



تنتج المجاهر الإلكترونية صورًا باستخدام الإلكترونات التي تمتلك خصائص موجية كالضوء تمامًا. وبما أن الأطوال الموجية للإلكترونات يمكن أن تكون أصغر بكثير من نظيراتها للضوء المرئي، فإن هذا يجعل الحصول على تحليل وتكبير أعلى بكثير أمرًا ممكنًا. ويمكن للماسح الإلكتروني دون المجهر أن ينتج صورًا ذات نوعية ثلاثية الأبعاد. كذلك الناجمة من الخلايا الغياردية في أمعاء البشر الدقيقة التي يصل التكبير فيها إلى حوالي 2000 ضعف. وتبقى الغيارديا في ذهن الرحالة (وغيرهم) لشيوعها في المياه غير المعالجة، وحتى في المياه التي على الجبال المرتفعة، وهي تسبب التهابًا معويًا مؤذيًا يصعب التخلص منه.

## الفصل 27

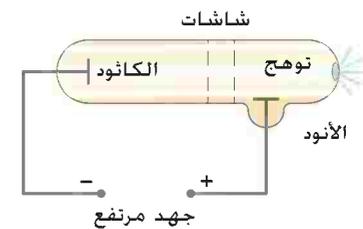
### نظرية الكم المبكرة والنماذج الذرية

أكملت نظرية الكم الجانب الآخر للتطور الذي هزَّ عالم الفيزياء في بداية القرن العشرين. (بعد أن شكلت نظرية النسبية لأينشتاين التطور الأول). وخلافًا لنظرية النسبية الخاصة، فإن تطور نظرية الكم تطلب ثلاثة عقود تقريبًا ليكتمل. إضافة إلى إسهامات كثير من العلماء في تطويرها، وبدأت نظرية الكم في عام 1900 مع فرضية الكم لبلاك، وتوجت في منتصف عشرينيات ذلك القرن بنظرية ميكانيكا الكم لشرودينغر وهايزنبرغ، والتي كانت فاعلة للغاية في تفسير تركيب المادة. إن اكتشاف الإلكترون في تسعينيات القرن التاسع عشر، والذي سنبدأ به هذا الفصل، يمكن أن يُقال بأنه حدّد بداية الفيزياء الحديثة، وشكّل نوعًا من التبشير بنظرية الكم.

#### 1-27 اكتشاف الإلكترون وخصائصه

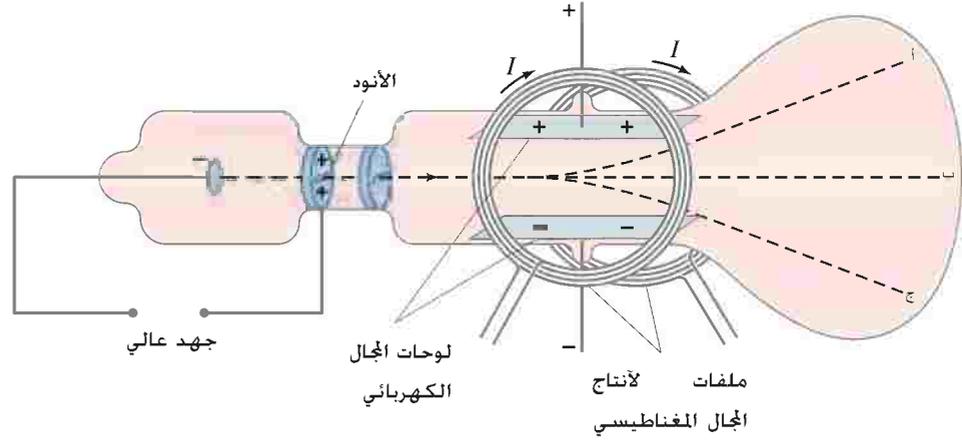
قرب نهاية القرن التاسع عشر، أجريت دراسات عديدة على التفريغ الكهربائي خلال الغازات النقية. وتكونت إحدى هذه الأدوات، كما هي مخططة في (الشكل 27 - 1)، من أنبوب زجاجي وُضِعَ فيه إلكتروان (قطبان كهربائيان) بعد أن تم تفريغه لتبقى كمية صغيرة جدًا من الغاز محصورة في داخله. وعندما طبق فرق جهد عالٍ جدًا على قطبيه الكهربائيين، ظهر وكأنّ الفضاء المعتم قد امتد منه نحو الخارج مبتدئًا من المهبط (الكاثود، القطب السالب) وامتد إلى الجانب الآخر للأنبوب، ليتوهج عندئذٍ طرف الأنبوب البعيد. وعند وضع شبكة أو أكثر تحتوي كلّ منها على ثقب صغير، كما هو مبين، انحصر التوهج في نقطة صغيرة عند نهاية الأنبوب. وظهر وكأنّ هناك "شيئًا" قد انبعث بواسطة المهبط، وسار عبر الأنبوب باتجاه طرفه الآخر. وسُمّيت هذه "الأشياء" أشعة المهبط. كان هناك كثير من الجدل في ذلك الوقت حول ماهية هذه الأشعة. وظنّ بعض العلماء أنّ هذا قد يشبه الضوء. ولكن ملاحظة إمكانية انحراف النقطة المضيئة عند نهاية الأنبوب إلى أحد الجوانب بواسطة

(الشكل 27 - 1) أنبوب تفريغ. في بعض النماذج، إحدى هذه الشبكات، هي الأنود (لوح موجب).



مجال كهربائي أو مغناطيسي دلّ على أنّ أشعة المهبط قد تكون جسيمات مشحونة. وكان اتجاه الانحراف متوافقًا مع خصائص شحنة سالبة. وإضافةً إلى ذلك، أمكن جعل مسار أشعة المهبط مرئيًا بواسطة توهج بسيط كنتيجة لاحتواء الأنبوب على أنواع معينة من الغازات النقية.

وكان قد تمّ تقدير الشحنة  $e$  لجسيمات أشعة المهبط (المفترضة) هذه، إضافةً إلى نسبة الشحنة إلى الكتلة  $e/m$  بحلول عام 1897. ولكن في العام ذاته، استطاع جي جي تومسون (1856 – 1940) أن يقيس  $e/m$  مباشرة، باستخدام الأداة المبينة في (الشكل 27 – 2). سُرّعت أشعة كاثود بواسطة فرق جهد مرتفع، وتركت لتمرّ من خلال زوجين من الألواح المتوازية المبنية داخل الأنبوب. وأنتج فرق الجهد المطبق بين اللوحين مجالًا كهربائيًا، في حين أنتج زوجٌ من الملفات مجالًا مغناطيسيًا.



الشكل 27 – 2 انحراف أشعة الكاثود بواسطة المجالين الكهربائي والمغناطيسي.

وعند وجود المجال الكهربائي بمفرده، مع كون اللوح العلوي موجبًا، انحرفت أشعة المهبط نحو الأعلى كما هو في المسار "أ" في (الشكل 27 – 2). وإذا وُجدَ المجال المغناطيسي منفردًا، ولنقل متجهًا صوب الداخل، فإنّ الأشعة تكون قد انحرفت جِهًا الأسفل على امتداد المسار "د". وهذه الملاحظات متوقعة فقط من جسم مشحون بشحنة سالبة. وقيمة القوة على الأشعة الناجمة من المجال المغناطيسي هي  $F_{\text{mag}} = evB$ ، حيث  $e$  هي الشحنة، أمّا  $v$  فهي سرعة أشعة المهبط (المعادلة 20 – 4). وفي غياب المجال الكهربائي، تنحني الأشعة في مسار مائل. وبتطبيق قانون نيوتن الثاني  $F = ma$  على شعاع كاثود يعطي:

$$evB = m \frac{v^2}{r}$$

ولذلك

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{Br}$$

ويمكن قياس كلٍّ من نصف قطر الانحناء  $r$ ، والمجال المغناطيسي  $B$ ، وإيجاد  $v$  عند تطبيق مجالين أحدهما كهربائي والآخر مغناطيسي. كما يمكن تعديل المجال الكهربائي  $E$  بحيث لا تنحرف أشعة المهبط، بل تتبع المسار "ب" في (الشكل 27 – 2). وفي هذه الحالة، فإنّ القوة (إلى أعلى) الناجمة من المجال الكهربائي  $F_{\text{el}} = eE$ ، ستتوازن مع القوة (إلى أسفل) الناجمة من المجال المغناطيسي

$$F_{\text{mag}} = evB \text{، ونستطيع أن نساوي القوتين. } eE = evB \text{، لنجد}$$

$$v = \frac{E}{B}$$

وعند دمج هذا مع المعادلة في الأعلى نحصل على

$$\frac{e}{m} = \frac{E}{B^2 r}$$

قياس  $e/m$

(1- 27)

ويمكن قياس كميات الجانب الأيمن جميعها، فبالرغم من عدم إمكانية تحديد قيمة كلٍّ من  $m$  و  $e$  على انفراد، إلاّ أنّه يمكن تحديد نسبتهما  $e/m$ . إنّ القيمة المقبولة حاليًا هي  $e/m = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ . وأصبحت أشعة المهبط تسمى **إلكترونات** بعد ذلك بفترة قصيرة.

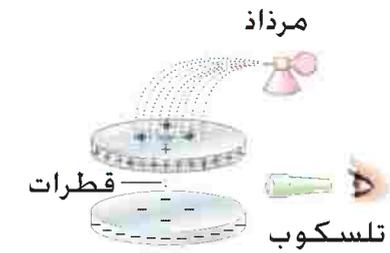
اكتشاف الإلكترون

إنّ "اكتشاف" الإلكترون، كالاكتشافات الأخرى الكثيرة في العلوم، لم يكن واضحًا كثيرًا مثل اكتشاف الذهب أو النفط. وكان التساؤل الجدير هو: هل يجب أن يُمنح التقدير بالاكتشاف للشخص الأوّل الذي رأى التوهج في الأنبوب؟ أم إلى الشخص الأوّل الذي أطلق تسمية أشعة المهبط؟ بل ربما لا لهذا ولا لذلك؛ لأنّهما لم يصلا إلى فهم حقيقة الإلكترون كما نعرفها اليوم. وفي الحقيقة، إنّ تقدير الاكتشاف أعطي بشكل عام إلى تومسون، ليس لأنه كان الأوّل في رؤية التوهج في الأنبوب.

