الباب الأول

التطور التاريخي لمبدأ الكم

Historical Development of Quantum Mechanics

■ مقدمة ■ عجز الميكانيكا الكلاسيكية ■ نظرية بوهر لذرة الهيدروجين ■ افتراض دي برولي ■ حيود الإلكترونات ■ المفهوم التطبيقي لفرض دي برولي ■ تمارين

١-١ مقدمة

كانت الظواهر العلمية وحتى نهاية القرن الثامن عشر الميلادي يمكن شرحها شرحا وافيا باستخدام قوانين نيوتن للحركة والقوانين الفيزيائية. هذه المجموعة من القوانين اتفق على تسميتها قوانين الميكانيكا الكلاسيكية classical mechanics . وقد نجحت هذه القوانين نجاحا تاما عند تطبيقها على الأجسام الكبيرة نسبيا (كرة - سيارة - طائرة .....الخ) macroscopic particles . وبنهاية القرن الثامن عشر تكاملت أسس وقوانين الديناميكا الحرارية Thermodynamics وأمكن شرح الخواص العامة للمواد Bulk properties بصورة مرضية. وباكتشاف وجود الذرات والجزيئات ومكوناتها من بروتونات وإلكترونات وخلافه أصبح لزاما على العلماء دراسة ديناميكية الظواهر العلمية من مفهوم أخر جديد وهو مفهوم الجسيمات متناهية الصغر microscopic particles . وتم تطبيق قوانين الميكانيكا الكلاسيكية لشرح بعض الظواهر العلمية المرتبطة بحركة الذرات والجزيئات وللأسف الشديد تراكمت الدلالات العلمية التي أكدت عجز الميكانيكا الكلاسيكية عن تعليل وشرح سلوك الأجسام المتناهية في الصغر.

وقد استلزم استكمال وضع نظرية جديدة قادرة على تعليل ووصف سلوك الجسيمات المتناهية في الصغر أكثر من ربع قرن من العمل المتواصل من علماء نابهين ابتداء من ماكس بلانك عام ١٩٠٠م حتى أتم كل من هيزنبرج و شرودنجر كلا على حده من وضع اللمسات الأخيرة لهذه النظرية التي سميت نظرية ميكانيكا الكم Quantum mechanics ، ويجب أن نوضح هنا أن هذه النظرية أكثر أساسا وأوسع تطبيقا مما قد يتبادر إلى ذهن القارئ . فالسائد أن نظرية الكم تطبق فقط في حالة الأجسام متناهية الصغر مثل الذرات وما تحتها subatomic particles . ولكن هذا يجافي الصواب فإن نظرية ميكانيكا الكم هي الأساس الذي يمكن تطبيقه على الأجسام متناهية الصغر وأيضا على

الأجسام الكبيرة macroscopic ، وما الميكانيكا الكلاسيكية إلا حالة خاصـة من النظرية العامة "ميكانيكا الكم".

و "كيمياء الكم" هو ذلك الفرع من الكيمياء المهتم أساسا بتطبيـق ميكانيكـا الكم في شتى مجالات الكيمياء. والهدف الأساسي لكيمياء الكم هو الإجابة علـى السؤال الأساسي البادئ بعلامة الاستفهام لماذا ؟ لمـاذا يحـدث هـذا التغيـر الكيميائي؟ مثلا. وأصبح اعتماد جميع فروع الكيمياء على ميكانيكا الكم أساسيا وضروريا لشرح وفهم نتائج التجارب العملية المختلفة وأيضا لاستشفاف مـا إذا كان التغير الكيميائي ممكن حدوثه من عدمه. وباختصار أصبحت الكيمياء تتكلم لغة جديدة تماما تعتمد أساسا على مفردات هذه النظرية الجديدة ميكانيكا الكم.

وسوف نقدم في هذا الباب الخلفية التاريخية ومجموعة التجارب المعمليـة التي عجزت الميكانيكا الكلاسيكية عن شرح وتعليل نتائجها، وكيف كان ظهـور ميكانيكا الكم حتميا ولازما لفهم هذه التجارب. سوف نتعلم في هذا الباب كيـف نفكر فـي الظـواهر الذريـة وتحـت الذريـة atomic and sub-atomic phenomena بأسلوب مختلف عن ذلك الذي اعتدنا على استعماله في حالـة الأجسام الكبيرة.

١-٢ عجز الميكانيكا الكلاسيكية

Failures of Classical Mechanics

بنهاية القرن الثامن عشر تم إجراء مجموعة من التجـارب المعمليـة التـي إن أجمعت على شيء فإنما تجـمع على الحقيقة المؤكدة بأن نتائجها في اختلاف تام مع استنتاجات الميكانيكا الكلاسيكية. والطريقة المثلى لشرح هذه النتائج العمليـة هو في افتراض خطأ القوانين الكلاسيكية. وعند متابعة هذا التفكير برزت إلـى الوجود أول معالم نظرية الكم .

١-٢-١ إشعاعات الجسم الأسود

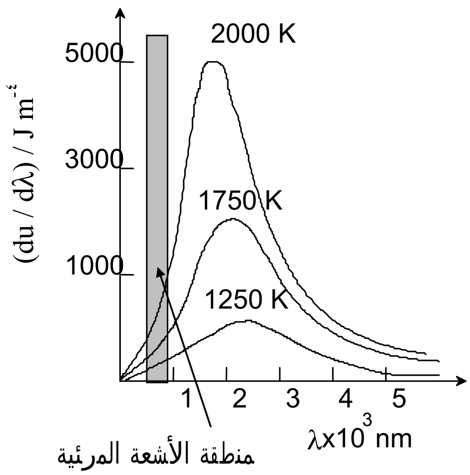
Black - Body Radiation

يمكن تعريف "الجسم الأسود" على أنه ذلك الجسم الذي يمتص ويبعـث جميـع الإشعاعات الساقطة عليه من جميـع الأطـوال الموجيـة. وظـاهرة انبعـاث الإشعاعات من الأجسام الصلبة هي ظاهرة متداولة ومعروفة من قديم الزمـان. فعند تسخين قضيب من الحديد فإنه يشع ضوءا ربمـا لا نـراه ولكـن يمكـن الإحساس به لو وضعت يدك بالقرب من هذا القضيب. هذه الإشعاعات غيـر المرئية تقع في منطقة الضوء تحت الحمراء Infra - red. ولو استمر تسخين قضيب الحديد أكثر فإنه يبدأ في التوهج باللون الأحمر. وباسـتمرار التـسخين يتوهج باللون الأبيض وهكذا. أي أن الأجسام الصلبة عند إعطائها طاقة حرارية تحول هذه الطاقة إلى ضوء ينبعث من الجسم ذاته ويتغير تردد هـذا الـضوء بتغير درجة الحرارة .

وقد أمكن دراسة هذه الظاهرة بإحداث فجوة صماء في " الجسم الأسـود " المراد دراسته وفي مثل هذه الحالة فإن الأشعة الكهرومغناطيسية تكون في حالة اتزان داخل هذه الفجوة وبإحداث ثقب رفيع خلال الفجوة أمكن دراسـة توزيـع كثافة الأشعة المنبعثة مقابل الطول الموجي لهـذه الأشـعة. ويوضـح الـشكل (١ - ١) هذه العلاقة عند درجات حرارة مختلفة.

