الباب الأول
البنيـــــة الذريـــــة

الباب الأول
البنيـة الذريـة

إشعـاع الجسـم الأسـود Black body radiation :

يعطي تسخين جسم ما إشعاعا حراريا تعتمد طبيعته على درجة حرارة الجـسم المشع ، ويعد الإشعاع الحراري شكلاً من أشكال الأشعة الكهرومغناطيسية تمامـا مثل الضوء المرئي ، وهو يتكون عادة من أطوال موجات أطول أي أقل طاقة من الضوء المرئي .

وقـد لـوحظ أن طاقـة الإشـعاع مـن الجـسم الـساخن تنتـشر علـى هيئة طيف مستمر ، أي أنها تعتمد على درجة حـرارة الجـسم ، ففـي طاقـات الحرارة المنخفضة يتكون الطيف غالباً من أشعة ذات طاقة منخفضة في المنطقـة تحت الحمراء ، وكلما ارتفعت درجة الحرارة انزاح الطيف إلى منطقـة الحـرارة الأعلى .

ويثبت ذلك من حقيقة ابتداء الجسم بالإشعاع في المنطقة المرئية كلمـا أصـبح أكثر سخونة ، إذ يصبح أولاً أحمر اللون ومع ارتفاع درجة الحرارة يقتـرب مـن اللون الأبيض، كما يلاحظ في الضوء المتوهج .

وبـصدد دراسـة مثـل هـذا الإشـعاع، وجـد أن النظـام المعـين المرغوب هـو المعـروف بالجـسم الأسـود ، وعنـد سـقوط الإشـعاع علـى سطح ما ، تنعكس بعض الأشعة ويمـتص بعـض منهـا مـن قبـل الـسطح . وتعرف قابلية السطح للامتصاص بأنها: الجزء الساقط من الضوء الممتص علـى السطح .

والجسم الأسود: هـو الـسطح الـذي يمتلـك قابليـة امتـصاص مـساوية واحد ، بمعنى أنه يمتص جميع الأشعة الـساقطة عليـه ، إضـافة إلـى ذلـك ، فقد بين قانون كيرشوف أن نسبة قوة الانبعاث (E) إلى قابلية الامتصاص (A) تكون ثابتة لدرجة حرارة معينة .

$$E_o / A_o = E_1 / A_1$$

وبما أن قابلية المتصاص الجسم الأسود تساوي وحدة واحدة ($A_0 = 1$) ؛ لذلك نلاحظ أن قوة الانبعاث لأي سطح يجب أن تعطى بالمعادلة الآتية : $E = AE_0$

إذ تمثل E_0 قوة الانبعاث الكلية للجسم الأسود ، وبما أنه ليس من الضروري أن تساوي A وحدة واحدة لأي جسم آخر غير الجسم الأسود ، فمن الواضح أنه لا يوجد سطح له القدرة على الإشعاع أكثر قوة من الجسم الأسود ، وعليه فمن الثابت أن الجسم الأسود أكثر الأجسام امتصاصا وأكثرها إشعاعا للطاقة .

وعادة تتكون الأدوات المستعملة في دراسة إشعاع الجسم الأسود من تجويف معزول بصورة جيدة يحتوي على فتحة في أحد الجدران ، على سبيل المثال ، تسخن أنبوبة طويلة بواسطة تيار كهربائي يسري خلال ملف سلكي حول الأنبوبة ويلاحظ الإشعاع عند مروره خلال الفتحة الصغيرة في الجدار .

فإذا احتفظ هذا الفرن بدرجة حرارة ثابتة عرفت محتوياته بالمحتويات متساوية الحرارة ، ومن خلال مناقشة الديناميكا الحرارية ، وجد أن مجال الإشعاع داخل هذا النظام يمتلك بعض الخواص المميزة .

ولقد برهن كيرشوف أنه إذا بقيت الجدران ومحتويات التجويف عند درجة الحرارة الاعتيادية في حالة اتزان فإن سبيل الإشعاع في أي اتجاه يجب أن يكون مساويا للإشعاع في الاتجاه الآخر، كما يجب أن يكون متساويا في أية نقطة في هذا النظام ، ولا تؤثر نوعية المادة المصنوعة منها الجدران على هذه الوضعية .

ولقد أجريت بحوث عديدة حول مسألة إشعاع الجسم الأسود ، أعطى ستيفان علاقة أولية لسرعة انبعاث الطاقة المشعة لكل وحدة مساحة من السطح ، ويعبر عنها بالمعادلة الآتية : $E = e \sigma T^4$

حيث تمثل E فيها سرعة انبعاث الطاقة لكل وحدة مساحة أو قوة الانبعاث

الكلية . وتمثل T درجة الحرارة المطلقة ، و σ كمية ثابتة تعرف بثابت ستيفان – بولتزمان قابلية الإشعاع بدلالة E / E_0 ؛ ولذلك يلاحظ أن الجسم الأسود يمتلك قابلية للإشعاع تساوي وحدة واحدة .

ومن المسائل التي كان لها أهميتها هي توزيع الطاقة في الطيف كدالة لطول الموجة ودرجة الحرارة ، ففي هذه الحالة تكون قوة الانبعاث أحادية الموجة E_λ ذات أهمية وهي الطاقة المنبعثة بين أطوال الموجات λ و $\lambda + d\lambda$.

وقد أجريت محاولات نظرية قبل القيام بأية محاولات عملية لإيجاد توزيع الطاقة لحساب أشكال أطياف الطاقة كدالة لطول الموجة ، ففي محاولة لإيجاد علاقة مناسبة لقوة الانبعاث أحادية الموجة استفاد فين من الطرق الكلاسيكية في الديناميكا الحرارية للحصول على المعادلة الآتية :

$$E_\lambda = \frac{a}{\lambda^5} f(\lambda T)$$

إذ تمثل a ثابتاً و $f(\lambda T)$ دالة طول الموجة ودرجة الحرارة المطلقة، ولإيجاد الدالة $f(\lambda T)$ بات من الضروري أخذ الميكانيكية التي ينبعث بواسطتها الإشعاع بنظر الاعتبار، ومنذ أن بين كيرشوف كون طبيعة الجدران والمادة المشبعة غير مهمة في المحتويات متساوية الحرارة صار من الممكن اختبار النموذج المناسب .

وقد اختار فين جهاز التذبذب السريع ذا الحجم الجزيئي، واستعمل القوانين الكلاسيكية للنظرية الكهرومغناطيسية ، ونتيجة لذلك حصل على المعادلة الآتية :

$$E_\lambda = \frac{a}{\lambda^5} e^{-b/\lambda T}$$

حيث تمثل a و b قيما ثابتة .

وقد تبين فيما بعد أن منحنيات التوزيع المشتقة من معادلة فين تناسب المنحنيات التجريبية في منطقة الطاقة العالية والتي لها أطوال موجات قصيرة بصورة جيدة جدا ، لكن معادلة فين فشلت كليا في إعطاء التوزيع الطيفي الصحيح لأطوال الموجات جميعها .