بل لاعتقاده الراسخ بأن هذه الظاهرة ناجمة من جسيمات ضئيلة مشحونة بشحنة سالبة، وإجرائه قياسات متأنية عليها. وعلاوة على ذلك، جداله بأن هذه الجسيمات ما هي إلا جزء من مكونات هذه الذرات، وليست كما يظن الكثيرون بأنها أيونات أو ذرات، وكذلك لقيامه بتطوير النظرية الإلكترونية للمادة. وكانت وجهة نظره قريبة لما يقبل به في هذه الآونة، ولهذا، نُسيب فضل "الاكتشاف" إلى ثومسون. ومع ذلك، جدر الإشارة إلى أن لا ثومسون ولا أي أحد آخر قد رأى يومًا الإلكترون ذاته. ونذكر هذا باختصار، لأنه تمثيل عملي على حقيقة أن الاكتشافات العلمية لا تكون دائمًا واضحة. وفي الحقيقة، فإن بعض فلاسفة العلم يعتقدون أن كلمة "اكتشاف" هي غالبًا كلمة غير مناسبة، كما في هذه الحالة.

اعتقد ثومسون أن الإلكترون ليس الذرة نفسها، ولكنه أحد مكوناتها، أو جزء منها، وجاء الدليل المقنع بعد ذلك بقليل بعد تحديد شحنة أشعة المهبط وكتلتها. وقام طالب ثومسون "تاونسند" بإجراء أول قياسات مباشرة (غير دقيقة) على الإلكترون عام 1897. ومع هذا، فقد كانت تجربة قطرة الزيت لروبرت ميليكان (1868 – 1953) هي التي أفضت بقيمة دقيقة لشحنة الإلكترون، وأظهرت أن الشحنة تأتي بكميات (مكمية). وسُمح. في هذه التجربة، لقطرات من زيت غير عضوي تحمل شحنة كهربائية بالسقوط تحت تأثير الجاذبية الأرضية بين لوحين متوازيين (الشكل 27 - 3). وتم تعديل المجال الكهربائي  $E$  بين اللوحين إلى أن تعلق قطرة الزيت في منتصف الهواء، وكان اتجاه تأثير الجاذبية على القطرة المعلقة في الهواء إلى الأسفل. فسحبت الجاذبية القطرة ذات الكتلة  $m_{dr}$  إلى الأسفل بمقدار  $m_{dr}g$ . وتمت موازنة هذا السحب بقوة ناجمة من المجال الكهربائي إلى الأعلى. وكانت النتيجة أن  $qE = m_{dr}g$  لتكون الشحنة  $q$  على القطرة  $q = m_{dr}g/E$ . وتم تحديد كتلة القطرة عن طريق قياس سرعتها الحديثة في غياب المجال الكهربائي. وفي الغالب، كانت القطرة تشحن بشحنة سالبة، ومع هذا، فقد كانت تشحن في بعض الأوقات بشحنة موجبة، ما يفسر بأن القطرة كانت تكتسب إلكترونات أو تفقدها (بالاحتكاك، وهي تغادر المرذاذ). وقدم خليل ميليكان وملاحظاته المضنية دليلًا قاطعًا على أن أي شحنة هي مضاعفات مكمية لأصغر شحنة  $e$  والتي نسبت إلى الإلكترون، وأن قيمة  $e$  هي  $1.6 \times 10^{-19} C$ . (وتعطي قيمة  $e$ ، في أيامنا هذه، كما ذكرت في الفصل السادس عشر:  $e = 1.602 \times 10^{-19} C$ . وقيمة  $e$  هذه بالإضافة إلى القيمة المقاسة  $e/m$  تعطي كتلة الإلكترون لتكون  $9.1 \times 10^{-31} kg = (1.76 \times 10^{11} C/kg) / (1.6 \times 10^{-19} C)$  وهذه الكتلة هي أقل من  $1/1000$  من كتلة أصغر ذرة. لتؤكد فكرة أن الإلكترون ما هو إلا جزء من الذرة. والقيمة المقبولة، في أيامنا هذه، لكتلة الإلكترون هي  $m_e = 9.11 \times 10^{-31} kg$  أما النتائج العملية، فإن أي شحنة تبدو وكأنها مضاعفات مكمية لـ  $e$  تعني أن الشحنة الكهربائية مكمية (حدث في كميات مريحة فقط). كما ناقشنا في الفصل السادس عشر.

تجربة قطرة الزيت لميليكان

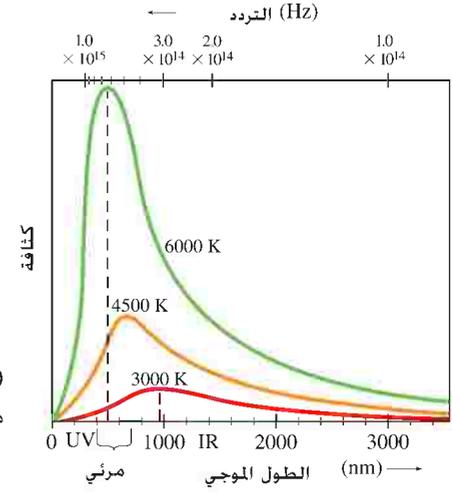


الشكل 27 - 3 تجربة قطرة الزيت لميليكان

## 2-27 فرضية بلانك الكمية، وإشعاعات الجسم الأسود

### إشعاعات الجسم الأسود

إحدى الملاحظات التي لم تفسر مع نهاية القرن التاسع عشر كانت الطيف الضوئي المنبعث من الأجسام الساخنة. لقد رأينا في (البند 14 - 8) أن الأجسام جميعها تبعث إشعاعات تناسب شدتها الكلية مع الأس الرابع لدرجة الحرارة المطلقة بالكلفن ( $T^4$ ). وعند درجات الحرارة الطبيعية ( $\approx 300 K$ )، فإننا لا نشعر بالإشعاعات الكهرومغناطيسية هذه بسبب ضعف شدتها. أما عند درجات الحرارة المرتفعة، فهناك إشعاعات تحت حمراء كافية لكي نشعر بدرجة الحرارة القريبة منا. وعند درجات الحرارة الأعلى من ذلك (بالقرب من  $1000 K$ )، تتوهج الأجسام فعليًا، كحارقة الموقد الكهربائي الأحمر - الساخن أو كسلك التسخين في المحمصة. وعند درجات حرارة أعلى من  $2000 K$ ، فإن الأجسام تتوهج بلون أصفر أو مبيض، مثل الحديد - الأبيض الساخن وفتيلة المصباح الضوئي. ومجال الضوء المنبعث مدى متصل من أطوال الأمواج أو الترددات، والطيف عبارة عن رسم بياني للشدة مقابل الطول الموجي أو التردد. وكلما ازدادت درجة الحرارة، فإن الإشعاعات الكهرومغناطيسية المنبعثة من الأجسام لا تزداد شدتها الكلية فقط، بل تصبح أشد عند الترددات الأعلى والأكثر علوًا.



(الشكل 27 - 4) أطيف مقيسة لأطوال أمواج وترددات منبعثة من جسم أسود عند ثلاث درجات حرارة.

### إشعاع الجسم الأسود

يظهر (الشكل 27 - 4) طيفًا ضوئيًا منبعثًا من جسم أسود مثالي ساخن. إنَّ الجسم الأسود هو الجسم الذي سيمتص الإشعاعات الساقطة عليه جميعها (ولذلك يظهر أسود تحت الانعكاس عند إضاءته من الخارج). والإشعاعات التي قد يصدرها الجسم الأسود عندما يكون ساخنًا ومضيئًا، والمسماة إشعاعات الجسم الأسود (بالرغم من عدم ضرورة أن تكون سوداء) هي الأسهل في التعامل، وهي الأقرب لتلك الناتجة من أجسام كثيرة حقيقية. وبلغ منحنى الـ 6000-K المبين في (الشكل 27 - 4)، المناظر لدرجة حرارة سطح الشمس - ذروته في الجزء المرئي من الطيف. وعند درجات الحرارة المنخفضة، تنخفض الإشعاعات الكلية بشكل ملموس، وتُحصل الذروة عند الأمواج الأطول (أو عند الترددات الأقل). لذا، فإنَّ نهاية الطيف المرئي الزرقاء (فوق البنفسجية) هي أضعف نسبيًا من درجات الحرارة الأخفض. (وهذا سبب توهج الأجسام بلون أحمر عند حوالي 1000 K). وقد وُجدَ عمليًا أنَّ الطول الموجي عند ذروة الطيف،  $\lambda_p$  مرتبط بدرجة الحرارة بالكلفن  $T$  بواسطة

$$(27 - 2) \quad \lambda_p T = 2.90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

ويُسمى هذا قانون واين.

### المثال 1-27 درجة حرارة سطح الشمس

قدِّر درجة حرارة سطح شمسنا، إذا علمت أنَّ الشمس تبعث ضوءًا تحدث ذروة شدته في الطيف المرئي عند حوالي 500 nm. **النَّهَج:** نفترض أنَّ الشمس تتصرَّف كجسم أسود، ونستخدم  $\lambda_p = 500 \text{ nm}$  في قانون واين (المعادلة 27 - 2). **الحل:** يعطي قانون واين

$$T = \frac{2.90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{\lambda_p} = \frac{2.90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{500 \times 10^{-9} \text{ m}} \approx 6000 \text{ K}$$

### المثال 2-27 لون نجم

افترض أنَّ درجة حرارة سطح نجم 32,500 K، ما اللون الذي سيظهر عليه هذا النجم؟ **النَّهَج:** نفترض أنَّ النجم سيبعث إشعاعات كجسم أسود، ونحل لإيجاد  $\lambda_p$  من قانون واين (المعادلة 27 - 2). **الحل:** لدينا من قانون واين

$$\lambda_p = \frac{2.90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{T} = \frac{2.90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{3.25 \times 10^4 \text{ K}} = 89.2 \text{ nm}$$

وعليه، فإنَّ الذروة تكون في مدى الأشعة فوق البنفسجية UV من الطيف، وهي إلى أقصى اليسار في (الشكل 27 - 4). وأمَّا في المنطقة المرئية، فإنَّ المنحنى سينحدر، بحيث تكون أقصر أطوال الأمواج هي الأقوى. ولذلك سيبدو النجم أزرق (أو أزرق - مبيضا). **ملاحظة:** يساعدنا هذا المثال على فهم السبب وراء ظهور النجوم بألوان مختلفة (حمراء لأبرد النجوم، وأمَّا لأكثرها "سخونة"، فهي برتقالية، أو صفراء، أو بيضاء، أو زرقاء).