توضح النتائج المبينة في شكل (١ - ١) ظاهرتين أساسيتين أولاهمـا هـي الإزاحة الصغيرة - ولكن المستمرة - في الطول الموجي للقمة بزيـادة درجـة الحرارة. وهذه الإزاحة في الأطوال الموجية الأقصر يصحبها انتـشار أوسـع ليغطي المنحنى منطقة الضوء المرئي بالكامل . ويعني هذا تناسبا عكسيا بـين الطول الموجي للقمه λ_{max} ودرجة الحرارة المطلقة T .

$$\lambda_{max} \propto ١/T$$



شكل (١ . ١) : العلاقة بين كثافة الطاقة والطول الموجي للضوء المنبعث مـن فجـوة فـي الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة.

وقد وضع وين هذه العلاقة فـي صـورة قـانون للإزاحـة يعـرف باسـمه Wien's displacement law

$$T \lambda_{max} = \text{قيمة ثابتة} \qquad (١ – ١)$$

وقد تم تعيين قيمة هذا الثابت عمليا، ووجد أنه يساوي 2.9×10^{-3} m. K أي أن الطول الموجي للقمة λ_{max} عند درجة حرارة ١٠٠٠ K يساوي تقريبـا ٢٩٠٠ nm .

أما الظاهرة الثانية فهي متعلقة بالطاقة الكلية المنبعثة من جميـع الأطـوال الموجية عند درجة حرارة معينة. ومن الطبيعي فإن الطاقـة الكليـة للموجـات المنبعثة يجب أن تتناسب طرديا مع درجة الحرارة. وعلى ذلك فإن الطاقة الكلية في وحدة المساحة (كثافة الطاقة) Energy density تتبع قـانون اسـتيفان Stefan' s law الآتي :

$$F = a \, . \, T^4 \qquad (١ - ٢)$$

حيث a هو ثابت تناسب لا يعتمد على نوع المادة المستخدمة. ويمكن وضع هذا القانون في صوره أخرى وهي

$$M = \sigma . T^{٤} \qquad (١ - ٣)$$

حيث M هي القوة المنبعثة و تتناسب بالطبع مع الطاقة المنبعثة F.

و σ ثابت تناسب يعرف باسم ثابت استيفان – بولتزمان Stefan-Boltzmann constant وأمكن تعيين قيمته العملية وهي $٧x١٠^{-٨}\ Js^{-١}m^{-٢}K^{-٤}$ وهذا يعني أن كل ١سم٢ من السطح المسخن لدرجة حرارة ١٠٠٠ K تنبعث منه طاقه قدرها ٥,٧ w .

ومن منظور كلاسيكي وضع ريلي وجينز Reyleigh and Jeans العلاقة بين كثافة الطاقة والطول الموجي في صورة القانون

$$dF (\lambda) = (٨\pi\ k\ T /\lambda^{٤})\ d\ \lambda \qquad (١ - ٤)$$

ومن هذه العلاقة يتضح أن كثافة الطاقة تقل باستمرار بزيادة الطول الموجي للأشعة المنبعثة كما هو موضح بالشكل (١-٢). ولا ينطبق هذا السلوك مع المشاهدة العملية التي تمر فيها كثافة الطاقة بقمة عند طول موجي معين. وللتغلب على هذه المفارقة اقترح ماكس بلانك Max Plank إن الطاقة لا تمتص ولا تفقد بصفة مستمرة ولكن عملية الامتصاص والانبعاث هي عملية مكماة. وهذا الفرض الذي أطلق عليه "**مبدأ الطاقة المكماة**" أو باختصار "**مبدأ الكم**" Principle of quantization of energy و يعني إن الطاقة مكونة من وحدات كل وحدة قائمة بذاتها ومستقلة عن الوحدات الأخرى. وأطلق بلانك على الوحدة من الطاقة اسم "**الكوانتم**" Quantum " أو كمة وتتناسب هذه الوحدة طرديا مع تردد الضوء الممتص أو المنبعث أي $E\ \alpha\ \nu$

$$E = h\nu \qquad (١-٥)$$

حيث h هو ثابت تناسب يسمى ثابت بلانك. وكمية الطاقة $h\ \nu$ هي وحدة الامتصاص أو الانبعاث وتسمى كوانتم. فالجسم يستطيع أن يمتص وحدة

واحدة من هذه الوحدات أو إثنتان أو ثلاثة (أي واحـد كـوانتم أو اثنـان ...) $E = nh\nu\ ;\quad n = ١, ٢, ٣, \ldots$ كما أن وحدة الطاقة " كوانتم "لا يمكن تجزئتها.

ومن هذه العلاقة فإن عدد الوحدات الممتصة (أو المنبعثة) تساوي

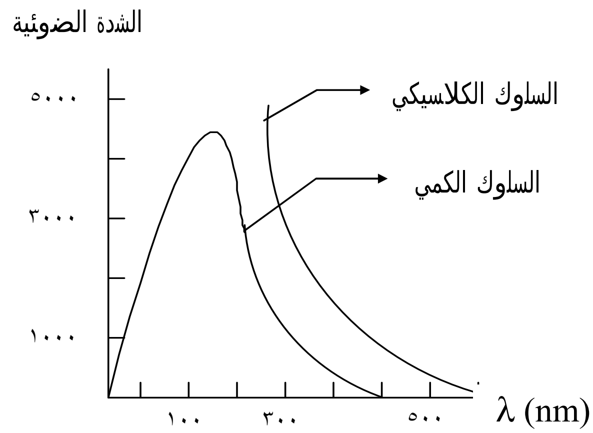
$$n = E / h\nu \qquad (١ - ٦)$$

وافترض بلانك أن جزيئات "الجـسم الأسـود " تتـصرف وكأنهـا مهتـزات Oscillators لها حالات محددة للاهتزاز كل حالة لها طاقة ثابتـة ومعينـة. وعند إثارة هذه المهتزات إلى الحالات العليا برفع درجة الحرارة فإنها تعود إلى حالتها المستقرة مرة أخرى وتفقد الفرق فـي الطاقـة فـي صـورة موجـات كهرومغناطيسيه.

وباستخدام مبدأ بلانك وبعمليات حسابيه مطولة أمكن الوصول إلى المعادلة الرياضية التالية المعبرة عن كثافة الطاقة

$$dF(\lambda) = \left(\frac{٨\pi hc}{\lambda^{٥}}\right)\left\{\frac{\exp(-\frac{hc}{\lambda kT})}{١ - \exp(-\frac{hc}{\lambda kT})}\right\}d\lambda \qquad (١ - ٧)$$

و يعبر الحد الثاني في هذه المعادلة (وهو غير موجود بمعادلة ريلي - جينز) عن اضمحلال الطاقـة كلمـا قـل الطـول المـوجي λ. حيـث أن الحـد $\exp(-hc/\lambda kT)$ يساوي الصفر عندما تكون $hc/\lambda kT$ كبيـرة جـدا وحيث إن جميع مكونات هذا الحد ثوابت فإنه يكون كبيرا جدا فقط عندما تكون λ صغيرة جدا .



شكل (١-٢): المحاولات النظرية لتعليل ظاهرة إشعاعات الجسم الأسود.