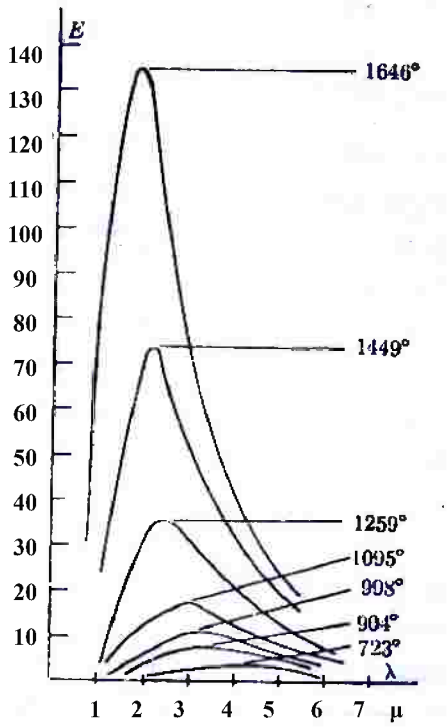
وكذلك ، أجرى رايلي محاولة نظرية أخرى لإيجاد قانون التوزيع ؛ إذ استعمل

القواعد الكلاسيكية للانتشار المتساوي للطاقة، وحصل على العلاقة المعروفة بمعادلة رايلي – جينس .

$$E_\lambda = \frac{2\pi k T}{\lambda^4}$$

ولقد لوحظت هذه المعادلة بأنها تعطي توافقاً جيدا مع التوزيع الطيفي الملاحظ في منطقة الطاقة المنخفضة أي ذات الطول الموجي الواسع، ولكنها فشلت حتى في الوصول إلى القيم الملاحظة في المنطقة عالية الطاقة من الطيف .

ويبين الشكل التالي النتائج التي حصل عليها لومر من التجارب التي قام بإجرائها لإيجاد توزيع الطاقة المنبعثة من الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة.



طيف الطاقة للجسم الأسود عند درجات الحرارة المختلفة

وكما يلاحظ من الشكل التالي تعطي معادلة فين توافقاً ممتازا مع التجربة في منطقة أطوال الموجات القصيرة ، وتظهر معادلة رايلي – جينس صحيحة عند أطوال موجات واسعة جدا ، ولكن لا يتوافق كل من المعادلتين مع المنحنيات

التجريبية على معدل طيفي كامل .

وفي محاولة لجعل الطيف التجريبي الكلي لإشعاع الجسم الأسود يتناسب مع القيم ، وضعت صيغ أولية أعتقد بأنها تناسب القيم من $\lambda \to 0$ إلى $\lambda \to \infty$ ، ومن الأمثلة لإحدى هذه الصيغ : $E = cT^{5-\mu} \lambda^{\mu} e^{-b/(\lambda T)^{v}}$ التي تم الحصول فيها حين تكون $\mu = 0$ و $v = 1$ على معادلة فين ، وحين تكون $\mu = 4$ و $b =$ صفر يتم الحصول على معادلة رايلي – جينس ، ومع أن لهذه المعادلة بعض الاستعمالات، إلا أنه من الصعب فهمها ، لكن العلاقة التي توصل إليها ماكس بلانك كانت من أكثر الفرضيات تأثيرا في هذا المجال .

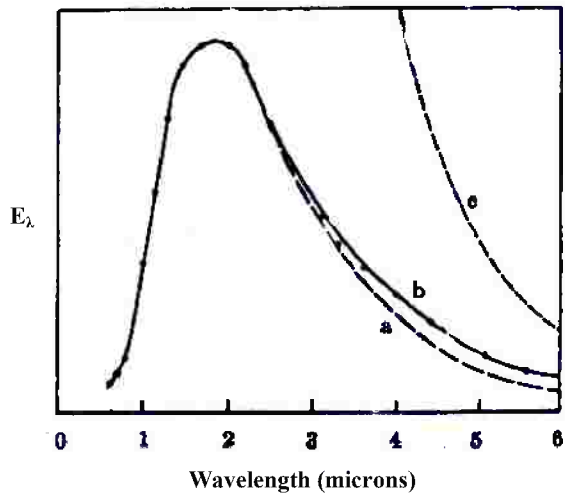
وللسبب نفسه الذي مكّن فين من استعمال أي نوع معقول من المواد المشعة للطاقة كان بلانك قادرا أيضا على مثل هذا الاختيار ، فقد كان النظام قادرا على بعث وامتصاص الأشعة ، ومن بين الأنواع البسيطة لأغراض الحسابات مجموعة من أجهزة التذبذب التوافقي .

وبحسب القوانين الكلاسيكية ، ينبغي أن يؤخذ جهاز لتذبذب الطاقة بصورة مستمرة، كما يجب أن يعمل على بعث الطاقة باستمرار . على أية حال ، لإيجاد علاقة تناسب الطيف المستنتج تجريبيا للجسم الأسود المشع ، فمن الضروري أن يحتوي قانون التوزيع لبلانك على درجة الحرارة بشكل λT أو بما أن $\lambda = C / v$ فمن الممكن أن تكون بشكل T / v أو v / T . ونتيجة لذلك ، فإن الكم من الطاقة (quantum of energy) ε_0 يجب أن يتناسب إلى $\frac{1}{\lambda}$ أو يتناسب مع v (الكمية المساوية إلى $\frac{1}{\lambda}$) .

لذلك ، نجد أن $\varepsilon_0 = hv$ ، إذ تمثل h ثابتاً جديدا يعرف بثابت بلانك (القيمة المقبولة في الوقت الحاضر هي 6.62×10^{-27} أرك – ثانية) . وبالتعويض ، يصبح قانون بلانك للتوزيع بالشكل الآتي :

$$E_{\lambda} = \frac{2\pi hC^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1}$$

في حين فشلت قوانين توزيع الطاقة لإشعاع الجسم الأسود المشتقة من الفرضيات الكلاسيكية في تفسير القيم التجريبية ، ويتضح أن فرضية الكم لبلانك قد تكللت بالنجاح ، ويبين الشكل التالي المقارنة بين منحنيات التوزيع لفين ورايلي – جينس وبلانك والقيم التجريبية الحقيقية :



مقارنة مع التجربة لثلاثة قوانين للأشعة . (a) فين ، (b) بلانك ، (c) رايلي – جينس . تمثل النقاط القيم التجريبية

حيث يمثل الخط الكامل المنحنى النظري الذي استنتجه بلانك ، وتمثل النقاط المنحنى المستنتج بالتجربة ، ويلاحظ هنا التطابق الجيد للمنحنى التجريبي مع المنحنى النظري لبلانك ، في حين فشلت المنحنيات الكلاسيكية التي استنتجها فين ورايلي عند إحدى نهايتي الطيف أو الأخرى .

ويمثل نقض بلانك للنظرية الكلاسيكية نقضا حقيقيا؛ فهو لا يشمل امتدادا للأفكار الكلاسيكية، ولكنه تغير جذري عن خط الاعتقاد السائد في تلك الفترة بعكس الفكرة الكلاسيكية في كون جهاز التذبذب يمتص ويشع الطاقة باستمرار من أطوال موجات تتراوح من الصفر إلى ما لا نهاية .

ولقد افترض بلانك أن الطاقة يجب أن تنبعث أو تمتص على شكل كميات محددة فقط ، ويتضمن ذلك أن النظام القادر على بعث الأشعة يجب أن يمتلك مجموعة من حالات الطاقة .

ويحدث الانبعاث فقط حين يتغير النظام من إحدى هذه الحـالات إلـى حالـة أخرى ، ولا توجد حالات وسطية للطاقة؛ لذلك قد نجد جهاز تذبذب يمتلـك طاقـة تساوي **2 hv** ، لكننا لا نجد جهازا بطاقة مقدارها **1.5 hv** .

التأثير الكهروضوئي (Photoelectric effect) :

لقد افترض أينشتاين (**Einstein**) بأن الخواص الكمية لا ينبغـي أن تكـون محددة لعمليتي الامتصاص والانبعاث وحدهما، وإنما ينبغي أن تنطبق على الإشعاع نفسه ، يعني ذلك أن الأشعة الكهرومغناطيسية تتكون من جسيمات صغيرة يطلـق عليها الآن بالفوتونات (**photons**) .

وهذه الفوتونات تمتلك طاقة مقدارها **hv** وتنطلق في الفراغ بسرعة الـضوء ، مثل هذه التغييرات الجذرية التي افترضها بلانك وأينشتاين لا يمكن قبولهـا بـدون الحقائق التجريبية العديدة لإثباتها ، وقد توفرت هذه الأدلة التجريبية ونجحت نظرية الكم نجاحا بيناً .