التمرين أ: ما لون جسم ما عند 4000 K؟

## فرضية بلانك الكمية

في العام 1900، اقترح ماكس بلانك (1858 – 1947) نظرية كانت قادرةً على إعادة إنتاج منحنيات (الشكل 27 – 4). واعتمدت نظريته التي لا تزال مقبولة في أيامنا هذه على افتراض جديد وجذري، وهو أنّ طاقة اهتزازات الذرات داخل الجزيئات لا يمكنها أن تملك قيمة عشوائية، وبدلاً من ذلك فهي تملك مضاعفات قيمة دنيا ترتبط بتردد الاهتزاز بوساطة العلاقة

$$E = hf$$

وهنا  $h$  ثابت جديد، يُسمّى الآن ثابت بلانك، وقدّر بلانك قيمته عن طريق موازنة صيغة منحني إشعاع الجسم الأسود مع النتائج العملية، والقيمة المقبولة في أيامنا هذه هي

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

ويقترح افتراض بلانك أنّ طاقة أيّ اهتزاز جزيئي يمكن أن تكون فقط مضاعفات عدد صحيح من  $hf$ :

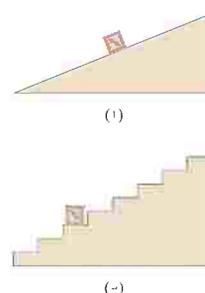
$$E = nhf, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3-27)$$

ويُسمّى  $n$  العدد الكمي (وتعني "الكم" "كمية منقطعة" ومعاكسة لـ "كمية متصلة"). وتُدعى هذه الفكرة في الغالب بـ فرضية بلانك الكمية. على الرغم من أنها لم تحظ باهتمام كافٍ في ذلك الوقت، وفي الحقيقة، فقد عدّها بلانك أداة رياضية للحصول على "الإجابة الصحيحة" أكثر من كونها اكتشافاً مكافئاً لاكتشافات نيوتن تلك. واستمر بلانك نفسه بالبحث عن تفسير تقليدي لإدخال  $h$ . وأمّا التقدير باعتبار أنّ هذا كان ابتكاراً مهماً وثورياً لم يأت إلا لاحقاً. وذلك بعد عام 1905 عندما ساهم آخرون في هذا المجال، وخاصة أينشتاين.

وتدعى الفرضية الكمية (المعادلة 27 – 3) أنّ طاقة هزاز ما، يمكن أن تكون  $E = hf$ ، أو  $2hf$  أو  $3hf$  وهكذا دواليك، ولكن لا يمكن أن يكون هناك أيّ اهتزازات ذات طاقات بين تلك القيم. أي أنّ الطاقة ليست كمية مستمرة كما كان الاعتقاد سائداً لقرون خلت، بل هي كمية: أي أنّها توجد بكميات متقطعة فقط. وتدعى أقلّ كمية طاقة ممكنة ( $hf$ ) كم الطاقة. وتذكر من الفصل الحادي عشر أنّ طاقة الاهتزاز تتناسب مع مربع الاتساع. ولذلك، وكطريقة أخرى للتعبير عن الفرضية الكمية، يقال إنه ليس كلّ اتساع اهتزازي ممكن. وترتبط القيم الممكنة للاتساع بالتردد  $f$ .

إنّ المقارنة البسيطة التالية قد تساعد على الإيضاح. يمكن أن تعزف على آلة وترية مثل الكمان أو القيثارة على مدى متصل من الذبذبات عن طريق نقل أصابعك على امتداد الوتر. وعلى الجانب الآخر، فإنّ كلا من الناي أو البيانو "مكمّى" بمنطق أنّ ذبذبات (نغمات) معينة فقط يمكن أن تعزف. أو قارن طريقاً منحدراً، من خلال وضع صندوق عليه عند أيّ ارتفاع، مع مجموعة متواصلة من الدرجات حيث يمكن للصندوق أن يملك كميات معينة مقطعة فقط من طاقة الوضع كما هو مبين في (الشكل 57 – 5).

فرضية بلانك الكمية



الشكل 27 – 5 مقارنة

الطريق المنحدر بالدرج، (أ) يمكن للصندوق على طريق منحدر أن يملك قيمة متصلة من طاقة الوضع. (ب) ولكن على الدرج، يستطيع الصندوق أن يملك فقط قيمة متقطعة (مكمية) من الطاقة.

## 3-27 نظرية الفوتون للضوء والأثر الكهروضوئي

قام أينشتاين في عام 1905، العام نفسه الذي قدّم فيه نظرية النسبية الخاصة، بتقديم تطوير جري لفكرة الكمية مقترحاً نظرية جديدة للضوء. وكان بلانك قد اقترح في عمله أنّ طاقة الجزيئات الاهتزازية لجسم مشع هي مكمية بقيمة  $E = nhf$ ، حيث  $n$  عدد صحيح، و  $f$  هي تردد الجزيء المهتز. وجادل أينشتاين بضرورة نقصان طاقة الجزيء الاهتزازية بمقدار  $hf$  (أو  $2hf$ ، الخ) إلى عدد صحيح آخر مضروب في  $hf$  مثل  $(n - 1)hf$  كنتيجة لانبعث الضوء من هذا الجزيء المهتز. فيما بعد، ومن أجل حفظ الطاقة، يجب أن ينبعث الضوء في رزم، أو كميات، طاقة كلّ منها

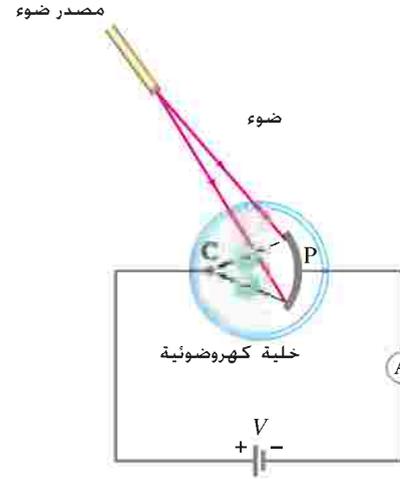
$$(4 - 27)$$

$$E = hf$$

حيث يمثل  $f$  تردد الضوء المنبعث.

طاقة الفوتون

ومرةً أخرى  $h$  هو ثابت بلانك. وبما أنّ الضوء كلّهُ في نهاية الأمر يأتي من مصدر مشع، فإنّ هذا يقترح أنّ الضوء ربما ينتقل كجسيمات صغيرة، أو فوتونات، كما تدعى الآن. بالإضافة إلى الأمواج التي تنبأت بها نظرية ماكسويل الكهرومغناطيسية. وكانت نظرية الفوتون الضوئية هي أيضا ابتعادا جريئا عن الأفكار التقليدية. واقترح أينشتاين اختصارًا لنظرية الضوء الكمية: قياسات كمية على الأثر الكهروضوئي. عندما يلمع الضوء على سطح فلزي، وُجِدَ أنّ الإلكترونات تنبعث من سطحه. وقد دُعِيَ هذا بالأثر الكهروضوئي، ويحدث هذا في مواد عديدة، إلا أنه يسهل ملاحظته في الفلزات. ويمكن ملاحظته باستخدام الأداة المبينة في (الشكل 27 - 6). وُضِعَ لوح فلزيّ  $P$ . وقطب كهربائي  $C$  أصغر داخل أنبوب زجاجي مفرغ، يُسمّى خليةً ضوئيةً. كما وُصِلَ القطبان الكهربائيان إلى أميتر ومصدر  $emf$  كما هو مبين. وعندما تكون الخلية الضوئية في الظلام، يقرأ الأميتر صفرًا. ولكن عندما يضيء مصدر ضوئي ذو ترددٍ عالٍ (بدرجة كافية) اللوح، يظهر الأميتر انسياب تيار في الدارة. ونفسر اكتمال الدارة بتخيل أنّ الإلكترونات المخرجة بواسطة الإشعاعات الساقطة، قد انسابت عبر الأنبوب من اللوح إلى "المجمع"  $C$  كما هو مشار إليه في (الشكل 27 - 7).



الشكل 27 - 6 الأثر الكهروضوئي

إنّ انبعاث الإلكترونات من الفلز بفعل الضوء يتوافق مع النظرية الكهرومغناطيسية (EM) الموجية للضوء: يمكن للمجال الكهربائي لموجة EM أن يُؤثر بقوة في الإلكترونات في الفلز فيُخرج بعضها منها. وعلى الرغم من ذلك، فقد أشار أينشتاين إلى أنّ النظرية الموجية ونظرية الفوتون الضوئية تعطيان تنبؤات مختلفة كثيرا عن تفاصيل الأثر الكهروضوئي. فعلى سبيل المثال، الطاقة الحركية العظمى ( $KE_{max}$ ) للإلكترونات المنبعثة من الأشياء التي يمكن قياسها باستخدام الأداة في (الشكل 27 - 6). ويمكن إنجاز ذلك باستخدام مصدر فرق جهد متغير وعكس الأقطاب بحيث يصبح الإلكتروود  $C$  سالبا و  $P$  موجبا. وستطرده الإلكترونات المنبعثة من  $P$  بوساطة الإلكتروود السالب. ولكن لو كان فرق الجهد هذا صغيرا بدرجة كافية، فلن تتوقف أسرع الإلكترونات عن الوصول إلى  $C$ . وسيكون هناك تيار في الدارة. وعند زيادة فرق الجهد العكسي، يتمّ الوصول إلى نقطة يصل التيار عندها إلى الصفر؛ لا توجد إلكترونات تملك طاقة حركية كافية للوصول إلى  $C$ . وتدعى هذه طاقة الإيقاف أو جهد الإيقاف  $V_0$ . وعن طريق قياسها، يمكن تحديد  $KE_{max}$  باستخدام مبدأ حفظ الطاقة (المفقود من KE = المكتسب في PE) :

$$KE_{max} = eV_0$$

والآن، لنختبر تفاصيل الأثر الكهروضوئي من وجهة نظر النظرية الموجية مقابل نظرية أينشتاين الجسيمية.

بداية. النظرية الموجية. مفترضًا ضوءًا أحاديّ طول الموجة. إنّ أهمّ صفتين لموجة الضوء هما شدتها وترددها (أو طول موجتها). وعندما تتغير هاتان الكميتان. تتنبأ النظرية الموجية بما يلي :

1. عند ازدياد شدة الضوء. يكون من الضروري ازدياد عدد الإلكترونات المقذوفة. وازدياد طاقتها الحركية العظمى؛ لأنّ الشدة العالية تعني اتساعًا أكبر للمجال الكهربائي. وأنّ الإلكترونات المقذوفة بواسطة المجال الكهربائي الشديد ستكون ذات سرعات مرتفعة.

2. يجب ألا يؤثر تردد الضوء في الطاقة الحركية للإلكترونات المقذوفة. ويجب أن تؤثر الشدة فقط في  $KE_{max}$ .