وكما هو موضح في الشكل (١-٢) فإن معادلة كثافة الطاقة (٧ - ١) تتطابق مع النتائج العملية بصورة مرضية تماما. وأمكن تعيين قيمة ثابت بلانك h لتكون 6.626×10^{-34} J.s وهناك نقطة جديرة بالملاحظة وهي أن المعادلة (٧ - ١) تؤول إلى المعادلة (٤ - ١) الكلاسيكية إذا تم التعويض في المعادلة (٧ - ١) بقيمة ثابت التناسب $h = 0$ (عند التعويض قرب قيمة المقدار الأسي أولا في المقام وفي البسط ($\exp(-hc/\lambda kT) \approx 1 - hc/\lambda kT$ ثم عوض بقيمة $h = 0$). ومعنى هذا أن النتيجة الكلاسيكية (٤ - ١) ما هي إلا حالة خاصة من النتيجة العامة (٧ - ١) عند الحد الذي يكون فيه $h \rightarrow 0$.

ونخلص من هذا بأن تجارب إشعاع " الجسم الأسود " لم يكن ممكنا تعليلها في ظل قوانين الميكانيكا الكلاسيكية وقد قدم بلانك مبدأ جديدا في حينه يتعارض مع القواعد الكلاسيكية وهو مبدأ الطاقة المكماة principle of quantization of energy وينص على أن الطاقة تكتسب وتنبعث في صورة وحدات. كل وحدة قائمة بذاتها ومستقلة تماما عن الوحدات الأخرى. الوحدة من الطاقة تسمى

Quantum وتساوي hν حيث h هو ثابت بلانك و ν هـو تـردد الـضوء الممتص أو المنبعث .

مثال ١ – ١ :

سخنت فجوة حجمها ١ سم٣ لدرجة حرارة k ١٥٠٠ . احسـب كمية الطاقـة داخل الفجوة المنبعـثة كضوء له الطول الموجي :

أ) ٥٥٠ -٥٧٥ nm (الضوء الأصفر)

ب) ١٠٠٠ -١٠٢٥ nm (تحت الحمراء)

الحل :

أ) متوسط الطول الموجي = ٥٦٢,٥ nm ; ٢٥ nm = dλ

بالتعويض في المعادلة (٧ - ١)

{٨ =πdF{ $(٥٦٢,٥x١٠^{-٩}\ m)^{٥}$ / (٢,٩٩٨x١٠^{٨} ms) (٦,٦٢٦x١٠$^{-٣٤}$ J.s)

x{exp- $\left[\frac{-٦.٦٢٦x١٠^{-٣٤}x٢.٩٩٨x١٠^{٨}}{٥٦٢.٥x١٠^{-٩}x١.٣٨١x١٠^{-٢٣}x١٥٠٠}\right]$d{λ

=[(٠٥,١٧-) e$^{-٤}$Jm ٨,٨٦٦ x١٠٧ []m ٢٥x١٠$^{-٩}$] Jm$^{-٣}$ ٨,٧٥x١٠$^{-٨}$ =

وفي فجوة حجمها ١سم٣ فإن الطاقة تكون J ٨,٧٥ x١٠$^{-١٤}$

وبإعادة الحسابات عند متوسط الطول الموجي ١٠١٢,١٥ nm

dλ = ٢٥ nm فإن الطاقة تساوي J ٩,٠٢ x١٠$^{-١٢}$

وهذا يعني أن الطاقة في هذه الحالة الأخيرة أكبر ١٠^{٣} مرة عن تلك المـصاحبة للضوء الأصفر.

١-٢-٢ الطيف الذري و الجزيئي Atomic and Molecular spectra

إن تجارب كشف اللهب التي نجريها في معامل الكيمياء العامة مـا هـي فـي الحقيقة إلا دراسة بدائية لطيف الأملاح غير العضوية التـي نتعـرف عليهـا. فأملاح الصوديوم مثلا تعطي اللون الأصفر الذهبي المميز لها في تجارب كشف

اللهب. في حين أن أملاح البوتاسيوم تعطي اللون الأحمر وهكذا. وقـد بـدأت دراسة الطيف الذري أو الجزيئي في بداية القرن الحالي بمجموعة التجارب التي تشمل إعطاء طاقة كبيرة في صورة حرارية، أو فرق جهد كهربائي كبير لغـاز محبوس تحت ضغط منخفض في أنبوب مفرغ. يتبع عملية الإثارة هذه انبعاث ضوء من الأنبوب يمكن تجميعه وإسقاطه على فيلم حساس. ويوضح الشكل رقم (١-٣) طيف الضوء المنبعث من إثارة الزئبق مثلا.

محذوف: <sp>

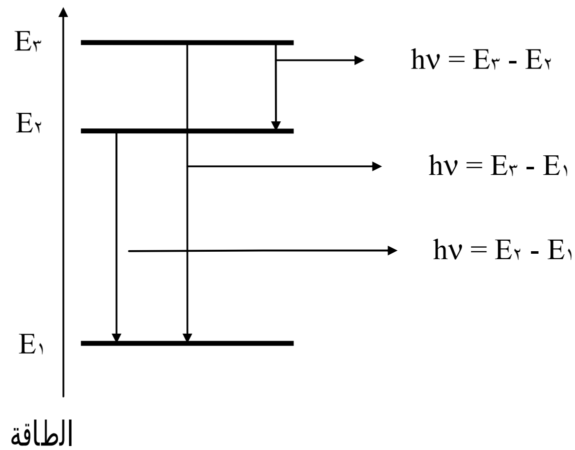
شكل (١-٣): طيف الضوء المنبعث نتيجة لإثارة ذرة الزئبق.

وقد لوحظ أن الطيف الذري يتميز بخاصيتين أساسيتين :

أ) الطيف مميز لأقصى درجة highly characteristic للمادة المـسببة لـه فهو كبصمات الأصابع لهذه المادة.

ب) يتكون الطيف من مجموعة من الخطوط الحادة sharp lines ذات الأطوال الموجية المحددة التي لا تتغير مهما تغير مصدر الإثارة أو نوع الإناء.

وعجزت قوانين الفيزياء الكلاسيكية عن تفسير هذه الظاهرة حتى تم تطبيق مبدأ بلانك على المادة كما طبق على الطاقة. فلقد افترض أن للمـادة عـدة حـالات متاحة معروفة مـسبقا ومحـددة principles of quantization of matter ، وكل حالة قائمة بذاتها ومستقلة عن الحالات الأخرى، ولها طاقة معروفة، وعند إثارة المادة فإنها تنطلق من حالتها المستقرة إلى إحدى الحالات المثارة التـي لا تستطيع أن تمكث فيها إلا مدة قصيرة جدا تعود بعدها إلى الحالـة المـستقرة. وتفقد الفرق في الطاقة بين الحالتين على شكل ضوء له تردد محـدد. ويوضـح الشكل (١-٤) بعض الانتقالات المسببة للطيف الذري.



شكل (١-٤): الانتقالات بين الحالات المختلفة للمادة والمسببة للطيف الخطي.

وأمكن بهذا التعليل الكمي للطيف شرح الطيـف الـذري وخاصـة طيـف ذرة الهيدروجين الذي تمت دراسته بنجاح في ذلك الوقت. وبدأ مبـدأ بلانـك فـي الرسوخ وشغل الحيز الأكبر من تفكير العلمـاء لتعليـل الظـواهر المرتبطـة بالتركيب الذري أو الجزيئي.