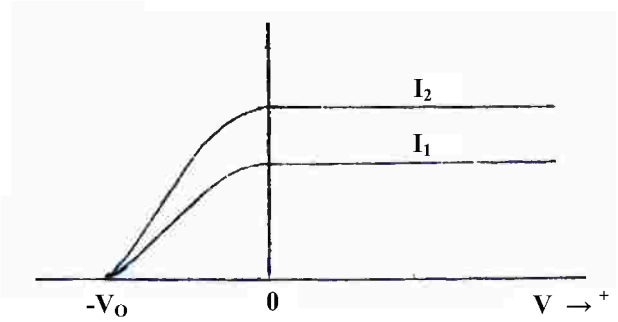
ويعد التوضيح المقنع الذي قدمه أينشتاين للتأثير الكهروضوئي من الانتصارات الأولى لنظرية الكم . أما هرتز (**Hertz**) فقد لاحظ أن السطح الفلـزي يكتـسب الشحنة الموجبة عند سقوط الأشعة فوق البنفسجية عليه ، وهذا يعني أنه بطريقة ما تزاح الشحنات السالبة ، وبعد اكتشاف الإلكترون وجد أن هذه الشحنة تحمل بعيـدا بواسطة الإلكترون .

وهناك مظهران مهمان للإلكترون في التأثير الكهروضوئي يمكن ملاحظتهمـا بالتجربة، هما : الطاقة وعدد الإلكترونات المنبعثة من السطح الفلـزي ، وهنـاك مشاكل وصعوبات في تفسيرها .

وبحسب النظرية الكهرومغناطيسية الكلاسيكية ، تزداد طاقة الإلكترون المنبعث مع الزيادة في شدة الضوء المستعمل ، كذلك يجب أن يتوقع أنه إذا استمر سـقوط الضوء على سطح فلزي لفترة كافية من الزمن فإن الإلكترونات تنبعث بغض النظر عن تردد الضوء الساقط .

ولكنه لوحظ عكس ذلك تماما ، إذ فشلت الزيادة في شدة الضوء في زيادة الطاقة إلا أنها رفعت من عدد الإلكترونات المنبعثة ، كذلك لوحظ أنه إذا كان تردد الضوء الساقط أقل من قيمة معينة فإن الإلكترونات لا تنبعث بغض النظر عن طول الفترة التي يتعرض لها السطح للأشعة .

يلاحظ في الشكل التالي أنه للشدة المعينة من الضوء I_1 أو I_2 يتم الحصول على تيار معين (i) عند استخدام فرق جهد موجب على الصفيحة التي تتجمع عليها الإلكترونات . وعلى أية حال .



تأثير فرق الجهد على التيار الكهروضوئي الناتج بواسطة شعاع ضوئي أحادي المرحلة

وكلما انخفض فرق الجهد إلى الصفر ومن ثمة إلى قيمة سالبة ينخفض التيار إلى الصفر ، وقد وجد للضوء عند طول موجي معين – بغض النظر عن الشدة – أن التيار ينخفض إلى الصفر عند نقطة مثل V_0 .

لذلك يلاحظ أن عدد الإلكترونات المنبعثة من السطح لكل وحدة زمن يتناسب طرديا مع شدة الضوء ، لكن فرق الجهد التوقف . V_0 لا يعتمد على الشدة، وأن هذه الفرضيات لا تتوافق كلها مع فرضيات النظرية الكلاسيكية .

كذلك للتأثير الكهروضوئي كما لإشعاع الجسم الأسود . فشلت النظرية الكلاسيكية في توضيح الملاحظات التجريبية، من ناحية أخرى استطاع أينشتاين استخدام نظرية الكم لبلانك بنجاح كبير جدا .

إذ ينبعـ..ث الإلكتـ..رون مـ..ن الـ..سطح الفلـ..زي بطاقـ..ة حركيـ..ة مـ..ساوية لطاقـ..ة الفوتـ..ون الـ..ساقط ناقـ..صا الطاقـ..ة . **hv** . اللازمـ..ة للانبعـ..اث مـ..ن الـ..سطح ، وبمـ..ا أن طاقـ..ة الفوتـ..ون هـ..ي **hv** تـ..صبح العلاقـ..ة لطاقـ..ة الإلكتـ..رون الـ..ضوئي (**Photoelectron**) بالـ..شكل الآتي : $\mathbf{KE = \frac{1}{2}mv^2 = hv - W}$.

وبدلالة نظرية الكم تصبح المنحنيات في الشكل السابق معقولة تمامـ..ا ، فـ..إذا كانت طاقة الفوتون الساقط أكبر من **W** انبعث الإلكترون الضوئي ، كما أن فـ..رق الجهد السالب اللازم لإيقاف انبعاث الإلكترون الضوئي هو $\mathbf{V_0}$. وحين تزداد شدة الضوء ، مثل ($\mathbf{I_1}$ إلى $\mathbf{I_2}$) يلاحظ تيارا أكبر بـ..سبب قـ..صف (**Bombarded**) السطح بعدد أكبر من الفوتونات التي تعطي بدورها عددا أكبر مـ..ن الإلكترونـ..ات الضوئية، ومن ناحية أخرى ، إذا كانت طاقة الفوتون الساقط أقل مـ..ن **w** . فـ..إن الإلكترونات الضوئية لا تنبعث .

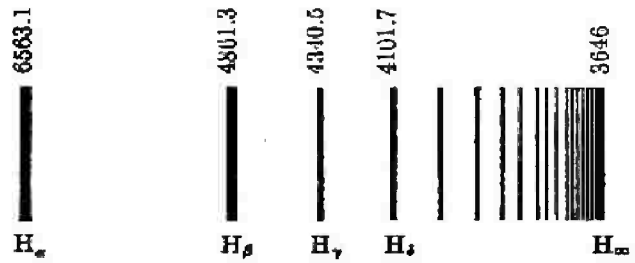
وهذا صحيح بغض النظر عن شدة الضوء الساقط أو طول الفترة التي يتعرض فيها السطح الفلزي للأشعة الضوئية ؛ وذلك لأن الإلكترون لم يستلم طاقة كافية من فوتون واحد تمكنه من الانبعاث .

الأطيـاف الذريـة (Atomic spectra) :

في الوقت نفسه، والذي كان الاهتمـ..ام فيـ..ه مركـ..زا علـ..ى مـ..سألة إشـ..عاع الجسم الأسود ، حدث تطور مشابه في مجـ..ال الأطيـ..اف الذريـ..ة ؛ فقـ..د وجـ..د أنه إذا حدث تفريغ كهربائي خلال عنصر في الحالة الغازية ، انبعث الضوء مـ..ن هذا العنصر .

وعنـ..د تحليـ..ل هـ..ذا الـ..ضوء بواسـ..طة موشـ..ور أو مقيـ..اس الطيف (**Spectr ometer**) يتبين أنه يتكون من سلسلة من الخطوط الحـ..ادة ذات طـ..ول مـ..وجي محـ..دد يبـ..رهن بأنهـ..ا مـ..ن مميـ..زات العنـ..صر المعـ..ين فـ..ي حالـ..ة العنـ..صر الخفيـ..ف مثـ..ل الهيـ..دروجين، حيـ..ث يكـ..ون هـ..ذا الطيـ..ف

الخطي (**line spectrum**) بسيطاً ، كما هو مبين في الشكل التالي، ولكنه يكون معقدا جدا في حالة العناصر الثقيلة .



الأطياف الخطية للهيدروجين الذري في المنطقة المرئية

وقد تجمعت كميات كبيرة من القيم الطيفية خلال السنوات الأولى ، وقد جـ.رت العادة على أن الاهتمام الأول هو الحصول على علاقـ.ـة أوليـ.ـة لافتـ.ـراض ذـ.ـسق وترتيب هذه الخطوط .