تنبؤات

النظرية

الموجية

أمّا النظرية الفوتونية فتقدم تنبؤات مختلفة تمامًا. ونلاحظ أولاً أنّه في الشعاع أحادي طول الموجة. فإنّ الفوتونات جميعها تمتلك الطاقة نفسها ( $hf$ ). وأنّ ازدياد شدة شعاع الضوء يعني زيادة في عدد فوتونات الشعاع. ولكن لن يؤثر هذا في طاقة كلّ فوتون مادام التردد لم يتغير. وحسب نظرية أينشتاين. فإنّ إلكترونًا ما قد قذف من الفلز نتيجة التصادم مع فوتون واحد. وفي هذه العملية. تنتقل طاقة الفوتون جميعها إلى الإلكترون ويختفي الفوتون. وبما أنّ الإلكترونات محجوزة داخل الفلز بواسطة قوى الجذب. فهناك حاجة إلى طاقة دنيا ما  $W_0$  لمساعدة الإلكترون على الخروج من السطح. وتدعى  $W_0$  دالة الشغل (شغل الدالة). وتتراوح قيمتها بعدد قليل من الإلكترون فولت ( $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ) لمعظم الفلزات. وإذا كان التردد  $f$  للضوء الساقط صغيرًا جدًا لدرجة أنّ  $hf < W_0$  أقلّ من  $W_0$  فعندها لن تمتلك الفوتونات طاقة كافية لقذف أيّ إلكترون نهائيًا. وإذا كانت  $hf > W_0$  فإنّ عددا من الإلكترونات سيُقذف. وستحفظ الطاقة في العملية. أي أنّ الطاقة المدخلة (للفوتون).  $hf$  ستساوي طاقة الإلكترون الحركية KE بالإضافة إلى الطاقة اللازمة لنقله خارج الفلز:  $W$ .

يصطدم فوتون واحد مع إلكترون وحين فيخرجه.

$$hf = KE + W \quad (27 - 15)$$

وستبعث أقلّ الإلكترونات ارتباطًا بمتلكة معظم الطاقة الحركية ( $KE_{max}$ ). وفي هذه الحالة ستصبح  $W$  في هذه المعادلة دالة الشغل  $W_0$ . وتصبح KE عظمى  $KE_{max}$ .

$$hf = KE_{max} + W_0 \quad (\text{ب} 27 - 5) \quad [\text{أقلّ الإلكترونات ارتباطًا}]$$

وتتطلب إلكترونات عديدة طاقة أكثر من تلك الدنيا ( $W_0$ ) للإفلات من الفلز. وعليه. فإنّ الطاقة الحركية لهذه الإلكترونات ستكون أقلّ من القيمة العظمى. لذا. فإنّ النظرية الفوتونية تتنبأ بما يلي:

1. ازدياد شدة شعاع الضوء تعني سقوط فوتونات أكثر. وعليه. ستقذف إلكترونات أكثر. ولكن بما أنّ طاقة كلّ فوتون على حدة لن تتغير. فإنّ الطاقة الحركية العليا للإلكترونات لن تتغير بازدياد الشدة.
2. وإذا ازداد تردد الضوء. فإنّ الطاقة الحركية العليا للإلكترونات ستزداد طرديًا. حسب (المعادلة 27 - 5 ب).

$$KE_{max} = hf - W_0 \quad \text{أي أنّ}$$

تنبؤات

نظرية

الفوتون

وتم رسم هذه العلاقة بيانيًا في (الشكل 27 - 7).

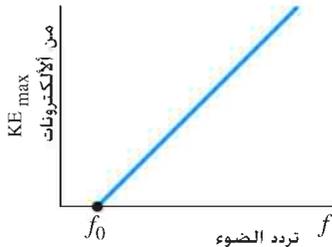
3. وإذا كان التردد  $f$  أقلّ من تردد القطع  $f_0$ ، حيث  $hf_0 = W_0$ ، فلن يُقذف أيّ إلكترون مهما كانت شدة الضوء كبيرة.

ومن الواضح جدًا أنّ تنبؤات نظرية الفوتون هذه مختلفة تمامًا عن تنبؤات النظرية الموجية. وفي 1913 - 1914. تم إجراء تجارب مصمّمة بدقة بواسطة ميليكان. وكانت النتائج على توافق تام مع نظرية الفوتون لأينشتاين.

لقد أكّدت إحدى سمات الأثر الكهروضوئي أيضًا نظرية الفوتون. إذا تمّ استخدام ضوء ذي شدة منخفضة للغاية. فإنّ النظرية الموجية تتنبأ بتأخير زمني قبل انبعاث أيّ إلكترون ليتمكن الإلكترون من استيعاب ما يكفي من الطاقة ليتجاوز دالة الشغل. ولا تتنبأ نظرية الفوتون بهذا التأخير - وهي تأخذ فوتونًا واحدًا (إذا كان تردده عاليًا بما فيه الكفاية) لتقذف إلكترونًا - ولم تظهر التجارب أيّ تأخير كذلك. وهذا أيضًا أكّد نظريّة الفوتون لأينشتاين.

الشكل 27-7 الأثر الكهروضوئي:

تزداد طاقة الإلكترونات الحركية العظمى المقذوفة طرديًا مع تردد الضوء الساقط. ولن تنبعث الإلكترونات إذا كان  $f < f_0$ .



### المثال 3-27 طاقة الفوتون

احسب طاقة فوتون ضوء أزرق،  $\lambda = 450 \text{ nm}$  في الهواء (أو في الفراغ).  
**النَّهَج:** يمتلك الفوتون طاقة  $E = hf$  (المعادلة 27 - 4) حيث  $f = c/\lambda$  (المعادلة 22 - 4).

**الحل:** بما أن  $f = c/\lambda$  فلدينا

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})}{(4.5 \times 10^{-7} \text{ m})} = 4.4 \times 10^{-19} \text{ J}$$

أو  $2.8 \text{ eV} = (4.4 \times 10^{-19} \text{ J}) / (1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV})$ . (انظر تعريف الإلكترون فولت في البند 17 - 4،  $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ ).

**التمرين ب:** يحتوي شعاع على ضوء تحت أحمر ذي طول موجي مفرد،  $1000 \text{ nm}$ . وعلى ضوء أحادي طول الموجة فوق بنفسجي عند  $1000 \text{ nm}$ . ولهما الشدة نفسها. فأيهما أكثر فوتونات: ذات  $100\text{-nm}$  أم فوتونات ذات  $100\text{-nm}$ ؟

### المثال 4-27 سرعة إلكترون ضوئي وطاقته

ما الطاقة الحركية وسرعة الإلكترون المنبعث من سطح الصوديوم (دالة شغله  $W_0 = 2.28 \text{ eV}$ ) عندما يضاء بموجة طولها: (أ)  $410 \text{ nm}$ ؛ (ب)  $550 \text{ nm}$ ؟

**النَّهَج:** نجد أولاً طاقة الفوتونات ( $E = hf = hc/\lambda$ ). إذا كانت الطاقة أكثر من  $W_0$ . فعندها ستقذف الإلكترونات بطاقات حركية KE ذات كميات متنوعة. وقيمة عظمى  $KE_{\text{max}} = hf - W_0$ .

**الحل:** (أ) لأجل  $\lambda = 410 \text{ nm}$

$$hf = \frac{hc}{\lambda} = 4.85 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{أو } 3.03 \text{ eV}$$

وتُعطي أعلى طاقة حركية يمكن للإلكترون أن يمتلكها وفق (المعادلة 27 - 5 ب).  
 $KE_{\text{max}} = 3.03 \text{ eV} - 2.28 \text{ eV} = 0.75 \text{ eV}$  أو  $1.2 \times 10^{-19} \text{ J}$  أو  $(0.75 \text{ eV})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV})$   
 وبما أن  $KE = \frac{1}{2}mv^2$  حيث  $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2KE}{m}} = 5.1 \times 10^5 \text{ m/s}$$

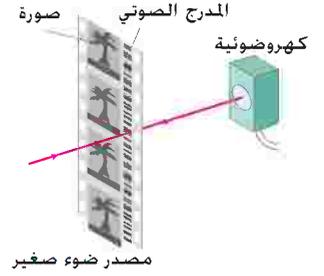
وستمتلك معظم الإلكترونات المقذوفة KE أقل وسرعة أقل من القيم العظمى هذه.  
 (ب) عند  $\lambda = 550 \text{ nm}$ ،  $hf = hc/\lambda = 3.61 \times 10^{-19} \text{ J} = 2.26 \text{ eV}$  وبما أن طاقة الفوتون هذه هي أقل من دالة الشغل، فلن يقذف أي إلكترون.  
**ملحوظة:** لقد استخدمنا في (أ) معادلات غير نسبية للطاقة الحركية. ولو كانت نتيجة  $v$  أكبر من  $0.1c$  تقريباً، لكانت حساباتنا غير دقيقة بحوالي  $1\%$  أو أكثر. وربما كان الأفضل حينها أن نعيد حساباتنا باستخدام الصيغة النسبية (المعادلة 26 - 6).

**التمرين ج:** حدّد أقل تردد، وأطول طول موجي لازم لانبعث إلكترونات من الصوديوم.

من السهل إثبات أن طاقة الفوتون هي بالإلكترون فولت. وذلك عن طريق تحويل الوحدات (انظر المسألة 28) فقط. عندما يعطى الطول الموجي  $\lambda$  بالنانومتر:

$$E \text{ (eV)} = \frac{1.240 \times 10^3 \text{ eV}\cdot\text{nm}}{\lambda \text{ (nm)}} \quad [\text{طاقة الفوتون بـ eV}]$$

## تطبيقات الأثر الكهروضوئي



إضافة للدور التاريخي المهم الذي يقوم به الأثر الكهروضوئي في تأكيد النظرية الفوتونية للضوء، فإن له تطبيقات عملية كثيرة: تستخدم أجهزة الإنذار ضد السرقات، وفاحات الأبواب الآلية غالبًا دارة خلية ضوئية كذلك المعروضة في (الشكل 27 - 6). فعندما يعترض شخص ما شعاعًا ضوئيًا، يُفَعَّل الانخفاض المفاجيء في التيار الكهربائي مفتاحًا - في غالب الأمر ملف لولبي - ويشغل هذا بدوره جرسًا أو يفتح بابًا. ويستخدم أحيانًا ضوء UV أو IR في أجهزة الإنذار ضد السرقات بسبب شفافيتها. وهناك الكثير من كواشف الدخان تستخدم الأثر الكهروضوئي للكشف عن الكميات الصغيرة جدًا من الدخان التي قد تعترض انسياب الضوء. وبالتالي تغير من قيمة التيار الكهربائي. كما تستخدم أجهزة قياس التصوير الضوئي هذه الدارة أيضًا. وتوظف الخلايا الضوئية في أجهزة أخرى كثيرة، كأجهزة قياس طيف الامتصاص الضوئي لقياس شدة الضوء. وأحد أنواع أغشية المسارات الصوتية هي الجزء الضيق المظلل والمتغير على جانب الغشاء. ولذلك، فإن الضوء المار خلال الغشاء يتم "تعديله". لتبع الإشارة الكهربائية المخرجة من الخلية الضوئية الكاشفة الترددات على المسار الصوتي. انظر (الشكل 27 - 8). ولتطبيقات كثيرة في أيامنا هذه، فقد حلّ جهازٌ شبه موصل يُدعى الصمام الثنائي الضوئي محلّ الخلية الضوئية المفرغة في (الشكل 27 - 6) (البند 29 - 8). وفي أشباه الموصلات هذه، فإن امتصاص أيّ فوتون يحزّر إلكترونًا من رابطته فتتغير موصلية المادة، ويتغير تبعًا لذلك التيار خلال الصمام الثنائي الضوئي.