١-٢-٣ ظاهرة التأثير الكهروضوئي
Photoelectric Effect

يوضح الشكل رقم (١-٥) الدائرة الكهربائية المستخدمة لدراسة ظاهرة التـأثير الكهروضوئي. يحتوي الأنبوب المفرغ على قطبين أحدهما (أ) مطلـي بمـادة حساسة للضوء photo sensitive وعند توصيل الدائرة مـن خـلال المفتـاح (A) فإن القطب (أ) يكون سالبا في حين أن القطب (ب) يكون موجبا. ويمـر التيار في الدائرة فقط بعد سقوط الضوء على القطب (أ) حيـث تنبعـث منـه إلكترونات تنجذب إلى القطب (ب) الموجب. وبمجرد وصولها إلـى القطـب (ب) تعتبر الدائرة مغلقة. ويمكن قراءة التيار في جهاز قياس التيار. كما يمكـن

تعيين طاقة الحركة للإلكترونات المنبعثة إذا تم توصيل الدائرة من خلال المفتاح (B) وفي هذه الحالة يكون القطب (ب) هو القطب السالب. وباستخدام المقاومة المتغيرة يمكن تغيير الجهد السالب حتى يمنع وصول الإلكترونات إلى القطـب (ب). أي حتى تصبح قراءة الأمبير في هذه الحالة صفرا. وعندها تكافئ طاقة حركـة الإلكترونـات المنبعثـة (١/٢ mv٢) طاقـة التنـافر، أي أن

$$١/٢\ mv^{٢} = e\ .V$$

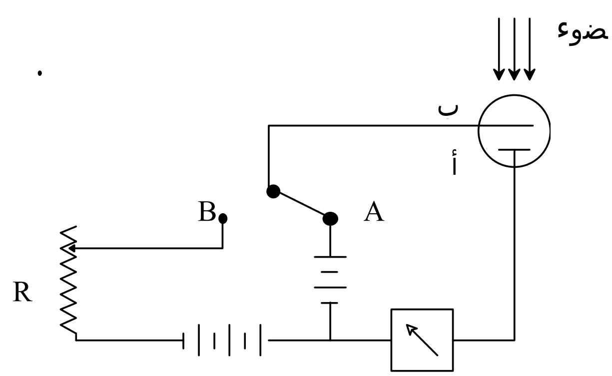
حيث الجهد V يسمى جهد الإيقاف stopping voltage .

وقد تم ملاحظة الآتي عند إجراء هذه التجارب:

١- لا تنبعث أي إلكترونات من سطح القطب مهما كانت شدة الضوء الساقط إلا إذا كان تردد الضوء أكبر من قيمة معينة يطلـق عليـه التـردد الفاصـل Threshold frequency ν_o

٢- عند ترددات أكبر من التردد الفاصل فإن طاقة حركة الإلكترونات المنبعثـة تتناسب طرديا مع تردد الضوء الساقط.

٣- تتناسب شدة التيار طرديا مع شدة الضوء الساقط.



شكل (١-٥): رسم تخطيطي للـدائرة الكهربائيـة المـستخدمة لدراسـة ظـاهرة التـأثير الكهروضوئي .

ولتفسير هذه الظواهر على أساس قوانين الفيزياء الكلاسيكية فإنه عند سقوط الموجة الضوئية على السطح الحساس يبدأ المعدن في امتصاص وتجميع هذه الطاقة الضوئية حتى يصل المخزون منها إلى الحد الكافي لخروج الإلكترونات. أي أن هناك فترة زمنية بين لحظة سقوط الضوء ولحظة خروج الإلكترونات. هذه الفترة الزمنية تزيد وتنقص حسب شدة الضوء الساقط. ولكن كما هو واضح من الملاحظات السالفة الذكر فإن خروج الإلكترونات من عدمه لا يعتمد إطلاقا على شدة الضوء و إنما على تردده. وحتى في حالة الموجات الضوئية الضعيفة والمميزة بتردد أعلى من التردد الفاصل فإن الإلكترونات تنبعث تلقائيا من السطح بدون أي تأخر زمني.

وقد أعطى أينشتين تعليلاً مرضيا لهذه الظاهرة باستخدام مبدأ الكم. حيث افترض أن الإلكترونات داخل المادة الصلبة مرتبطة بقوة تجاذب مع النواة. ولخروج هذه الإلكترونات من سطح المادة الصلبة لابد وأن تحصل على كمية من الطاقة تعادل أو تفوق قوة التجاذب هذه. وبتطبيق مبدأ بلانك على الموجات الضوئية تخيل أينشتين أن الضوء مكون من وحدات طاقة كل وحدة منها قائمة بذاتها ومستقلة تماما عن الوحدات الأخرى ولها طاقة $E = h\nu$ وأطلق على وحدة الطاقة الضوئية الاسم فوتون photon . وعند سقوط الضوء على السطح الحساس فإن أحد الإلكترونات على السطح مباشرة يمتص وحدة ضوئية واحدة photon فإذا كانت قيمة هذه الوحدة من الطاقة تساوي أو أكبر من قوة تجاذب الإلكترون داخل الجسم الصلب فإن الإلكترون يترك السطح وينبعث إلى الخارج. أما إذا كانت طاقة الفوتون أقل من قوة التجاذب فإن الإلكترون لا يستطيع الانبعاث إلى خارج السطح. أي أن طاقة الوحدة وليست الطاقة الكلية هي التي تحدد ما إذا كان انبعاث الإلكترونات ممكنا أم لا. وكما هو واضح فإن طاقة الفوتون تعتمد أساسا على تردد الضوء الساقط. ويعلل هذا الملاحظة الأولى في وجود التردد الفاصل.

وعندما يكون تردد الضوء الساقط أكبر من التردد الفاصل فإن جـزاً مـن الطاقة الممتصة يستهلك للتغلب على قوة التجاذب داخل الجسم الصلب (مقـدار ثابت للفلز الواحد) والباقي من الطاقة يمثل طاقة حركة الإلكترون المنبعث

$$\text{١/٢}\ mv^{\text{٢}} = h\nu - h\nu_o$$
$$= h\nu - W$$

حيث $W = h\nu_o$. وتعبر عن الطاقة اللازمة للتغلب على قوة التجاذب وتسمى دالة الشغل Work Function ويوضح جدول رقم (١-١) قيم W لـبعض الفلزات المختارة. أما عدد الإلكترونات المنبعثة (شدة التيار) فإنه يتوقف علـى عدد الفوتونات الساقطة على السطح (شدة الموجات الضوئية) كما هو وارد فـي الملحوظة الثالثة.

جدول (١-١) : دالة الشغل لبعض الفلزات المختارة

الفلز	دالة الشغل (eV)
ليثيوم	٢,٩٠
صوديوم	٢,٧٥
بوتاسيوم	٢,٣٠
روبيديوم	٢,١٦
سيزيوم	٢,١٤
سيليكون	٤,٨٥

ونخلص في هذا الفصل إلى أن أينشتين أسس مبدأ جديداً ومثيراً طبق فيـه مبدأ بلانك للكم على الضوء. فمن المعلوم أن الضوء عبـارة عـن موجـات كهرومغناطيسية تظهر خواص التداخل والانكسار وخلافه - ولا يمكن تعليل هذه الظواهر إلا على أساس الطبيعة الموجية للضوء. ولكن في حالة امتـصاص أو انبعاث الضوء (تصرفه كصورة من صور الطاقة) فإن الضوء يظهـر طبيعـة

مختلفة تماماً هي طبيعة الجسيمات ويتصرف وكأنه مكون من وحدات مـستقلة عن بعضها البعض تمتص وتفقد بصفة مستمرة. هذه الطبيعة المزدوجة للضوء Dual - Nature of Light جاءت كصدمة للعلماء في ذلك الوقت ولكـنهم كانوا على استعداد لتقبلها نظراً لاعتمادها على مبدأ بلانك ونجاحها في تعليـل وشرح ظاهرة التأثير الكهروضوئي.