وهكذا تبين أن ترتيب هذه الخطوط ليس صدفة لكنها تتبع نوعا ما من النظام . فلقد اتضح لكل من ليفنك (**Living**) وديوار (**Dewar**) أن عدة سلاسل ممكنة توجد في أطياف الفلزات القلوية وفلزات الأتربة القلوية .

وبالرغم من أنهما لم يتمكنا من اشتقاق علاقة أولية لافتراض هذا النظـ.ـام ، إلا أنهما استطاعا معرفة تكرار متغيرا لمجاميع من الخطوط ، كما تظهر العلاقة بـ.ـين هذه الخطوط حادة أو متداخلة بعد ذلك ، ولقد اكتشف بالمر (**Balmer**) المعادلـ.ـة الآتية : $\lambda = \lambda_0 \frac{m^4}{m^2 - 4}$

إذ تربط الخطوط التسعة التي كانت معروفة فـ.ـي تلـ.ـك الفتـ.ـرة لطيـ.ـف ذرة الهيدروجين ، في هذه الحالة ، تمثل λ_0 ثابتاً يأخذ القيمة **3646** أنجستروم . وتمثل **m** عددا صحيحا متغيرا يأخذ القيم **3** ، **4** ، **5** .. **0** ... ∞ ، وقد تبـ.ـين أن القـ.ـيم الملاحظة للخطوط في طيف الهيدروجين، والقيم المحسوبة من معادلة بـ.ـالمر فـ.ـي توافق جيد .

ويعبـ.ـر عـ.ـن هـ.ـذه المعـ.ـادلات اعتياديـ.ـا بدلالـ.ـة العـ.ـدد الموجي ، $\bar{\nu}$ **(Wave number)** عوضا عن طول الموجة ، يعطي تردد الموجـ.ـة

بواسطة العلاقة $c = v / \lambda$ ويمثل عدد التذبذبات لكل ثانية ، ويعطي العدد الموجي بالعلاقة $\bar{v} = 1 / \lambda$ وهو عدد التذبذبات لكل سنتيمتر ، وبدلالة العدد الموجي تأخذ معادلة بالمر الشكل المألوف الآتي :

$$\bar{r} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$

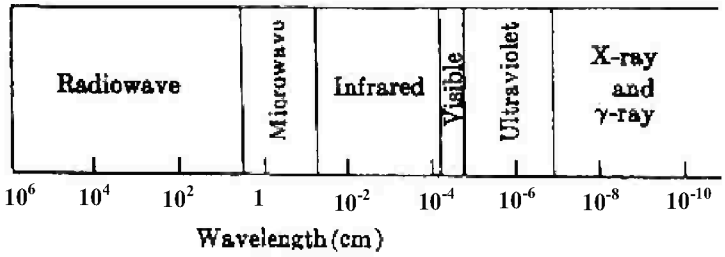
أو بصورة أكثر عموما ، يمكن التعبير عنها بالشكل الآتي :

$$\bar{v} = R\left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$

إذ تمثل (R) ثابتاً يعرف بثابت رايدبرج (**Rydberg constant**) ، و(a) ثابتاً يعتمد على السلسلة الطيفية المعينة و(m) عددا صحيحا متغيرا، وق.د وج.د ثابت رايدبرك بأنه ثابت للعنصر المعين ، وثاب.ت لجمي.ع العناص.ر ، ويع.ود الاختلاف في قيمته إلى الوزن الذري للعنصر ، وهو يأخ.ذ القيم.ة **109677.58** سم$^{-1}$ للهيدروجين .

معادلـة بالمـر :

في الوقت الذي تم اكتشاف سلسلة بالمر ، كان الجزء الوحيد المع.روف م.ن الطيف الكهرومغناطيسي هو المنطقة المرئية ، ومن المعروف في الوقت الحاض.ر أن هذه المنطقة تمثل جزءا بسيطًا جدا من الطيف الكلي الذي يتراوح بين الط.ول الموجي **4000 – 8000** إنجستروم ، كما هو مبين في الشكل التالي :



تقسيم بسيط للطيف الكهرومغناطيسي

وهكذا بعد اكتشاف سلسلة بالمر فمن غير المدهش اكتشاف سلاسل أخ.رى ، من النوع العام نفسه ، في طيف الهيدروجين وجدت سلسلة ليمان (**Lyman**) ف.ي المنطقة فوق البنفسجية وسلاسل كل من باشن (**Paschen**) وبراكيت (**Brackett**)

وفند (**Pfund**) في المنطقة تحت الحمراء .

كما أن المعادلة التي تصف كل سلسلة تأخذ الشكل نفسه كما في معادلة بالمر ، والاختلاف الوحيد هو الفرق بقيم الحد، والقيمة الصغرى للحد **a** في المعادلة السابقة ، حين تكون **m = 1** تنتج سلسلة ليمان ، في حين تنتج سلاسل كل من باشن وبراكيت وفند حين تأخذ **a** القيم **3** و **4** و **5** على التوالي .

وبعد اكتشاف معادلة بالمر ، وجد رايدبرج معادلة ذات خاصية أكثر عمومًا ، واستطاع أن يبين إمكانية تمثيل العدد الكبير من السلاسل الملاحظة بواسطة المعادلة الآتية :

$$\bar{\nu}_n = \bar{\nu}_\infty - \frac{R}{(n+b)^2}$$

إذ تمثل كل من **b** و $\bar{\nu}_\infty$ ثوابت تعتمد على السلسلة المعينة وتمثل **n** حدا يأخذ قيما صحيحة متعاقبة ؛ بمعنى أن العدد الموجي لكل خط يمكن أن يمثل بالفرق بين حدين أحدهما ثابت ، وفي هذه الحالة ، تكون $\bar{\nu}_\infty$ الحد الثابت .

وفي ضوء بحوث ليفنك وديوار ، وفق رايدبرج إلى تصنيف عدد كبير من السلاسل في أطياف العناصر المعقدة أكثر من الهيدروجين ، مثل الفلزات القلوية ، ووجد أنه من الممكن التمييز بين بعض السلاسل المعينة التي تمتلك خطوطًا حادة جدا والسلاسل الأخرى التي تمتلك خطوطًا متداخلة أكثر من الحالة الاعتيادية .

إضافة إلى ذلك ، لاحظ رايدبرج نوعا آخر من السلاسل التي تحتوي على خطوط أكثر لمعانًا مما في الحالات الأخرى ، وسمى هذه الخطوط بالسلسلة الرئيسة (**Principal series**) ، ويمكن ربط هذه السلاسل جميعها بمعادلة من النوع الآتي :

$$\bar{\nu} = \frac{R}{(m+a)^2} - \frac{R}{(n+b)^2}$$

وهناك أربع من هذه السلاسل لها أهمية ، يشار إليها بالرموز **S**، **P**، **D** و**F** ، هي :

السلسلة الرئيسة (Principal series) $\bar{\nu} = \frac{R}{(1+S)^2} - \frac{R}{(n+P)^2}$, n = 2,3,4,…,

السلسلة الحادة (Sharp series) $\bar{\nu} = \frac{R}{(2+P)^2} - \frac{R}{(n+S)^2}$, n = 2,3,4,…,

السلسلة المتداخلة (Diffuse series) $\bar{\nu} = \frac{R}{(2+P)^2} - \frac{R}{(n+D)^2}$, n = 3,4,5,…,

السلسلة الأساسية (Fundamental series) $\bar{\nu} = \frac{R}{(3+D)^2} - \frac{R}{(n+F)^2}$,n = 4,5,6,...,

بالرغم من كون التطورات الأولى في الأطياف الذرية مهمة ، فإنها كانت أولية؛ فالجزء الأكبر منها كان محددا لتصنيف وربط القيم الملاحظة بواسطة معادلات أولية ، ولم توضع أية فرضية للميكانيكية التي تنتج بواسطتها الخطوط الطيفية .

