذبة دوران الإلكترون حول النواة كما تتنبأ الفيزياء الكلاسيكية:

= =

حيث استعملنا المعالات 4.24 و 4.28 و 4.29. بينما حسب نظرية بور للانتقال من الحالة n+1 إلى الحالة nتكون ذبذبة الفوتون (باستعمال المعادلات4.23 و 4.30):

ونلاحظ أن النتيجتين متساويتان إذا كانت nكبيرة بحيث يمكننا إهمال 1 بالمقارنة معn .

Section 4.5 Franck-Hertz Experiment: cancelled (you will do it in 212 lab).

أثبتت تجربة Franck و Hertz أن طاقة الذرة مكممة كما فرض بور ( استعملوا ذرة الزئبق في التجربة) .