مثال ١ – ٢ :

إذا كانت دالة الشغل لفلز السيزيوم تـساوي $٣,٤٣x ١٠^{-١٩}$ J إحـسب طاقـة الحركة لإلكترون منبعث بضوء له الطول الموجي nm ٥٥٠ ما هـو جهـد الإيقاف في هذه الحالة؟ ما هو العدد الكلي للإلكترونات المنبعثة إذا كانت الطاقة الكلية الممتصة عند الطول الموجي nm ٥٥٠ هي $١,٠٠ x ١٠^{-٣}$ J ؟

الحل :

$$\lambda E (Photon) = h\nu = hc/$$

$$= \frac{٦.٦٢٦x١٠^{-٣٤} x٢.٩٩٨x١٠^{٨}}{٥٥٠x١٠^{-٩}} = ٣.٦٢x١٠^{-١٩} J$$

ولحساب طاقة الإلكترون المنبعث فإن :

$$E_{electron} = E_{photon} - W$$
$$= ٣,٦٢x١٠^{-١٩} - ٣,٤٣x١٠^{-١٩}$$
$$= ١,٩ x ١٠^{-٢٠} J$$

أما جهد الإيقاف فيمكن حسابه من العلاقة

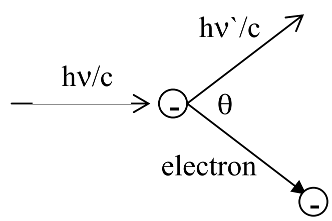
$$E_{electron} = e .V$$
$$V = E_{elctron} / e = ١,٩x١٠^{-٢٠} / ١,٦٠٢ x ١٠^{-١٩}$$
$$= ٠.١٢ J / C = ٠,١٢ V$$

عدد الإلكترونات المنبعثة ما هو إلا عدد الفوتونات الساقطة على السطح

$$E_{(total)} = nh\nu$$
$$n = E / h\nu = ١,٠٠x١٠^{-٣} / ٣,٦٢x١٠^{-١٩}$$
$$= ٢,٧٦x١٠^{١٥} \text{ Photon}$$

١-٢-٤ ظاهرة تأثير كومتون
Compton Effect

عندما يصطدم الضوء بالإلكترونات فإنه يتشتت ويحدث إزاحة لتـردده، ومـن الناحية الكلاسيكية فإنه من المتوقع حدوث هذه الإزاحة بقيم مختلفة وعلى ذلـك يغطي الضوء المشتت مجالا واسعا من الترددات. ولكن الملاحظ عملياً أن تردد الضوء المشتت يزاح بمقدار ثابت واحد لكل الأشعة ويعتمد فقط على درجة ميل التشتت. وفوق ذلك فإن مقدار الإزاحة لا يعتمد على تردد الضوء الساقط. هـذا السلوك يسمى "تأثير كومتون Compton Effect" شكل رقم (١-٦)



شكل (١-٦): تشتت الضوء تبعا لظاهرة تأثير كومتون.

ولقد أمكن تفسير هذا السلوك بنجاح تام بتطبيق مبدأ الكم لبلانك على الأشـعة. واعتبار أن الفوتون وهو وحدة الطاقة هو الذي يصطدم بـالإلكترون وقـد تـم الوصول إلى معادلة توضح العلاقة بين إزاحة الطول الموجي للضوء المـشتت وزاوية التشتت وهذه العلاقة هي

$$\Delta\lambda = \left(\frac{h}{mc}\right)(١ - \cos\theta)$$

حيث θ هي زاوية التشتت والمقدار h/mc سـمي طـول موجـة كومتـون للإلكترون Compton Wavelength of the Electron وبالتعويض عن قيم $m = ٩,١x١٠^{-٣١}$ kg ; $c = ٣x١٠^{٨}$ m/s فإن الطول الموجي لإلكترون كومتون يكون $٢,٤٢٦x١٠^{-١٢}$ m وعلى ذلك فإن مقدار أكبر إزاحـة للطـول

الموجي عند زاوية التشتت $\theta = ١٨٠^{\circ}$ هو ٤٫٨٣٢ pm فقط مهما كان الطول الموجي للضوء.

٣-١ نظرية بوهر لذرة الهيدروجين

Bohr Theory for the Hydrogen Atom

أصبح العلماء على نهاية الربع الأول من القرن العشرين متفهمين تماماً لمبـدأ الكم لبلانك الذي أصبح الأداة الرئيسية فـي فهـم الظـواهر الميكروسـكوبية Microscopic Phenomena والمرتبطة بالتركيـب الإلكترونـي للـذرات والجزيئات. وكان أول تطبيق متكامل لهذا المبدأ في مجال التركيب الذري هـو نظرية بوهر لذرة الهيدروجين. و قد سبق للطالب التعرض لهذه النظريـة فـي سنوات دراسته السابقة. وسوف نوجز هنا أهم ملامح هذه النظريـة ومجـالات نجاحها وفشلها. الفروض الرئيسية لنظرية بوهر :

١- طبق بوهر مبدأ الكم لبلانـك علـى ذرة الهيـدروجين (راجـع الفـصل (١ -٢ - ٢) عن الطيف الذري و الجزيئـي) فـأفترض أن لإلكتـرون ذرة الهيدروجين عدة مستويات طاقة متاحة له. كل مستوى مستقل بذاته ومنفصل تماما عن المستويات الأخرى ويميز بطاقة معينة ونصف قطر معين. ويميز كل مستوى برقم n ويسمى رقم الكم حيث $n = ١, ٢, ٣, ...$.

٢ - إن عزم الحركة الزاوي Angular Momentum للإلكترون في أي من هذه المدارات المسموح لـه بالتواجـد فيهـا يجـب أن يعطـى بالعلاقـة $\pi m.v.r = n\,h/٢$; $n = ١, ٢, ٣, ...$ و سمي هذا الشرط " **شرط الكم لبوهر Bohr Quantum Condition**" ولم يستطع بوهر تقـديم أي إثبات رياضي لهذا الشرط.

٣- يسمح بانتقال الإلكترون من مستوى إلى المستويات الأعلى إذا امتص طاقة تساوى الفرق بين المستويين وفي حالة سقوطه من المستوى الأعلـى إلـى

المستوى الأدنى في الطاقة فإنه يفقد الفرق في صورة طاقـة ضـوئية هـي المسؤولة عن طيف ذرة الهيدروجين.

ويبدو من قراءة هذه الفروض أن بوهر طبق مبدأ الكم تطبيقاً كاملاً علـى إلكترون ذرة الهيدروجين. وهذا في الحقيقة صحيح من الوجهة النظريـة. أمـا عملياً فإن الإثبات الرياضي لبوهر قد اعتمد أساساً على توازن القوى الكلاسيكي بين قوى الطرد المركزي وقوى التجاذب بـين الإلكترونـات والنـواة. أي أن النظرية أوجدت فكرتين في الأصل متعارضتين معاً في هيكل واحد.