**الشكل 27 - 8** مسار صوت بصري على غشاء فيلم سينمائي. في جهاز الإسقاط، ضوء من مصدر صغير (يختلف عن مصدر ضوء الصورة) يمر خلال مسار الصوت على الغشاء المتحرك. وتغير المناطق المنيرة والمعتمة على امتداد مسار الصوت شدة الضوء النافذ الذي يصل الخلية الضوئية، والذي ينتج منه عندئذ نسخة من الصوت الأصلي. ومن ثمّ يضخم هذا الناتج ويرسل إلى السماعات. وتستطيع أجهزة الإسقاط عالية الجودة أن تعرض أفلامًا تحتوي على عدة مسارات صوتية متوازية لتذهب إلى سماعات مختلفة حول المسرح.

### 4-27 طاقة الفوتون، وكتلته، وزخمه

لقد رأينا من (المعادلة 27 - 4) أنّ الطاقة الكلية لفوتون منفرد تعطى بـ  $E = hf$ . ولأنّ الفوتون ينتقل دائمًا بسرعة الضوء، فهو بالفعل جسيمٌ نسبيّ. ولذلك يجب أن نستخدم صيغة نسبية عند التعامل مع كتلته، وطاقته، وزخمه. ويُعطى زخم أيّ جسيم كتلته السكونية  $m_0$  بـ  $p = m_0 v / \sqrt{1 - v^2/c^2}$  وبما أنّ  $v = c$  للفوتون ما، فإنّ المقام في المعادلة السابقة يساوي صفرًا. ولتجنب الحصول على زخم لانهائي؛ فإننا نستنتج أنّ كتلة الفوتون السكونية يجب أن تكون صفرًا:  $m_0 = 0$ . وهذا منطقي أيضًا؛ لأنّ الفوتون لا يمكن أن يكون ساكنًا (ويتحرك بسرعة الضوء). وطاقة الفوتون الحركية تعدّ ذاتها طاقته الكلية

$$KE = E = hf \quad \text{[فوتون]}$$

ويمكن الحصول على زخم الفوتون من الصيغة النسبية (المعادلة 26 - 10)  $E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$  حيث وضعنا  $m_0 = 0$ . لذا، فإنّ  $E^2 = p^2 c^2$  أو

$$p = \frac{E}{c} \quad \text{[فوتون]}$$

وبما أنّ  $E = hf$  للفوتون، فإنّ زخمه يرتبط بطوله الموجي بالعلاقة

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad \text{(6-27)}$$

**المثال 5-27** قدر فوتونات من مصباح ضوئي

قدّر عدد فوتونات الضوء المرئي التي تنبعث من مصباح ضوئي قدرته 100-W. افرض أنّ كفاءة المصباح العادية هي 3% تقريبًا (أي أنّ 97% من الطاقة تتحول إلى طاقة حرارية).

النّهج: دعنا نفترض متوسط طول موجي في منتصف الطيف المرئي،  $\lambda \approx 500 \text{ nm}$ . وطاقة كلّ فوتون  $E = hf = hc/\lambda$ . ينبعث فقط 3% من القدرة 100-W كضوء، أو  $3 \text{ W} = 3 \text{ J/s}$ . عدد الفوتونات المنبعثة خلال ثانية يساوي الضوء الناتج من 3 J كلّ ثانية مقسومًا على طاقة كلّ فوتون.

الحلّ: الطاقة المنبعثة في ثانية واحدة ( $E = 3 \text{ J}$ ) هي:  $E = Nhf$ . حيث  $N$  عدد الفوتونات المنبعثة لكلّ ثانية، و  $f = c/\lambda$ . ولذلك

$$N = \frac{E}{hf} = \frac{E\lambda}{hc} = \frac{(3 \text{ J})(500 \times 10^{-9} \text{ m})}{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})} \approx 8 \times 10^{18}$$

لكل ثانية أو تقريبًا  $10^{19}$  فوتون ينبعث كلّ ثانية، وهو رقم هائل.

⚠ تنويه!

زخم الفوتون ليس  $mv$

## المثال 6-27 زخم الفوتون والقوة

افرض أنّ  $10^{19}$  فوتون في الثانية قد انبعثت جميعها من مصباح ضوئي قدرته 100-W في (المثال 27 - 5) وتم تركيزها على ورقة سوداء بحيث امتصت. (أ) احسب الزخم لفوتون واحد. (ب) قدّر القوة التي قد تؤثر بها هذه الفوتونات جميعها في الورقة.

**النّهج:** تم الحصول على زخم كلّ فوتون من (المعادلة 27 - 6). لاحقاً، كلّ زخم فوتوني متصّ يتحول من  $p = h/\lambda$  إلى الصفر. ونستخدم قانون نيوتن الثاني،  $F = \Delta p/\Delta t$ ، للحصول على القوة.

**الحل:** (أ) كلّ فوتون له زخم

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{500 \times 10^{-9} \text{ m}} = 1.3 \times 10^{-27} \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

(ب) باستخدام قانون نيوتن الثاني لـ  $N = 10^{19}$  فوتون (المثال 27 - 5) والتي يتغير زخمها

من  $h/\lambda$  إلى 0، نحصل على

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{Nh/\lambda - 0}{1 \text{ s}} = N \frac{h}{\lambda} \approx (10^{19} \text{ s}^{-1})(10^{-27} \text{ kg}\cdot\text{m/s}) \approx 10^{-8} \text{ N}$$

وهذه قوة ضئيلة. ولكننا نستطيع أن نرى إمكانية تأثير مصدر ضوئي قوي جداً بقوة يمكن قياسها. ويمكن للقوة الناجمة من الفوتونات في الإشعاع الكهرومغناطيسي بالقرب من الشمس أو نجم ما، أن تكون هائلة.

## المثال 7-27 التركيب الضوئي

في التركيب الضوئي، تستحوذ الصبغات كالكلوروفيل في النباتات على طاقة ضوء الشمس لتحوّل  $\text{CO}_2$  إلى كربوهيدرات مفيدة. حوالي تسعة فوتونات لازمة لتحويل جزيء  $\text{CO}_2$  واحد إلى كربوهيدرات و  $\text{O}_2$ . مفترضاً ضوءاً ذا طول موجي  $\lambda = 670 \text{ nm}$  (يمتص الكلوروفيل بشدة خلال المدى 650 nm إلى 700 nm). ما كفاءة عملية التركيب الضوئي؟ التفاعل الكيميائي العكسي يطلق طاقة قدرها 4.9 eV/جزيء من  $\text{CO}_2$ .

**النّهج:** الكفاءة هي أقل طاقة لازمة (4.9 eV) مقسومة على الطاقة الممتصة الفعلية. تسعة أضعاف طاقة الفوتون الواحد ( $hf$ ).

**الحل:** الطاقة لتسعة فوتونات، طاقة كلّ منها  $hf = hc/\lambda$  هي

$$(9)(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})/(6.7 \times 10^{-7} \text{ m}) = 2.7 \times 10^{-18} \text{ J}$$

أو 17 eV.

لذا، فإنّ كفاءة العملية هي 29% ( $4.9 \text{ eV}/17 \text{ eV}$ ).

## \* 5-27 أثر كومبتون

بالإضافة إلى الأثر الكهروضوئي، هناك عدة تجارب أجريت في بداية القرن العشرين دعمت

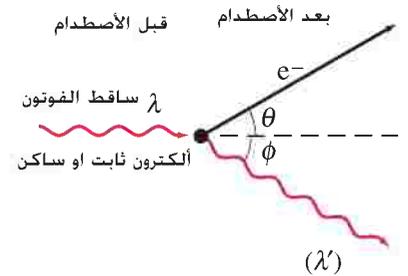
نظرية الفوتون أيضاً؛ واحدة منها هي أثر كومبتون (1923) التي سميت نسبة إلى مكتشفها، كومبتون (1892 - 1962). شنت كومبتون ضوءاً ذا طول موجي قصير (أشعة إكس حقيقية) من مواد مختلفة. وقد وجد أنّ الطول الموجي للضوء المشتت أطول منه للضوء الساقط، ولذلك فله تردد أدنى قليلاً، مما يدلّ على فقدان في الطاقة. وفسّر هذه النتيجة بناءً على النظرية الفوتونية كفوتونات ساقطة تصطدم مع إلكترونات المادة (الشكل 27 - 9). وباستخدام (المعادلة 27 - 6) لزخم الفوتون، طبق كومبتون قانوني حفظ الزخم والطاقة على التصادم في (الشكل 27 - 9). واشتق المعادلة التالية للطول الموجي للفوتونات المشتتة:

$$(7-27) \quad \lambda' = \lambda + \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \phi)$$

حيث  $m_0$  هي كتلة الإلكترون السكونية. (الكمية  $h/m_0 c$ ، والتي لها أبعاد طول، تدعى طول موجة كومبتون للإلكترون). ونرى أنّ الطول الموجي المتوقع للفوتونات المشتتة يعتمد على الزاوية  $\phi$  التي قياست عندها. لقد كانت أقيسة كومبتون عام 1923 متطابقة مع هذه الصيغة. ولم تتنبأ نظرية الضوء الموجية بهذا الانزياح؛ فالموجة الكهرومغناطيسية EM القادمة بتردد  $f$  يجب أن تجعل الإلكترونات تهتز بتردد  $f$ ، وهذه الإلكترونات المهتزة ستبعث أمواجاً كهرومغناطيسية مرة أخرى تمتلك هذا التردد  $f$  نفسه (البند 22 - 2). والتي لن تتغير بتغير الزاوية ( $\phi$ ). ونتيجة لذلك، فإنّ أثر كومبتون يضاف إلى الأساسات العملية المتينة لنظرية الفوتون الضوئية.