لقد وضعت فرضية معقولة تنص على أن هذه الخطوط تنتج من الذرات ، أما فكرة إمكانية الذرة لإعطاء مثل هذه الخطوط فإنها كانت صعبة الإدراك، وذلك لعدم وجود نظرية عن البنية الذرية في تلك الفترة .

وتبين أن هذه الوضعية لم تبق طويلاً ، فمن خلال اكتشاف الانبعاث للجسيمات الموجبة والسالبة من الذرة عن طريق انحلال النشاط الإشعاعي (Radioactive decay) مع الارتباطات الأخرى للإلكترون في الذرة ، تبين أن الذرة يجب أن تكون بطريقة ما من هذه الجسيمات الجديدة .

أما السؤال الطبيعي الذي يطرح نفسه فهو : كم جسيمة من كل نوع توجد في الذرة المعينة ؟ وكيف تترتب هذه الجسيمات ؟ وتعتمد الإجابة عن هذا السؤال على أي من النماذج المفترضة تكون أكثر تطابقاً مع القيم التجريبية .

نموذج طومسون :

واعتمادا على القيم التجريبية التي كانت متوفرة في تلك الفترة ، افترض طومسون **Thomson** نموذجا للذرة تتوزع فيه الشحنة الموجبة بصورة منتظمة خلال كرة قطرها 10^{-8} سم، وتكون الإلكترونات مغمورة في الكرة في مواقع

متوازنة ، ويسمح لها بالتذبذب عند تشويشه ، حول هذه المواقع الاتزانية .

وبالرغم من ظهورها هذا النموذج بسيطًا جدا ، في الوقت الحاضر ، إلا أنه استطاع أن يعطي بعض التوضيحات الجيدة لتكون الخطوط الطيفية كذلك ، تعرض هذا النموذج الذري لبعض الصعوبات الكبيرة ، التي كان من أهمها : التفسير الذي يسمح به لانتشار جسيمات ألفا .

إن أحد النواتج الملاحظة عن انحلال النشاط الإشعاعي هو تكون جسيمات ألفا التي تبين أنها أيونات هليوم تحمل شحنتين موجبتين، ومن الطرق التي تلاحظ بها هذه الجسيمات هي بواسطة الوميض **Scintillations** الذي تحدثه على شاشة مشعة مثل الشاشة المطلية بمادة كبريتيد الزنك .

فنجد أنه إذا ضرب شعاع على استقامة واحدة من جسيمات ألفا لشاشة مشعة ، تلاحظ صورة تقاطع الشعاع ، ولكن عند وضع قلم رقيق جدا ، مثل صفيحة من الذهب بين المصدر والشاشة فإن النموذج يزداد حجما ويصبح متداخلاً نوعا ما .

ويعود ذلك إلى تشتت الجسيمات الساقطة بواسطة ذرات الصحيفة، وبما أن الذرات التي تكون الصفيحة تتألف من شحنات كهربائية منتشرة بطريقة ما وتكون جسيمات ألفا مشحونة ، فإنه يتوقع حدوث بعض التغيير في النموذج .

ولتوضيح كيف يؤثر توزيع الشحنة المعين في الذرة على نموذج تشتت جسيمات ألفا الساقطة نجد أنه باستخدام هذا النموذج الذري حسب طومسون نظريا أن معدل الانعكاس لجسيمات ألفا يجب أن يكون صغيرا، كما يجب أن يكون احتمال زاوية التشتت الكبيرة صفرا .

وعلى الرغم من ذلك ، لاحظ جيجر ومارسدن عمليا أن كل واحدة من جسيمات ألفا مابين **8000** جسيمة ساقطة تنعكس بزاوية أكبر من **90** درجة ، وهذا بالطبع يختلف تماما عن النموذج الذي افترضه طومسون الذي يفترض زاوية تشتت صغيرة .

نموذج رذرفورد :

افترض رذرفورد نموذجا جديدا للذرة تتركز فيه الشحنة الموجبة في حجم صغير في مركز الذرة ، وافترض أن الإلكترونات تتحرك حول هذا المركز من الشحنة الموجبة في مدارات مختلفة ، مثل الكواكب في النظام الشمسي .

يعد هذا النموذج تطورا لنموذج طومسون لأنه يعطي توزيعا للشحنة الموجبة والسالبة في الذرة يتوافق مع التشتت الملاحظ لجسيمات ألفا . ومع ذلك فقد تعرض هذا النموذج لبعض المشاكل ، من بينها ، أنه لا يمكن أن يكون عدد الإلكترون ثابتًا؛ لأن الشحنات المختلفة للإلكترون والنواة تعملان على تجاذبهما .

ومن ناحية أخرى ، نجد أنه إذا ترك الإلكترون يتحرك حول النواة ، فستظهر مشكلة أخرى حين تعدل الشحنة الكهربائية فإنها تبعث أو تمتص أشعة ، فإذا تصورنا تحرك الإلكترون حول النواة فسيكون معرضا إلى تسارع الجذب المركزي .

وبحسب قواعد النظرية الكهرومغناطيسية ، ينبغي على الإلكترون أن يشع الطاقة ؛ فالمنطقة الوحيدة التي يأتي منها تجهيز الطاقة المستمر هو الذرة نفسها ، وأخيرا يأخذ الإلكترون طريقًا حلزونيا متجها نحو النواة ، فإذا سقط الإلكترون في النواة فنيت الذرة ، وبما أنه لا يمكن فناء الذرة نستنتج أن ذرة رذرفورد لابد من تعديلها .

كما أن المشاكل التي كانت موجودة حول البنية الذرية في تلك الفترة لم تقتصر علي مشاكل توزيع الإلكترونات والنواة في الذرة ، وحتى بالنسبة للتوزيع المعين ، كان من الضروري إيجاد كيفية استطاعة الذرة إعطاء خطوط طيفية منفردة إذا كانت ناتجة من الذرات .

أما كونوري فقد أجرى أول محاولة لتوضيح الظواهر بدلالة نظرية الكم ، إذ استطاع – بدون مساعدة النموذج الذري – أن يستنتج أن الذرة

تعطي الخطوط الطيفية على فترات ويتج الطيف الكامل من عدد كبير جدا من الذرات ، كل منها يجب أن تمتلك حالة تهيج **Excited state** تحتوي على إلكترون واحد .

ذرة بوهر (The Bohr atom) :

لقد افترضت نماذج نظرية عديدة للذرة ، ووجد أن كل واحد أفضل من الذي سبقه بطريقة ما ، وعلى كل حال ، هناك عدد قليل من النماذج – في أي مجال في الفيزياء أو الكيمياء – عرفت بصورة شاملة ، مثل النموذج الذي افترضه بوهر للذرة الشبيهة بالهيدروجين .

باستخدام الفرضيات البنائية لذرة رذرفورد نجح بوهر في تطبيق كمي لفرضيات نظرية الكم تفسيرا لأصل الأطياف الخطية واستقرار الذرة ، ولقد لوحظ أن المشكلة الأساسية لذرة رذرفورد هي الإشعاع المستمر للطاقة مع تحرك الإلكترون حول النواة . واستطاع بوهر أن يتغلب على هذه المشكلة بتطبيق فرضيات نظرية الكم لحالات الطاقة المحددة .

إذ ذكر أن الإلكترون محدد الحركة في مدار مستقر معين ، وطالما بقي في هذا المدار فإنه لا يشع الطاقة ، ثم باستخدام قاعدة الكم في كون الجسم المتذبذب لا يشع الطاقة إلا إذا حدث انتقال من إحدى حالات الطاقة إلى حالة أخرى .