وقد نجحت نظرية بوهر نجاحاً مبهراً في تعليل وشرح وحـساب الطيـف الذري للهيدروجين وطاقته. وهذه النظرية هي السبب الأساسي لمنح بوهر جائزة نوبل للعلوم. ولكن بالدراسة المتأنية لهذه النظرية اتضحت أوجه القصور التالية:

١- إن هذه النظرية معزولة تماماً ولا يمكن تطبيقها على أي ذرة أخرى غيـر ذرة الهيدروجين. أي أنها لا يمكـن أن تكـون الأسـاس لفهـم التركيـب الإلكتروني الذري عموماً.

٢- حتى بالنسبة لطيف ذرة الهيدروجين فإن النظرية عجزت عن تقديم الـشرح المقنع لظاهرة زيمن Zeeman Effect وهي عملية انفصام خطوط الطيـف إلى خطين أو أكثر في وجود المجالات المغناطيسية وكذلك عجزت النظريـة عن تقديم تفسير لظاهرة اختلاف شدة خطوط الطيف.

وقد أعزي النجاح المحدود للنظرية بتطبيقها لمبدأ الكم. أما فشلها فقد ارجع إلى المعاملات الكلاسيكية التي بنيت عليها الحسابات الرياضية وأصبح واضـحا تماماً أنه حتى يمكن تقديم نظرية متكاملة للتركيب الإلكتروني الذري فإنه يجـب الاعتماد الكامل وغير المنقوص على مبدأ الكم والبعد تماماً عن القوانين والأسس الكلاسيكية للميكانيكا.

١-٤ افتراض دي برولي

De Broglei Hypothesis

عقد دي برولي مقارنة بين الإلكترون والضوء. فهذا الأخير كما أوضح إينشتين (راجع الفصل ١-٢-١) له طبيعة مزدوجة . Dual Nature وهـي طبيعـة موجية وطبيعة جسيميه. فالطبيعة الغالبة وهي الطبيعة الموجية Wave nature وتظهر في أغلب تصرفات الضوء من انكسار وانعكـاس وتـداخل وخلافـه. والطبيعة الجسيمية Particle - Nature وهي حالة خاصة وتظهر فقط في حالة امتصاص وانبعاث الضوء. أي إننا يجب أن نعامل الضوء في كل حالة معاملـة مناسبة لطبيعته فنطبق قوانين الموجات عندما نتعامل مع ظواهر ضوئية عاديـة ونطبق قوانين الجسيمات عندما نتعامل مـع امتـصاص أو انبعـاث الـضوء. والإلكترون ما هو إلا جسيم له كتلة وله سرعة يمكن تقييمها وكذلك شحنة سالبة أمكن تقييمها بدقة تامة. وطبيعة الجسيم هذه هي الغالبة للإلكترون الحـر غيـر المقيد في حركته أما عندما يحصر الإلكترون في نطاق صغير مثل نطاق الذرة أو الجزيء ونتيجة للسرعة العالية التي يتحرك بها الإلكترون (تضارع سرعة الضوء) في هذا النطاق المحدد، فإن الإلكترون يتصرف وكأنه موجة. ويجب في هذه الحالة أن نطبق عليه قوانين الموجات وليست الجسيمات. أي أن دي برولي أفترض طبيعة مزدوجة للإلكترون Dual Nature of the Electron مثلما أفترض أينشتين نفس الشيء للضوء.

ولقد عزز دي برولي افتراضات باشتقاق معادلة رياضية تجمع بين الطبيعة الموجية والجسيمة للإلكترون. فمن علاقة أينشتين لتحويل الكتلة إلى طاقة فإن

$$E = mc^{٢}$$

حيث c هي سرعة الضوء. وبتطبيق علاقة بلانك فإن

$$E = h\nu = h\, c/\lambda$$

و بمساواة المعادلتين فإن

$$h\, c/\lambda = mc^{٢}$$

$$\lambda = h/mc$$

وفي حالة إلكترون يتحرك بسرعة v m/s تتقارب مع سرعة الـضوء c فـإن علاقة دي برولي تكون

$$\lambda = h/mv \qquad (١ - ٨)$$

وتعني هذه العلاقة أن أي جسم له كتلة m وسـرعة v فـإن الطـول المـوجي المصاحب لحركته هو λ.

مثال ١- ٣ :

احسب الطول الموجي لكل من

أ) كرة تنس كتلتها ٦٥ g تتحرك بسرعة ٤٥ m/s .

ب) إلكترون طاقة حركته ٢٠٥ eV .

الحل

أ) من علاقة دي برولي

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{٦.٦٢٦x١٠^{-٣٤}Js}{٦٥x١٠^{-٣}kg\ x\ ٤٥\ m/s} = ٢.٣x١٠^{-٣٤}m$$

ب) طاقة الحركة للإلكترون هي ٢٠٥ eV أي بوحدات SI هي

$$T = ٢٠٥\ eV\ \ x\ ١,٦x١٠^{-١٩}\ J/eV = ٣٢٨\ x\ ١٠^{-١٩}\ J$$

وحيث إن

$$T = \tfrac{١}{٢}mv^{٢} = \frac{m^{٢}v^{٢}}{٢m} = \frac{P^{٢}}{٢m}$$

وبالتعويض عن P بقيمته من علاقة دي برولي فإن

$$T = \frac{h^{٢}}{٢m\lambda^{٢}}$$

وعلى ذلك فإن الطول الموجي للإلكترون يعطى بالمعادلة

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{٢mT}} = \frac{٦.٦٢٦x١٠^{-٣٤}}{(٢x٩.١x١٠^{-٣١}x٣.٢٨x١٠^{-١٧}J)^{\frac{١}{٢}}} = ٨.٥٧x١٠^{-١١}m$$

$$= ٠,٠٨٥٧\ \ nm$$

ويتضح من هذا المثال أن للأجسام الكبيرة Macroscopic مثل كرة التنس طول موجي مصاحب لحركتها متناه في الصغر. وبالتالي فإن الطبيعة الموجية لهـذه الأجسام لا يمكن الإحساس بها أو التعرف عليهـا بالتجـارب المعمليـة. أمـا الإلكترون فإن الطول الموجي المصاحب لحركته له مقـدار لا يمكـن تجاهلـه وبالتالي يمكن دراسة الخواص الموجية للإلكترون معملياً. وحيث إن فرضية دي برولي هذه تعتبر تغيرا أساسيا وعميقا في فهم ومعاملة الإلكترون فإن العلمـاء تقبلوها بحذر شديد و بدءوا في إجراء تجارب معملية لدراسة مدى صحة هـذه الفرضية.

١-٥ حيود الإلكترونات

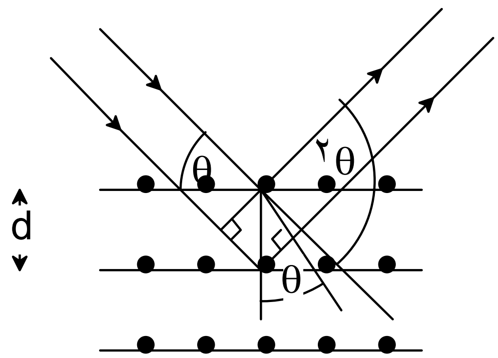
Electron Diffraction

من المعروف أن الضوء إذا سقط على سطح بلورة فإنه ينعكس وتعتمد زاويـة إنعاكسه على المسافة بين مستويات ترتيب الذرات في البلورة والطول المـوجي للضوء الساقط. وقد تم دراسة انعكـاس شـعاع أحـادي الطـول المـوجي Monochromatic من الإلكترونات من سطح بلورة النيكل. ويوضح الـشكل رقم (١-٧) زاوية السقوط والانعكاس لشعاعين إلكترونين ساقطين على السطح الأول والثاني من أسطح البلورة..