## تطبيق الفيزياء التركيب الضوئي

الشكل 27 - 9 أثر كومبتون. يصطدم فوتون مفرد (واحد) طول له الموجي  $\lambda$  بإلكترون مادة ما، فيخرجه من ذرته. ويمتلك الفوتون المشتت طاقة أقل (لأنّ جزءاً منها قد أعطي للإلكترون) ونتيجة ذلك فطول له الموجي أكبر،  $\lambda'$ . ووجدت التجارب أشعة إكس المشتتة بأطوال أمواج كما يتنبأ بها حفظ الطاقة والزخم باستخدام النموذج الفوتوني.



التمرين د: إذا شئت فوتوناً إلكترونياً بوساطة أثر كومبتون، فأَيّ من التالي سيزداد: طاقته، أم تردده، أم طوله؟

## المثال 8-27 تبعثر أشعة إكس

تبعثت أشعة إكس طولها الموجي  $0.140 \text{ nm}$  نانومتراً عن شريحة رقيقة جداً من الكربون. كم ستكون أطوال أمواج أشعة إكس المستطارة عند  $(أ) 0^\circ$ ،  $(ب) 90^\circ$ ،  $(ج) 180^\circ$ ؟  
النّهج: هذا مثال على أثر كومبتون. ونستخدم (المعادلة 27 - 7) لإيجاد أطوال الأمواج.  
الحل: (أ) عند  $\phi = 0^\circ$ ،  $\cos \phi = 1$  و  $\phi = 0^\circ$ ،  $1 - \cos \phi = 0$ ، وعليه، تعطي (المعادلة 27 - 7):  
 $\lambda' = \lambda = 0.140 \text{ nm}$  وهذا منطقي لأنه عند  $\phi = 0^\circ$ ، ليس هناك حقيقة أي تصادم ليمرّ الفوتون خلال الشريحة دون أي تصادم يذكر.

(ب) عند  $\phi = 90^\circ$ ،  $\cos \phi = 0$  و  $1 - \cos \phi = 1$  وكذلك

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_0c} = 0.140 \text{ nm} + \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}$$

$$= 0.140 \text{ nm} + 2.4 \times 10^{-12} \text{ m} = 0.142 \text{ nm};$$

أي أنّ الطول الموجي أكبر بمقدار طول موجة كومبتون واحدة ( $0.0024 \text{ nm} =$  نانومتراً لإلكترون).  
(ج) عند  $\phi = 180^\circ$ ، ما يعني استطارة الفوتون إلى الخلف، وعودته إلى الاتجاه الذي جاء منه (تصادم "رأسي" مباشر)،  $\cos \phi = -1$ ، و  $1 - \cos \phi = 2$ ، لذلك

$$\lambda' = \lambda + 2 \frac{h}{m_0c} = 0.140 \text{ nm} + 2(0.0024 \text{ nm}) = 0.145 \text{ nm}.$$

**ملحوظة:** يحدث أكبر انزياح للطول الموجي عند الاستطارة العكسية (المرتدة)، وهو يساوي ضعفي طول موجة كومبتون.

استخدم أثر كومبتون لتشخيص أمراض العظام مثل مرض لين العظام. أشعة جاما، هي فوتونات ذات أطوال موجية أقصر من تلك التي لأشعة إكس، والقادمة من مصدر مشع باستطارة عن مادة العظام. وتتناسب الشدة الكلية للأشعة المشتتة طردياً مع كثافة الإلكترونات التي بدورها تتناسب مع كثافة العظام. ونشير التغييرات في كثافة العظام إلى بدء حدوث لين فيها.

تطبيق الفيزياء  
قياس كثافة العظام

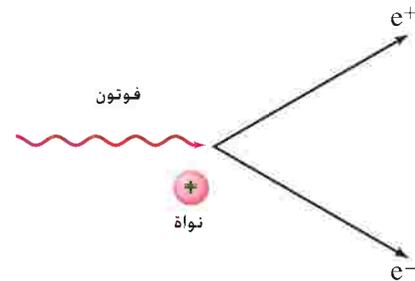
## 6-27 تفاعلات الفوتون، وإنتاج الثنائي

عندما يمرّ فوتون خلال مادة ما، يتفاعل مع ذراتها وإلكتروناتها. وهناك أربعة أنواع مهمة من هذه التفاعلات التي من الممكن أن يخضع لها الفوتون هي:

1. الأثر الكهروضوئي: يمكن للفوتون أن يطرد إلكترونًا خارج ذرة ما ليختفي خلال العملية نفسها.
  2. يمكن للفوتون أن ينقل إلكترونًا ذريًا إلى حالة طاقة أعلى داخل الذرة إذا كانت طاقته غير كافية لطرد الإلكترون كليًا إلى الخارج. ويختفي الفوتون أيضًا في هذه العملية. ليمنح طاقته كلها إلى الذرة. ويقال إنّ هذه الذرة في تلك الحالة في حالة مهيجة (مثارّة). وسنناقش هذه الحالة لاحقًا بتفصيل أكبر.
  3. يمكن للفوتون أن يستطار من إلكترون (أو من نواة) ليخسر في العملية بعض الطاقة. وهذا هو أثر كومبتون (البند 27 - 5). ولكن لاحظ أنّ الفوتون لم يتباطأ. ولا يزال ينتقل بسرعة  $c$ . ولكن تردده سيكون أقلّ، لأنه فقد بعض الطاقة.
  4. إنتاج الثنائي. يمكن للفوتون فعليًا أن يُكوّن مادة كإنتاج إلكترون وبوزيترون (الشكل 27 - 10). (لبوزيترون كتلة ماثلة لكتلة الإلكترون. ولكن مع شحنة معاكسة،  $+e$ ).
- وفي العملية 4، إنتاج الثنائي (تخليق). يختفي الفوتون في عملية إنتاج (تخليق) الثنائي إلكترون-بوزيترون. وهذا مثال على كتلة سكونية أنتجت من طاقة محضّة. وهي حدث طبقًا لمعادلة أينشتاين  $E = mc^2$ .

تفاعلات الفوتونات

الشكل 27 - 10 إنتاج الثنائي.  
يختفي فوتون لينتج إلكترونًا وبوزيترونًا.



لاحظ أن الفوتون لا يمكن أن ينتج إلكترونًا فقط؛ لأن الشحنة الكهربائية عند ذلك لن تكون محفوظة. ويحدث عكس إنتاج الثنائي أيضًا؛ فإذا اصطدم إلكترون مع بوزيترون، فإنهما سيفنيان بعضهما بعضًا وستظهر طاقتهما، وكذلك كتلاتهما، كطاقة كهرومغناطيسية للفوتونات. وبسبب هذه العملية، لا تعمّر البوزيترونات طويلًا في الطبيعة. بعد فناء الإلكترون - بوزيترون أو اضمحلاله الأساس لنوع من التصوير الطبي يعرف بـ *PET* كما تم مناقشته في (البند 31 - 8).

## المثال 9-27 إنتاج (تخليق) الثنائي

(أ) ما أقل طاقة فوتون يمكن أن تنتج الثنائي الإلكتروني-البوزيترون؟ (ب) ما الطول الموجي لهذا الفوتون؟

أقل طاقة لإنتاج ثنائي  $e^+e^-$  هي  
1.02 MeV

**النهج:** أقل طاقة فوتون  $E$  تساوي الطاقة السكونية ( $m_0c^2$ ) للجسيمين المنتجين بواسطة معادلة أينشتاين الشهيرة  $E = m_0c^2$  (المعادلة 26 - 8). ولن يتبقى أي طاقة بعد ذلك. ولذلك، فإن الجسيمين المنتجين سيمتلكان طاقة حركية تساوي صفرًا. الطول الموجي  $\lambda = c/f$  حيث  $E = hf$  للفوتون الأصلي. **الحل:** (أ) لأن  $E = m_0c^2$ ، والكتلة المنتجة تساوي كتلتين سكونيتين للإلكترونين. فإن الفوتون يجب أن يمتلك طاقة

$$E = 2(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 1.64 \times 10^{-13} \text{ J} = 1.02 \text{ MeV}$$

$$(1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-13} \text{ J}). \text{ وفوتون طاقته أقل من ذلك غير قادر على إنتاج ثنائي.}$$

(ب) بما أن  $E = hf = hc/\lambda$ ، فإن طول موجة 1.02-MeV فوتون هو

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})}{(1.64 \times 10^{-13} \text{ J})} = 1.2 \times 10^{-12} \text{ m}$$

وهي 0.0012 nm. وهذه الفوتونات موجودة في منطقة أشعة جاما (أو أشعة إكس قصيرة جدًا) من الطيف الكهرومغناطيسي (الشكل 22 - 8).

**ملحوظة:** تستطيع فوتونات ذات طاقة أعلى (أو أقصر طول موجي) أن تنتج ثنائيًا إلكترونيًا-بوزيترونيًا أيضًا. لتصبح الطاقة الزائدة طاقة حركية للجسيمات.

لا يمكن أن يحدث إنتاج ثنائيات في الفضاء الفارغ؛ لعدم إمكانية حفظ الزخم عندئذٍ. وعلى سبيل المثال، فإن الطاقة محفوظة في (المثال 27 - 9). ومع هذا فقد كانت الطاقة المزودة كافية لإنتاج ثنائي إلكترون-بوزيترون ساكن (لا يملك زخمًا). لذا، فلن يتحرك الثنائي مبتعدًا حاملًا معه أيًا من زخم الفوتون الابتدائي. وبالطبع، يمكن إثبات (عند أي طاقة) وجوب مشاركة جسم إضافي هائل الكتلة، كنواة ذرة ما في التفاعل، ليستطيع الثنائي الناتج الابتعاد معه بعض الزخم.

## 7-27 ازدواجية الموجة - الجسيم؛ ومبدأ التتام

إن الأثر الكهروضوئي، وأثر كومبتون، وتجارب أخرى قد وضعت النظرية الجسيمية للضوء على قاعدة تجريبية متينة. ولكن ماذا بشأن تجارب التداخل والحيود التقليدية لكل من "يوج" وآخرين (الفصل 24) والتي أظهرت أن النظرية الموجية للضوء تستند هي أيضًا إلى قاعدة عملية متينة؟ ونبدو هنا وكأننا في ورطة. تدل بعض التجارب على أن الضوء يتصرف كموجة، في حين تشير تجارب أخرى إلى تصرفه كجسيم من الجسيمات. وتبدو هاتان النظريتان وكأنهما غير متوافقتين. ومع هذا فقد أظهرت كل منهما صحتها. وفي النهاية، توصل الفيزيائيون إلى استنتاج مفاده قبول ازدواجية الضوء هذه كحقيقة حياة. ويشار إليها بـ **ازدواجية الموجة - الجسيم**. وحسب الظاهر، فإن الضوء ظاهرة أكثر تعقيدًا من كونه مجرد موجة بسيطة أو شعاع بسيط من الجسيمات.