ولقد افترض بوهر أنه حين يقفز الإلكترون من حالة طاقة مستمرة ذات طاقة (W_1) إلى حالة أقل طاقة (W_2) ينبعث كم من الإشعاع ذا طاقة تساوي الفرق بين طاقة الحالتين ، ويعطى ذلك حسابيا بالمعادلة الآتية :

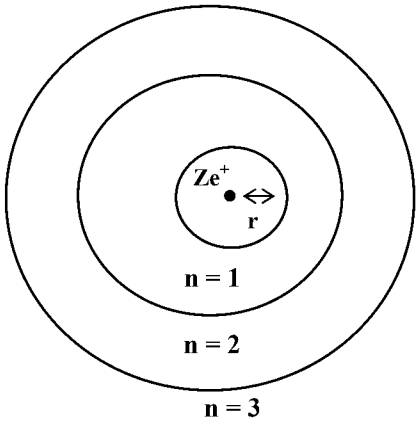
$$Hv = W_1 - W_2$$

طالما يقرر أن الإلكترون يبقى في مدار مستقر حول النواة ، يظهر التساؤل عن حجم وشكل هذا المدار ، وافترض بوهر في الإطار النهائي لنظريته أن المدارات تأخذ الشكل الدائري مع حجوم تتناسب مع شروط الكم بحيث يكون العزم

الزاوي، **P**، **(Angular) momentum** للإلكترون مضاعفًا صحيحا للكمية $\frac{h}{2\pi}$ ، وهكذا ، نحصل على : $\pi P = mvr / 2$

إذ تمثل **m**، **v** كتلة وسرعة الإلكترون، و **r** نصف قطر المدار، و **h** ثابت بلانك، و **n** عددا صحيحا موجبا يعرف بعدد الكم . ويؤدي هذا الافتراض إلى تصور الذرة كما هو مبين في الشكل التالي ، ونجد أن هناك مدارات مختلفة تتوفر للإلكترون للقيم المختلفة من عدد الكم

ولأقل هذه المدارات تكون **n =1** الذي يعد أكثرها استقرارا لذرة الهيدروجين ، وحين يكون الإلكترون في هذا المدار يقال: إنه في حالة الاستقرار **Ground state** ؛ لذلك ينتج انبعاث الأشعة حين يرتفع الإلكترون بطريقة ما إلى حالة التهيج، ثم يعود إلى إحدى حالات الطاقة المنخفضة المتوفرة .



تمثيل بسيط لذرة بوهر يبين مستويات الطاقة الثلاثة الأولى

ولقد نتج قبول نموذج بوهر لنجاحه في التفسير الكمي للأطياف الخطية للذرات شبيهة الهيدروجين، وكان هذا النجاح ضروريا لوجود عدة حقائق تجعل من الصعب قبوله ، فمن المفيد ملاحظة عدم وجود ميكانيكية تهيء الطريقة التي يشع بواسطتها الإلكترون للطاقة في نموذج بوهر ؛ وذلك حين أهمل بوهر فكرة الإشعاع المستمر للشحنة المعجونة .

وحسب نموذج بوهر ينتج الإشعاع بسبب تغير حالة طاقة

الإلكترون ، لكن لم يوضح تفسيرا لحدوث ذلك ، إضافة إلى ذلك استفاد بوهر من الفرضيات الكلاسيكية وفرضيات الكم؛ إذ وجدها ضرورية للحصول على النتيجة النهائية .

لذلك نلاحظ أن الاتفاق الجيد بين الحسابات النظرية لنموذج بوهر والقيم المستنتجة عمليا كانت إثباتاً لطريقته، وفي المعالجة الكمية لنظام الإلكترون الواحد ، تعد قوة التجاذب بين الإلكترون والنواة ناتجة من التجاذب الإلكتروستاتيكي بين الشحنة الموجبة في النواة والشحنة السالبة للإلكترون ، وهكذا :

$$F = Ze^2 / r^2$$

إذ تمثل **Z** العدد الذري للعنصر، و **r** المسافة بين الإلكترون والنواة، إن هذه القوة الإلكتروستاتيكية التجاذبية يجب أن تساوي القوة المركزية الناتجة من حركة الإلكترون حول النواة ، مما يؤدي إلى العلاقات :

$$F = ma = \frac{mv^2}{r} = \frac{Ze^2}{r^2}$$

فإذا تم حل هذه المعادلة بالنسبة لنصف القطر **r** ، نحصل على :

$$r = \frac{Ze^2}{mv^2} \qquad\qquad v = \frac{nh}{2\pi mr}$$

بالتعويض عن قيمة **v** يلاحظ أن نصف قطر مدار الإلكترون يعطي في المعادلة: $r \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m Ze^2}$ = لذرة الهيدروجين **Z = 1** ، فإذا أخذنا الإلكترون في حالة الاستقرار (**n = 1**) أمكن حساب نصف قطر الذرة بسهولة ، **r** = 10^{8-} **0.529** × سم أو **0.529** أنجستروم، وهذه القيمة صحيحة مقارنة بنصف القطر المستنتج من مصادر أخرى ، يلاحظ مما تقدم نجاح مبكر لذرة بوهر .

وتعد طاقة الإلكترون في الذرة من المسائل ذات الأهمية الأساسية، وتمثل طاقة الإلكترون الكلية من الطاقة الحركية والطاقة الكامنة ، فإذا عرفت الطاقة الكامنة صفر بأنها: طاقة الإلكترون حين يكون في حالة ركود على مسافة ما لا نهاية عن النواة ، نجد أن طاقته

الكامنة لأية مسافة بالنسبة للنواة هي:

$$V = \int_{\infty}^{r} F.dr = \int_{\infty}^{r} \frac{Ze^2}{r^2} dr = -\frac{Ze^2}{r}$$

ثم نجد أن الطاقة الحركية تعطى بالمعادلة الآتية :

$$T = \frac{1}{2} mV^2 = \frac{Ze^2}{2r}$$

بما أن الطاقة الكلية للإلكترون وليدة مجموع الطاقة الكامنة والطاقة الحركية ، لذلك : $W_n = -\frac{2\pi^2 me^4 Z^2}{n^2 h^2}$

ومن المهم الملاحظة أن عدد الكم **n** هو طريقة لقياس طاقة الإلكترون ، فحين يكون الإلكترون في الغلاف الأول (**n = 1**) فإنه يمتلك أعلى استقرار ، غير أن الزيادة في قيمة **n** تقلل من طاقة الإلكترون بالنسبة للنواة إلى أن تقترب من الصفر حين تقترب **n** من اللانهاية .

ولقد بينا أن طاقة الإشعاع المنبعث من الذرة يساوي الفرق في الطاقة بين حالتين معينتين من حالات الكم ، وهكذا عند الانتقال بين حالتين ذواتي طاقة Wn_1 و Wn_2 ، يعطى تردد الأشعة المنبعثة بالمعادلة الآتية : $v = \frac{Wn_1 - Wn_2}{h}$

وعند التعويض من معادلة **Wn** وبعد تحويل التردد إلى العدد الموجي بواسطة العلاقة = $\bar{v}$ **v/c** ، يعطى العدد الموجي بالعلاقة الآتية :

$$\bar{v} = \frac{2\pi^2 me^4}{ch^3} Z^2 \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

إذا كان الحد n_2 يأخذ القيمة **2** ، وللتوافق مع التجربة يجب أن يعطى الحد الثابت ، $\pi^2 me^4/ch^3 2$ قيمة معقولة لثابت رايدبرج . فلو أن نظرية بوهر فشلت في هذا الاختبار وجب البحث عن نموذج ذري جديد ، ولكنها وجدت في توافق جيد جدا ، ولو أنها دققت أكثر لكانت النتيجة المحسوبة لقيمة **R** في توافق أفضل .