وقد تم دراسة طيف الانعكاس وثبت أنه متماثل تماماً في تفاصيله الدقيقـة مع طيف انعكاس أشعة x . ولحساب الطول الموجي للإلكترونـات المنعكـسة استخدمت المعادلة:

$$n\lambda = ٢d \sin \theta \qquad , n = ١, ٢, ٣, ...$$

حيث θ هي زاوية الانعكاس و d هي المسافة بين سطحين متتاليين في البلورة. واتضح أن الأطوال الموجية المعينة عملياً متوافقة تماماً مع تلك المحسوبة مـن علاقة دي برولي مما أعطى العلماء ثقة كبيرة في افتراضات دي برولي.



شكل (١-٧): انعكاس شعاع من الإلكترونات من أسطح البلورات المعدنية.

مثال ١ – ٤ :

في إحدى التجارب المصممة لدراسة انعكاس الإلكترونات من السطح البلـوري اتضح أن قمة التداخل تحدث عند زاوية انعكاس قدرها ٦٥° عندما تكون طاقة الإلكترونات الساقطة ٥٤,٠ eV احسب الطول الموجي المصاحب للإلكترونات. وقارن بينه وبين ذلك المحسوب نظرياً باستخدام علاقة دي برولي علمـاً بـأن المسافة بين سطحين متتاليين في البلورة هي ٠,٩١ Å .

الحل :

عند قمة الامتصاص فإن n = ١ وبالتالي

$$\lambda = ٢d \sin \theta = ٢ \, (٠,٠٩١ \text{ nm})(\sin ٦٥) = ٠,١٦٥ \text{ nm}$$

طاقة حركة الإلكترونات بالجول تساوي

$$T = (٥٤,٠ \text{ eV})(١,٦x١٠^{-١٩} \text{ J/eV}) = ٨,٦٤x١٠^{-١٨} \text{ J}$$

$$= ١,٦٧x١٠^{-١٠} \text{ m} \quad \lambda = \frac{h}{\sqrt{٢mT}} = \frac{٦.٦٢٥x١٠^{-٣٤}}{(٢x٩.١x١٠^{-٣١}x٨.٦٤x١٠^{-١٨})^{\frac{١}{٢}}}$$

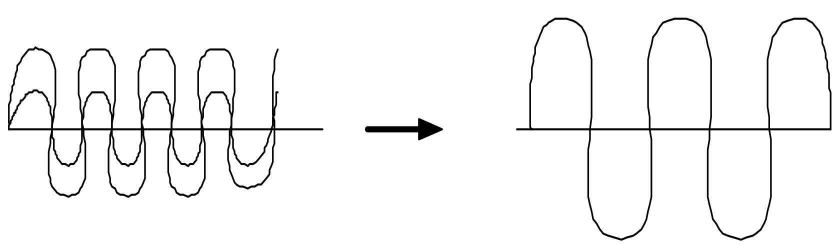
$$= ٠,١٦٧ \text{ nm}$$

وهو توافق رائع بين القيم العملية وتلك المحسوبة باستخدام فرضية دي برولي.

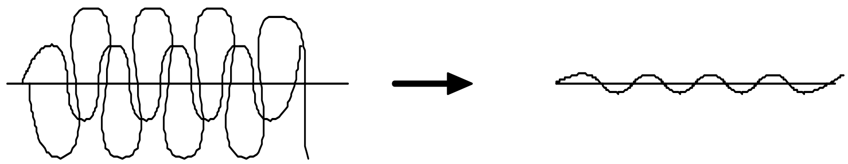
٦-١ المفهوم التطبيقي لفرض دي برولي

Physical Significance of De Broglei Hypothesis

عند تواجد إلكترون في ذرة ما فإنه يتصرف كموجة تنتشر في حيز مـا حـول نواة هذه الذرة. ويتم الانتشار على أبعاد من النواة (أنـصاف أقطـار) معينـة ومحددة مسبقاً. وهذه الأبعاد تتحدد أساساً من كون الموجة الإلكترونية تتصرف كموجة موقوفة. ولفهم هذه النقطة بصورة أوضح دعنـا نراجـع معـاً بعـض خصائص الموجات وبالذات خاصية التداخل. فمن المعلوم أنـه لـو وجـدت موجتان في نفس الحيز فإنهما تتداخلان. فـإذا كانـت الموجتـان المنتـشرتان Propagating Waves المتداخلتان في نفس الطور In-Phase (أي قمة مـع قمة وقاع مع قاع) فإن المحصلة هي المجموع الجبـري للمـوجتين أي عمليـة تقوية. أما إذا كانت عملية التداخل بين نفس المـوجتين فـي خـارج الطـور Out–of Phase (أي قمة مع قاع وقاع مع قمة) فإن المحصلة هـي الفـرق بين الموجتين أي ضعف وهدم لهمـا. ويـسمى النـوع الأول مـن التـداخل "**التداخل البناء**" Constructive Interference أما النوع الثاني فإنه يـسمى "**التداخل الهدام**" Destructive Interference .

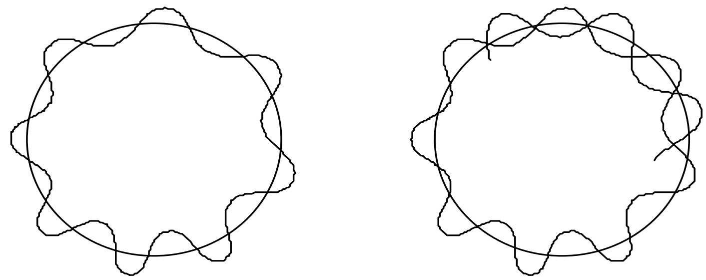


شكل (١-٨ أ): تداخل بناء بين موجتين.



شكل (١-٨ ب): تداخل هدام بين موجتين.

وننتقل الآن إلى نوع آخر مـن الموجـات وهـي الموجـات الموقوفـة Standing Waves وهي الموجات المحصورة داخل حيز محدد ولا يـسمح لها بالانتشار الحر. يوضح الشكل (١-٨) موجة موقوفة بين النقطتـين **أ، ب** . في مثل هذه الحالة فإن الموجة إذا ابتدأ انتشارها من النقطة **أ** فإنها تتحرك حتى تصل إلى النقطة **ب** عندها تنعكس على نفسها وبالتالي يتغير اتجاه عزم الحركة مع احتفاظ الموجة بجميع خصائصها. وعند انعكاسها على نفسها فإنها إمـا أن تـنعكس في نفس الطور In Phase وفي هذه الحالة يتم تـداخل بنـاء بـين الموجة ونفـسها Constructive Interference (الـشكل (١-٨ أ)) أو أن تنعكس في خارج الطور Out of Phase وفي هذه الحالة يـتم تـداخل هـدام وتضعف الموجة أو تتلاشى Destructive Interference(الشكل (١-٨ ب)). وتتوقف نوعية التداخل على طول المسافة بين النقطتين، وعلى الطول المـوجي لهذه الموجة. فالشرط اللازم لحدوث التداخل البناء هو أن تكون المـسافة بـين النقطتين أ ، ب يساوي طول موجي أو مضاعفاته. أي أن المسافة بـين **أ** ، **ب** لابد وأن تساوي λn حيث n هو عدد صحيح موجب $n = ١, ٢, ٣, \ldots$. أما إذا كانت المسافة بين **أ** ، **ب** تختلف عن هذه القيم، فإن الموجة تتـداخل مـع نفسها تداخلا هداما يصل إلى أقصى مداه عندما تكون المسافة بين **أ** ، **ب** تساوي λ ½ أو مضاعفاتها وفي هذه الحالة تتلاشى الموجة تماماً.