ازدواجية الموجة -  
الجسيم



الشكل 27 - 11 "نيلز بور" (يمين)، يمشي مع "أرنوكوفيرمي" على امتداد طريق "أبيان" خارج روما. وتظهر هذه الصورة إحدى الطرق المهمة التي صنعتها الفيزياء.

### تنويه!

ليس من الصحة القول إن الضوء هو موجة و/أو جسيم؛ لأنه قد يتصرف كموجة أو كجسيم.

لتوضيح هذه الحالة: اقترح العالم الفيزيائي الدانمركي النابغة "نيلز بور" (1885 - 1962). (الشكل 27 - 11) مبدأ التتام الشهير الذي ينصّ على أنه لكي يتم استيعاب تجربة ما، فإننا في بعض الأحيان نجد التفسير باستخدام النظرية الموجية، وأحياناً أخرى نجده باستخدام النظرية الجسيمية. ومع هذا، فيجب أن نعي الوجهين الموجي والجسمي للضوء إذا كنا نسعى وراء فهم كامل للضوء. وعليه، فإنّ هذين الجانبين من الضوء يكمل بعضهما الآخر.

وليس من السهل "تخيل" هذه الازدواجية. ولا نستطيع بسهولة رؤية هذا الاقتران بين الموجة والجسيم. وبدلاً من ذلك، يجب أن ندرك أنّ ازدواجية الضوء هي "وجهان" يظهرهما الضوء للخبراء.

إنّ طريقة تفكيرنا تعدّ جزءاً من صعوبة فهمنا: تعتمد الصور (أو النماذج) المرئية في أذهاننا على ما نشاهده في العالم اليومي. ونطبق المبدأين الموجي والجسمي على الضوء؛ لأننا نرى في العالم الجاهري انتقال الطاقة من مكان إلى آخر بوساطة هاتين الطريقتين. وعلى الرغم من أننا نستطيع رؤية ما إذا كان الضوء موجة أم جسيماً مباشرة، إلا أننا نقوم بعمل جارِب غير مباشرة. ولتفسير التجارب: نطبق نماذج الأمواج أو الجسيمات على طبيعة الضوء. ولكن ما هذه إلا أفكار تجريدية للعقل البشري. وعندما نحاول فهم حقيقية طبيعة الضوء، فإننا نصرّ على صورة مرئية (بصرية). ومع هذا فلا يوجد أيّ سبب يجعل الضوء مقيداً بهذين النموذجين (أو الصورتين المرئيتين) المأخوذتين من العالم الجاهري. إنّ الطبيعة "الحقيقية" للضوء - إذا كان هذا يعني شيئاً - من غير الممكن تخيلها. وأفضل ما يمكن عمله إدراك محدودية علمنا عن التجارب غير المباشرة، وبدلالة اللغة والصور اليومية، يكشف الضوء عن كلتا الصفتين: الموجية والجسيمية.

ومن الجدير بالملاحظة أنّ معادلة أينشتاين  $E = hf$  ذاتها تربط كلا من الصفتين الجسيمية والموجية للشعاع الضوئي بعضهما ببعض. وفي هذه المعادلة، تشير  $E$  إلى طاقة الجسيم، وعلى الجانب الآخر من المعادلة، لدينا تردد الموجة المعنية  $f$ .

## 8-27 الطبيعة الموجية للمادة

في عام 1923، وسّع لويس دي برولي (1892 - 1987) فكرة ازدواجية الموجة - الجسيم. وقدّر كثيرًا التماثل في الطبيعة، وقال: إذا تصرف الضوء في بعض الأوقات كالموجة وفي أوقات أخرى كالجسيم، فعندها ربما تمتلك تلك الأشياء الموجودة في الطبيعة والمعتقد أنها جسيمات - مثل الإلكترونات والأجسام المادية الأخرى - خصائص موجية. اقترح دي برولي أنّ الطول الموجي لجسيم مادي قد يكون مرتبطاً بزخمه بطريقة الفوتون نفسها (المعادلة 27 - 6)، أي أنه لجسيم زخمه الخطي  $p = mv$ ، فإنّ طوله الموجي  $\lambda$  يعطي

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (8 - 27)$$

وهذا صحيح تقليدياً ( $p = m_0v$  لأجل  $v \ll c$ ) ونسبويًا ( $p = \gamma m_0v = m_0v/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ ). ويُدعى في بعض الأحيان طول موجة دي برولي للجسيم.

طول موجة دي برولي

### المثال 10-27 الطول الموجي لكرة

احسب طول موجة دي برولي لكرة كتلتها 0.20-kg تتحرك بسرعة 15 m/s. النهج: نستخدم (المعادلة 27 - 8) ببساطة.

الحل:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{(6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})}{(0.20 \text{ kg})(15 \text{ m/s})} = 2.2 \times 10^{-34} \text{ m}$$

الطول الموجي في (المثال 27 - 10) صغير لدرجة لا يمكن تصورها. وحتى لو كانت السرعة صغيرة إلى حدّ كبير، لنقل  $10^{-4} \text{ m/s}$ ، فإنّ الطول الموجي سيكون حوالي  $10^{-29} \text{ m}$ . وبالفعل، فإنّ الطول الموجي لأيّ جسم عادي صغير جدًّا لدرجة لا يمكن معها قياسه أو كشفه. والمشكلة أنّ خصائص الموجات كالتداخل والحيود، تكون ذات قيمة مهمة عندما تكون أحجام الجسيمات أو الشقوق ليست أكبر بكثير من الطول الموجي.

ولا توجد أيّ أجسام أو شقوق معروفة تعمل على انحراف موجات طولها  $10^{-30}$  m فقط. لذلك، فإنّ الخصائص الموجية للأجسام العادية تبقى غير محسوسة. أمّا بالنسبة إلى الجسيمات الضئيلة، مثل الإلكترونات، فهي قضية أخرى. وبما أنّ الكتلة  $m$  تظهر في المقام في (المعادلة 27 - 8)، فإنّ الكتلة الصغيرة جدًا يجب أن تمتلك طولًا موجيًا أكبر بكثير.

## المثال 11-27 طول موجة إلكترون

حدّد طول موجة إلكترون تمّ تسريعه خلال فرق جهد  $100$  V. **النّهج:** عندما تكون الطاقة الحركية أقلّ بكثير من الطاقة السكونية، يمكننا استخدام الطاقة الحركية التقليدية  $KE = \frac{1}{2}mv^2$  (انظر نهاية البند 26 - 9). لإلكترون ما،  $m_0c^2 = 0.511$  MeV. ثمّ نطبق مبدأ حفظ الطاقة: KE المكتسبة بوساطة الإلكترون تساوي ما يخسره من PE. وبعد الحلّ لإيجاد  $v$ ، نستخدم (المعادلة 27 - 8) لإيجاد طول موجة دي برولي.

**الحلّ:** الطاقة الحركية المكتسبة تعادل الخسارة في طاقة الوضع:  $KE = eV = (0 - \Delta PE)$ . ولذلك  $KE = 100$  eV. النسبة  $KE/m_0c^2 = 100 \text{ eV}/(0.511 \times 10^6 \text{ eV}) \approx 10^{-4}$ . لذا، فإنّ النسبيّة غير ضرورية: وعليه

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV$$

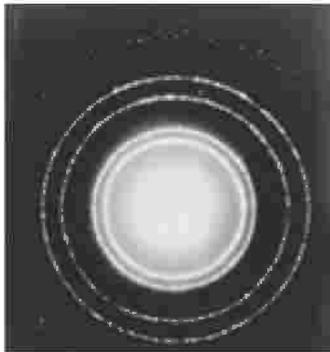
$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} = \sqrt{\frac{(2)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(100 \text{ V})}{(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})}} = 5.9 \times 10^6 \text{ m/s}$$

ولذلك

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})}{(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})(5.9 \times 10^6 \text{ m/s})} = 1.2 \times 10^{-10} \text{ m}$$

أو  $0.12 \text{ nm}$ .

**الشكل 27 - 12** نمط حيود إلكترونات مستطارة من رقيقة ألمنيوم، كما سجلت على غشاء.



ازدواجية الموجة - الجسيم ومبدأ التناظر تنطبق على كل من المادة والضوء.

**التمرين هـ:** عندما ينتقل جسم ما بسرعة أكبر، هل يتناقص طول موجة دي برولي؟ أم يزداد؟ أم يبقى كما هو؟

من (المثال 27 - 11)، نستطيع أن نرى إمكانية امتلاك الإلكترونات أطوال أمواج برتبة  $10^{-10}$  m. وحتى أصغر من ذلك، وبالرغم من صغرهما، إلا أنّه يمكن قياسها: المسافات بين الذرات في البلورة هي برتبة  $10^{-10}$  m. ويمكن استخدام صفوف الذرات المرتبة في البلورة كنوع من محزرات الحيود. كما تم عمله سابقاً لأشعة إكس (انظر البند 25 - 11). وقام كل من ديفيسون وجيرمر بإجراء تجربة حاسمة، حيث أجريا تجربة استطارة للإلكترونات عن سطح بلورة فلزية، وفي بداية 1927، لاحظا أنّ الإلكترونات قد تبعثت على نمط قمم منتظمة. وعندما فسّرا هذه القمم كنمط حيودي، وجدا أنّ طول موجة الإلكترون الحائدة هي كما تنبأ بها دي برولي تماماً (المعادلة 27 - 8). وفي العام نفسه، استخدم ثومسون (الأبن) ترتيباً عملياً مختلفاً، وقاس أيضاً حيود الإلكترونات. انظر (الشكل 27 - 12)، وقارنه بحيود أشعة إكس (البند 25 - 11). وقد أظهرت التجارب لاحقاً أنّ الإلكترونات، والنيوترونات، وجسيماتٍ أخرى لها خصائص موجية أيضاً. لذا، فإنّ ازدواجية الموجة-الجسيم تنطبق على كلّ من الأجسام المادية والضوء. كما أنّ مبدأ التناظر أيضاً ينطبق على المادة. أي أننا، يجب أن نعي كلا الجانبين الجسيمي والموجي لنصل إلى فهم المادة، بما فيها الإلكترونات. ولكن يجب أن ندرك مرة أخرى أنّ الصورة المرئية "للموجة-الجسيم" غير ممكنة.