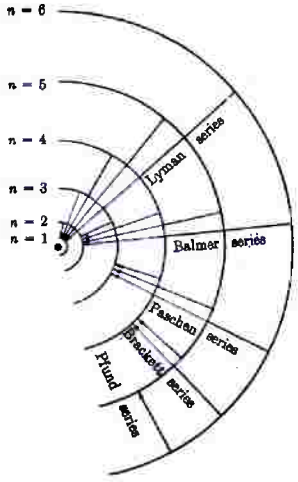
كما أن أكثر التحسينات التي يمكن عملها هي بأخذ الكتل الدقيقة في النواة والإلكترون بنظر الاعتبار ، وعلى هذا الأساس افترض أن كتلة النواة كبيرة جدا بالنسبة لكتلة الإلكترون؛ لذلك أصبح من الممكن بحسب هذا الافتراض إهمال حركة النواة وتركها توجد في مركز الذرة تماما .

ونجد أنه من الضروري في حالة النواة ذات الكتلة الدقيقة أن نأخذ كلا من حركة النواة والإلكترون حول مركز الكتلة بنظر الاعتبار كما بالعلاقة الآتية لقيمة **R** :

$$R = \frac{2\pi^2 me^4}{ch^3} Z^2 \frac{1}{1+\frac{m}{M}}$$

وباستخدام الكتلة المصححة وأفضل القيم المعروفة لكل من **c** و **h** و **m** و **e** ، وجد أن قيمة **R = 109681** سم وهي في توافق ممتاز مع القيمة المستنتجة عمليا **109677.58** سم .

والآن بعد أن لاحظنا أن معادلة العدد الموجي التي طورها بوهر هي نفسها كما وجدها بالمر ؛ من الممكن فهم منشأ السلاسل الطيفية لسلسة بالمر ، وجد أن الثابت **a** يساوي **2** ، ويتضح من الشكل التالي أن القيمة **a = 2** ناتجة من حقيقة انتقال الإلكترون إلى الغلاف التالي :



وبالطريقة نفسها ، هناك علاقة مشابهة بين **a = 1** وسلسلة ليمان و **a = 3، 4، 5** وسلاسل كل من باشن وبراكيت وفند ، وفي الوقت الذي تطورت ذرة بوهر ، كانت سلسلتا باشن وبالمر هما المعروفتين فقط ، أما إكمال بقية السلاسل الخمس ، فيمكن افتراض جميعها من نظرية بوهر .

التوسعات في نظرية بوهر :

من الحقائق المؤكدة أن نظرية بوهر لاقت نجاحات عديدة مثل: الافتراض الكمي لطاقات الأطياف الخطة للذرات شبيهة الهيدروجين ، فضلاً عن بعض الصعوبات، ومنها: مشكلة التركيب الدقيق في الطيف الخطي للذرة شبيهة الهيدروجين .

ولقد أوضحت نظرية بوهر وجود الخطوط المختلفة في طيف الهيدروجين، لكنها افترضت وجود سلسلة من الخطوط المنفردة فقط ، ويعتبر ذلك الشيء الذي لوحظ في تلك الفترة .

وبعد تطور الأجهزة والطرق التقنية تبين أن الخطوط التي كان يعتقد بأنها منفردة هي في الحقيقة مجموعة من عدة خطوط متقاربة جدا . ويتضمن ذلك وجود عدة مستويات طاقة متقاربة بدلاً من مستوى واحد لكل عدد كم **n** ، وهذا بدوره يتطلب أعداد كم جديدة ، ولا توجد طريقة مباشرة للحصول على مثل هذه الأعداد من نموذج بوهر .

نموذج سمرفيلد :

لقد حلت المشكلة السابقة في نموذج بوهر ، إلى درجة ما من قبل سمرفيلد حين أخذ بنظر الاعتبار تأثير المدارات الأهيلجية للإلكترون . لقد افترض بوهر إمكانية وجود المدارات الأهيلجية في بحثه الأولي ، لكنه وقف عند هذا الافتراض ولم يطوره ، وفي حالة المدارات الدائرية للإلكترون ، يكون الحد المتغير الوحيد هو زاوية الدوران .

ولكن في حالة المدار الأهيلجي فإن كلا من: الزاوية **r** ، وموجه نصف القطر **r** قابل للتغير، كما هو مبين في الشكل التالي بوجود درجتين من الحرية ينتج

شرطان للكم ، لتحديد كلتا الدرجتين من التغير ، ولقد عمم سمرفيلد شرط الكم لبور، $p = h/2\pi$ ، وجعله بالشكل الآتي :

$$\oint p_i \, d_{qi} = nih$$

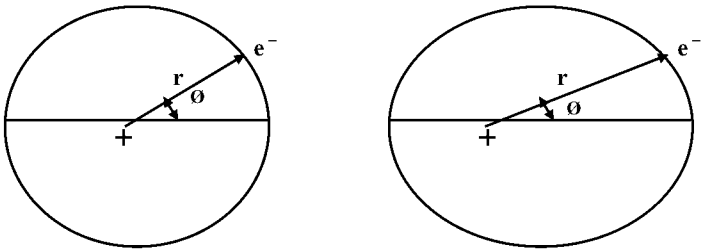
تمثل p_i عزم الحدد المعين ، qi . ويتج التكاملان الآتيان بدلالة المتغيرين و $r =$ $\oint P\phi d\phi = n\phi h$

$$\oint P_r \, d_r = n_r h$$

ولما كان العزم الزاوي للنظام المنعزل ثابتاً ، أعطى تكامل العزم الزاوي النتيجة نفسها كما حصل عليها بوهر نفسه :

$$P\phi = n\phi \frac{h}{2\pi}$$

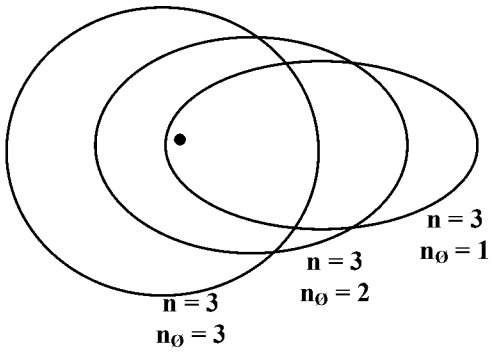
ويعرف عدد الكم ψn بعدد الكم السمتي أو عددكم العزم الزاوي ، إن حل التكامل نصف القطري ليس سهلاً مثلما للعزم الزاوي ، إذ يحتوي الحل على علاقة بين عدد الكم السمتي وعدد الكم نصف القطري ، واللامركزية للشكل الأهليجي .



استطاع سمرفيلد بإكمال هذه المعالجة أن يبين اعتماد طاقة الإلكترون على عدد الكم الرئيس الذي يمكن أن يعرف بالشكل الآتي : $n =$ $n\phi + n_r$ ، ولكن باستخدام العلاقة لعدد الكم الرئيس ، كما هي مبينة في أعلاه ، حيث يتم الحصول على علاقة الطاقة نفسها كما في حالة المدار الدائري لعدد كم بوهر n .

لذلك يتضح أن إدخال شرط الكم الجديد لا يعطي حدودا جديدة للطاقة ، فهو يعمل فقط على إيجاد أكبر عدد من المدارات الممكنة للقيمة المعينة من n ، وعلى سبيل المثال ، كما يبين الشكل التالي حين $n = 3$ هناك إمكانية وجود مدار دائري حيث ψn و $nr =$ **صفر** أو وجود مدارين أهليجيين لكل من $\psi n = 2$ و $nr = 1$

و ψ n = 1 و nr = 2 .



وحـين يكـون عـدد كـم واحـد كافيـا لإيجـاد حـالات طاقـة النظـام الذي يمتلك درجتين أو أكثر من التغير ، يقال لمثل هذا النظام إنه منحل، ولتوضيح التركيب الدقيق في الطيف شبيه الهيدروجين كان مـن الـضروري إزالـة هـذا الانحلال .