$٢\pi r = n\lambda$ $٢\pi r \neq n\lambda$

(a) (b)

شكل (١-٩): انتقاء المدارات لموجة دي برولي لإلكترون ذرة الهيدروجين.

والآن وإذا عدنا إلى بداية هذا الفصل وراجعنا مقولة دي برولي بأن الإلكترونات تتصرف كموجة موقوفة داخل الذرة فإن هذا يعني أن المدار المسموح بانتـشار الإلكترون فيه يبدأ من نقطة **أ** وينتهي عند نفس هذه النقطة ويجـب أن تكـون المسافة (طول محيط المدار) تساوي انحدار صـحيح مـن الطـول المـوجي للإلكترون (شكل(١-٩)) أي إن $٢ \pi \lambda n = r$ ويضمن هذا الشرط إنه على بعد r من النواة فإن الموجة الإلكترونية ستشغل مدارا يسمح لها بالتـداخل البنـاء. وبمعني آخر فإن هذا الشرط هو شرط انتقاء لأنصاف أقطار المـدارات التـي يسمح بتواجد الإلكترونات فيها. أما جميع الأبعاد الأخرى فإنها تمـثل مـدارات إذا حدث وتواجد الإلكترون فيها فإنه يتلاشى نتيجة لتداخله الهـدام مـع نفـسه.

وبالتعويض بقيمة λ من معادلة دي برولي فإن

$$r = n\, h/mv\pi\ ٢$$

وبترتيب هذه المعادلة فإن

$$\pi mvr = n\, h/٢$$

وهو نفس شرط الكم لبوهر الذي سبق تقديمه أثناء استعراض نظرية بوهر.

ونخلص من هذا الباب بركيزتين أساسيتين:

أولا أن مبدأ الكم لبلانك هو مبدأ أساسي Fundamental في سلوك الطاقـة والضوء والمادة وأنه لا يمكن فهم أو تفسير الظواهر الميكروسـكوبية Microscopic إلا بتطبيق هذا المبدأ تطبيقاً كاملاً.

ثانيا الطبيعة المزدوجة للإلكترونات. فالإلكترون ما هو إلا جـسيم لـه كتلـة وسرعة وشحنة وتنطبق عليـه جميـع قـوانين الجـسيمات (الميكانيكـا الكلاسيكية) أثناء حركته الحرة. أما إذا قيد في نطاق محدد مثل النطـاق الذري أو الجزيئي فإنه يتصرف وكأنه موجة. ويجـب فـي مثـل هـذه الحالات تطبيق قوانين الموجات على هذا الإلكترون. وأصـبح واضـحاً تماماً أن أي نظرية تقدم شرح التركيب الذري أو الجزيئي لابد وأن ترتكز ارتكازاً أساسياً وكاملاً على هاتين الركيزتين وتتجنـب تمامـاً الأفكـار الكلاسيكية .

تمارين

١- عند أي طول موجي تقع كثافة الطاقة لجسم أسود له درجة حرارة T تساوي :

أ) ٣٠٠٠ K ب) ١٠،٠٠٠ K ج) ٣٠٠ K

٢- سيروس هو من اكثر النجوم المعروفة سخونة. ويتمتع بطيف "جسم اسود" له الطول الموجي λ_{max} = ٢٦٠٠ Å . أوجد درجة حرارة هذا النجم .

٣- في عمليات الانفجار النووي يمكن أن تصل درجة احمرار الكتلة الملتهبة إلى K ١٠^٧ . ما هو الطول الموجي لقمة الانبعاث الضوئي λ_{max} في هذه الحالة. في أي منطقة من مناطق الضوء يقع هذا الطيف ؟

٤- احسب الطاقة لكل فوتون والطاقة لكل مول من الفوتونات إذا كان الطول الموجي هو :

a) ٦٠٠ nm (أحمر) b) ٥٥٠ nm (أصفر)

c) ٤٠٠ nm (أزرق) d) ١٥٠ pm (X - أشعة)

٥- ما هو عزم الحركة في الفوتونات في التمرين السابق.

٦- احسب طاقة حركة و سرعة الإلكترونات المنبعثة عند سقوط ضوء له الطول الموجي ٧٠٠ nm على سطح فلز السيزيوم .

٧- هل يمكن لأشعة منبعثة من مصباح زئبق (λ = ٤٥٣ nm) أن تؤدي إلى انبعاث إلكترونات من سطح فلز السيليكون ؟

٨- ما هو الحد الأقصى من الإلكترونات التي يمكن أن تنبعث من سطح فلز الروبيديوم عند امتصاصه طاقة قدرها ١،٠ x ١٠^-٢ J من ضوء له الطول الموجي ٢١٥ nm ؟ ما هي طاقة حركة الإلكترونات المنبعثة ؟ احسب جهد الإيقاف في هذه الحالة.

٩- عند سقوط أشعة لها الطول الموجي ٢٣٠ nm على سطح فلز الفضة، وجد أن جهد الإيقاف للإلكترونات المنبعثة هو ٠,٨ V أحسب دالة الـشغل و التردد الفاصل للفضة.

١٠- احسب الطول الموجي لـ دي برولیه لكل من :

أ) إلكترون له طاقة حركة تساوي ١٠٠ eV .

ب) بروتون له طاقة حركة تساوي ١٠° eV .

١١) يفترض أن عين الإنسان أكثـر حـساسية للـضوء ذو الطـول المـوجي ٥٥٠ nm حيث يمكنها أن تميز الإحـساس بعـدد لا يتجـاوز خمـسة فوتونات من هذا الطول الموجي. ما هو الحد الأدنى من الطاقة التي يمكن أن تتأثر به العين؟ قارن إجابتك مع الطاقة الحرارية (الطاقة لكـل جـزئ) عند درجة حرارة الجسم البشري (^{o}C ٣٧) .

١٢) اشتق علاقة تربط بين الطول الموجي لـ دي برولـي وجهـد الإيقـاف للإلكترونات المنبعثة .

١٣) عند سقوط ضوء على سطح فلز الصوديوم فإن جهـد الإيقـاف يـساوي ١,٨٣ eV عند طول موجي λ = ٣٠٠٠ Å ويساوي ٠,٨ eV عند طول موجي λ = ٤٠٠٠ Å . من هذه المعلومات و بمعلومية شحنة الإلكتـرون احسب :

ا) قيمة ثابت بلانك ب) التردد الفاصل.

ج) دالة الشغل لفلز الصوديوم .

١٤) احسب سرعة الإلكترون في المدار الأول لنموذج بوهر لذرة الهيدروجين؟

١٥) إذا علمت أن ذرة الهيدروجين لها طاقة حركة تقابل درجة حرارة قـدرها ٣٠٠ K . فهل يستطيع شعاع من هذه الذرات أن يتخلل بللورة لها أبعـاد بينية تتراوح بين d = ٠,١ – ٠,٢ nm ؟ علل إجابتك.