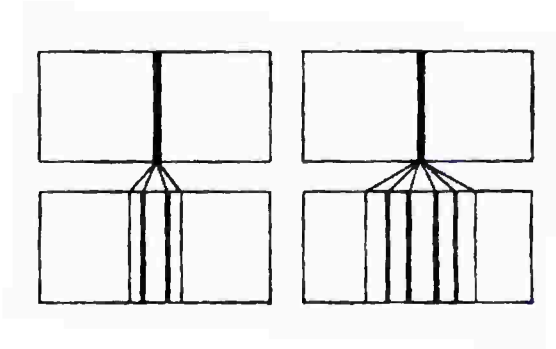
ولذا ينبغي وجود عددي كم يعملان على الإسهام في طاقـة النظـام . وجـد سـمرفيلد إمكانيـة إزالـة الانحـلال فـي نموذجـه الـذري مـن الأخـذ بنظر الاعتبار التغير النسبي لكتلة الإلكترون خلال حركته حول النواة، وحين يدور الإلكتـرون حـول النـواة تتغيـر سـرعته باسـتمرار اعتمـادا علـى بعده عن النواة .

ومن المعروف في النظرية النسبية بأن كتلة الجسيمة تزداد بزيـادة سـرعتها، فـإذا أخـذ هـذا التـأثير بنظـر الاعتبـار يتـضح وجـود فـرق قليـل بالطاقة بين المدار الدائري والمدار الأهليجي ، وهذا الفرق بالطاقة هو دالـة عـدد الكم السمتي ، ψ n .

ويمكن ربطه إلى الشكل الفيزيائي لمستويات الطاقة في ذرة بوهر من اعتبـار أن كل مستوى طاقة رئيس يتكون من عدة مستويات ثانوية متقاربة جـدا ، وبهـذه الصورة تم الحصول على توافق معقول مع التركيب الدقيق الملاحـظ لطيـف ذرة الهيدروجين .

تأثير زيمان :

لقد اتضح أنه بوجود المجال المغناطيسي تعطي خطوط الطيف انقسامات أكثر، ويعرف ذلك بتأثير زيمان الموضح في الشكل التالي لنموذج زيمان في الصوديوم . ويحتاج توضيح هذه الظاهرة إلى إدخال عدد كم ثالث (m) عدد الكم المغناطيسي، ويحتاج الإلكترون في الفراغ إلى ثلاثة حدود لوصف موقعه .



ينتج عن ذلك ثلاث درجات من التغير ويجب أن تحتاج إلى ثلاثة أعداد كم لوصف طاقة الإلكترون ، ويكون ترتيب الإلكترون اختياريا وتكون الدرجة الثالثة من التغير منحلة ، لكن في وجود المجال المغناطيسي يتجه مستوى مدار الإلكترون حول اتجاه المجال المغناطيسي، وبهذه الطريقة يزال الانحلال . ويتشابه شرط الكم الثالث مع شرط العزم الزاوي ، ليعطي:

$$P_z = m\frac{h}{2\pi}$$

وهكذا ، يلاحظ الآن ضرورة استخدام ثلاثة أعدادكم لوصف طاقة الإلكترون ، إذ يجب إدخال كل عددكم جديد بحسب طلب التجربة ، وحتى بوجود ثلاثة أعداد كم لا يمكن إعطاء توضيح كامل للأطياف الذرية ، فعلى سبيل المثال ، يعطي تأثير المجال المغناطيسي الضعيف ما هو معروف بتأثير زيمان الشاذ .

ولا يمكن فهم هذا التأثير بدلالة نموذج بوهر – سمرفيلد إضافة على ذلك ، هناك نقاط عديدة فشلت ذرة بوهر والتحسينات التي طرأت عليها في تفسيرها من بين هذه النقاط المهمة هي عدم إمكانية تطبيق النظام على الذرات الأكثر تعقيدا ، فقد فشلت النظرية فشلاً كاملاً عند تطبيقها على طيف ذرة بسيطة مثل الهيليوم .

كما كانت المحاولات لفهم أساس النظام الدوري بدلالة نموذج بوهر غير ناجحة . تشير هذه النتائج إلى أن النظرية تصح فقط لنظام الإلكترون الواحد ، ولما كان مثل هذا التحديد غير معقول يلاحظ أن هناك طلبا على نموذج أفضل .

مركز نظرية الكم :

لاحظنا تغير فرضيات طبيعة الطاقة المشعة من حالة إلى أخرى، ثم رجعت مرة ثانية منذ الفترة التي عاش فيها نيوتن . وقبل دراسات بلانك على إشعاع الجسم الأسود ، كانت الإثباتات التجريبية جميعها تشير بدون تساؤل إلى النظرية الموجية للإشعاع ، لكن تجمعت إثباتات تجريبية كثيرة تشير إلى نظرية الجسيمة للأشعة الكهرومغناطيسة .

أما أينشتاين وديباي فقد عالجا مشكلة الحرارة النوعية للمواد الصلبة بدلالة فرضيات الكم ، ووضح كومبتون تشتت الأشعة السينية بواسطة الإلكترون عن طريق معالجة الاصطدامات كما لو كانت بين كرات البليارد .

ومع هذه الأغلبية من الإثباتات التي تساند الكم قد يذهب الظن بالقارئ إلى أن الدورة قد اكتملت، وأننا رجعنا مرة ثانية إلى فكرة نيوتن الأساسية ، لكن ذلك غير صحيح ؛ لأنه لا يمكن إهمال حقيقة كون الأشعة الكهرومغناطيسية لها خاصية موجية تماما كما كان مؤكدا أن لها خاصية جسيمية .

وذلك يجعلنا نتساءل : هل الفوتون موجة أم جسيمة؟ إن هذه المشكلة ليس من السهل حلها ، كما أن الجواب لا ينحصر في إيجاد طريقة بسيطة كيميائية كاذبة أم فيزيائية ؛ لذلك نلاحظ جانبا جديدا من العلم الطبيعي ، إذ يجب أن يأخذ خاصية فلسفية محددة .

ومن الممكن أن ينحصر جذر المشكلة في طبيعة العالم الذي نعيش فيه ، إذ يلاحظ هنا نوعان من الحركة ؛ أحدهما : الطبيعة الموجية، والثاني: الطبيعة الجسيمية ، فإذا قذفت كرة السلة فإنها تظهر بشكل جسيمة ويمكن وصف حركتها بدلالة قوانين نيوتن للحركة .

ومن ناحية أخرى ، إذا سقط جسم في بركة ماء فإن الحركة الملاحظة يجب وصفها بدلالة المعادلة الموجية . ولم يلاحظ من تجاربنا وجود حركة وسطية بين النوعين ، لكن ذلك لا يعني عدم وجود مثل هذه الحركة .

"الأسئلـة"

1- احسب (أ) نصف القطر (ب) السرعة (جـ) طاقة الإلكترون في مدار بور الرابع في ذرة الهيدروجين .

2- استخرج قيمة طول الموجة للفوتون الناتج من انتقال **n = 4 n = 1** فـ.ي ذرة الهيدروجين .

3- استخدم نموذج بور لإيجاد طاقة حالة الاستقرار لأيون الليثيوم الثنائي الموجب.

4- احسب جهد التأين لذرة الهيدروجين باستعمال معادلة بالمر .

5- لقد ذكر أنه بسبب المنشأ الديناميكي الحراري ، يجب أن تكون درجة الحـ.رارة في معادلة بلانك على شكل (λ T) . ما هي الخاصـ.ية الفريـ.دة للـ.ديناميكا الحرارية التي تحتاج لذلك ؟

6- قد يعتقد أن مشكلة الخاصية المزدوجة ، موجة – جسيمة ، للفوتون يمكن حلها ببساطة إذا تصورنا أن الفوتون يتحرك خلال الفراغ على طول طريق موجي . كيف يتناقض ذلك مع الفرضيات التقليدية المعروفة للحركة الموجية ؟

7- ما هو تأثير الخاصية المزدوجة ، موجة – جسيمة ، لقبول قـ.وانين الاعتقـ.اد الثلاثة في الوقت الحاضر .

***