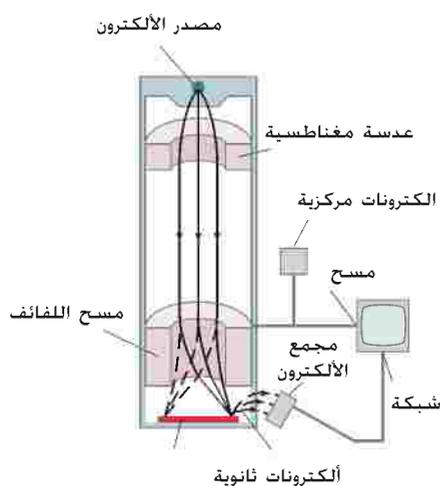
## ما هو الإلكترون؟

لقد بينت تجارب ثومسون الأولى (البند 27 - 1) توهجا في الأنبوب. ليتحرك هذا التوهج عند تطبيق مجال مغناطيسي. وكان أفضل تفسير لنتائج هذه التجارب وغيرها على أنها كانت ناجمة من جسيمات صغيرة جدًا مشحونة بشحنة سالبة ندعوها الآن بالإلكترونات. ومع هذا، فلم يرَ أي أحد هذه الإلكترونات مباشرة. والأشكال التي نرسمها أحيانا للإلكترونات ككرات صغيرة ذات شحنات سالبة هي لتسهيل التعامل معها (ثبت حاليا أنها غير صحيحة). ومرة أخرى يجب أن نعتمد على النتائج العملية التي يمكن تفسير بعضها على أحسن وجه باستخدام النموذج الجسيمي. في حين تفسر حالات أخرى باستخدام النموذج الموجي. وهذه النماذج هي مجرد صور نستخدمها لنتمكن من الانتقال من العالم الجاهري إلى العالم دون الجاهري الصغير للذرة. ولا يوجد أي سبب يجعلنا نتوقع أن هذه النماذج ستعكس حقيقة الإلكترون ولو بصورة ما. ولذلك، نستخدم نموذجًا موجيًا أو جسيميًا (أيهما يفيد أفضل في حينه) لكي نستطيع أن نتكلم عما يحدث. ولكن لا ينبغي أن ننقاد إلى الاعتقاد بأن الإلكترون هو موجة أو جسيم. وبدلاً من ذلك نستطيع القول بأن الإلكترون مجموعة من خصائصه التي نستطيع قياسها. وقالها بشكل جيد "بيرتراند روسيل" عندما كتب أن الإلكترون "بناءً منطقي".

## \* 9-27 المجاهر الإلكترونية

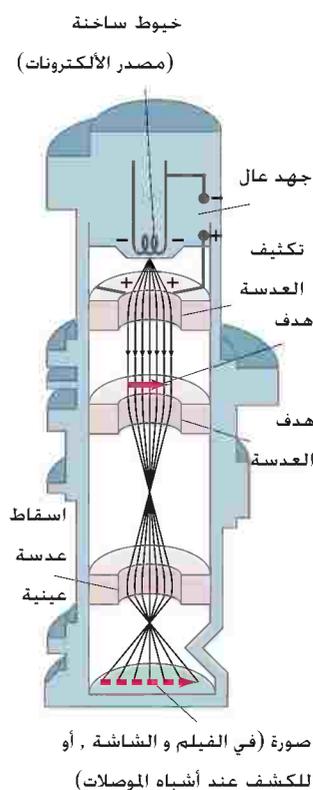
لقد أفضت فكرة أن الإلكترونات لها خصائص موجية إلى تطوير المجهر الإلكتروني الذي يستطيع إنتاج صور ذات تكبير أكبر بكثير من تلك الناجمة عن المجهر الضوئي. (الشكلان 27 - 13 و 27 - 14) هما رسمان من نوعين مختلفين، والمطوران عند منتصف القرن العشرين: النافذ الإلكتروني دون المجهر (TEM) الذي ينتج صوراً في بعدين، و الماسح الإلكتروني دون المجهر (SEM) الذي ينتج صوراً ذات نوعية ثلاثية- الأبعاد. وفي النوعين، فإن العدستين الشبئية والعينية هما فعلياً مجالان مغناطيسيان يؤثران بقوة في الإلكترونات لجلبها إلى بؤرة ما. وتنتج المجالات بواسطة ملفات سلكية تحمل تيارات صُممت بعناية. وتظهر الرسوم الصورية باستخدام كلا النوعين في (الشكل 27 - 15).

## تطبيق الفيزياء المجهر الإلكتروني

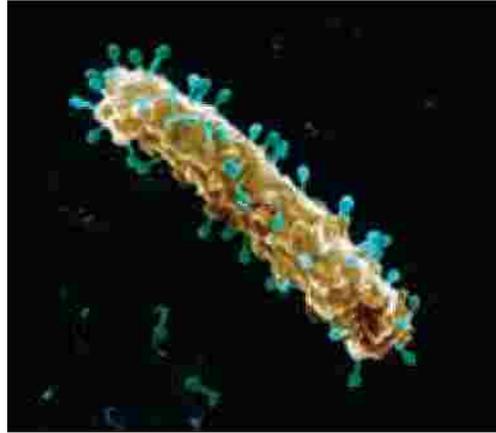


(الشكل 27-14) الماسح الإلكتروني دون المجهر. تحرك ملفات الماسح شعاعاً إلكترونياً إلى الأمام والخلف على امتداد العينة. ويتم تجميع الإلكترونات الثانوية الناجمة عن اصطدام الشعاع بالعينة، وتعديل شدة الشعاع في إنتاج صورة CRT ما.

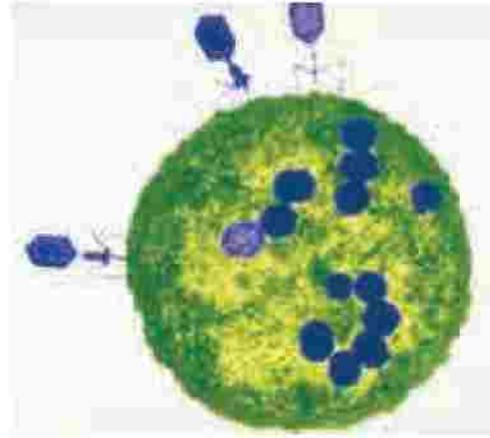
الشكل 27 - 13 النافذ الإلكتروني دون المجهر. صُممت ملفات المجال المغناطيسي لتكون "عدسات مغناطيسية"، وهي تحني المسارات الإلكترونية وتجلبها إلى بؤرة ما، كما هو مبين.



وكما نوقش في (البندين 25 - 7 و 25 - 8)، فإن أكبر خليل لتفاصيل جسم ما تقترب من طول موجة الإشعاعات المستخدمة لرؤيته. الإلكترونات المسرعة بفروق جهد من مرتبة  $10^5$  V تمتلك أطوال أمواج رتبتهها 0.004 nm. وأعلى خليل يمكن الحصول عليه عند هذه الرتبة، ولكن عملياً، نجد أن الانحرافات في العدسات المغناطيسية حُد من القدرة التحليلية في المجاهر الإلكترونية النفاذية من 0.1 إلى 0.5 nm تقريباً في أفضل الحالات. ومع ذلك، فلا يزال هذا يشكل  $10^3$  ضعفاً أدق من تلك التي يمكن الحصول عليها بواسطة مجهر الضوء المرئي. ويتوافق مع تكبير مفيد يقارب المليون. إلا أن مثل هذا التكبير يصعب الحصول عليه. أما التكبير المتعارف عليه فيبلغ  $10^4$  إلى  $10^5$ . وأعلى قدرة تحليلية يمكن الحصول عليها باستخدام ماسح إلكتروني دون مجهر هي أقل من ذلك، وهي عادةً من 5 إلى 10 nm بالرغم من كون القدرة التحليلية للماسحات الإلكترونية دون المجهرية الحديثة عالية الوضوح والتي تصل إلى 1 nm.



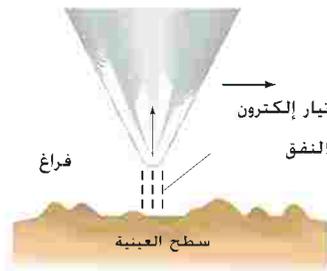
(ب)



(أ)

الشكل 27 - 15 رسم إلكتروني دون مجهري (بالوان غير حقيقية) لفيروسات تهاجم خلية بكتيرية "ايشيريشيا كولي": (أ) رسم نافذ إلكتروني دون مجهري ( $\approx 50,000\times$ ). (ب) رسم ماسح إلكتروني دون مجهري ( $\approx 35,000\times$ ).

## تطبيق الفيزياء STM و AFM



الشكل 27 - 16 رأس مجس الماسح النفقي الإلكتروني دون المجهري يتحرك إلى الأعلى وإلى الأسفل ليحافظ على تيار نفقي ثابت. رسم حركة المجس تنتج صورة للسطح.

يحتوي الماسح النفقي الإلكتروني دون المجهري (STM) المطور في ثمانينيات القرن العشرين (1980s) على مجس صغير. يكاد يصل عرض رأسه إلى ذرتين أو ثلاث ذرات. ويُحرك على امتداد العينة المراد فحصها في سلسلة من المسارات الخطية. كذلك التي يقوم بها شعاع إلكتروني في أنبوب تلفاز ما (CRT، البند 17 - 10). يبقى رأس المجس خلال مسح العينة قريباً جداً من سطحها. فيبتعد تقريباً مسافة نانومتر واحد أعلاها (الشكل 27 - 16). وبسبب تطبيق فولتية صغيرة بين المجس والسطح مغادرة الإلكترونات للسطح ومرورها خلال الفراغ إلى المجس. بوساطة عملية تعرف بـ النفقية (اجتياز النفق) (نوقشت في البند 30 - 12). وهذا التيار "النفقي" حساس جداً لمقدار عرض الفجوة. وعليه، فإن آلية للتغذية الراجعة يمكن استخدامها لرفع المجس وخفضه للحفاظ على تيار إلكتروني ثابت. ترسم حركة المجس الرأسية المتتبع لسطح العينة عندئذ كدالة في الموضع. لتنتج صورة ثلاثية الأبعاد للسطح. ويمكن تحليل معالم السطح الدقيقة كحجم الذرة بقدرة خليلية أفضل من 0.1 nm أفقيًا، و 0.01 nm أو أفضل رأسيًا. وأعطى هذا النوع من التحليل إثارة هائلة لدراسة بنية سطوح المواد. والصورة "الطبوغرافية" للسطح تمثل فعلياً توزيع الشحنة الإلكترونية.

إنّ مجهر القوة الذري (AFM) الذي طوّر في ثمانينيات القرن العشرين (1980s) يعدّ بطرق كثيرة مشابهها جهاز STM. ولكن يمكن استخدامه على عينات المواد بنطاق أوسع من سابقه. وبدلاً من قياس تيار كهربائي، فإنّ جهاز مجهر القوة AFM، يقيس القوة بين رأس الذراع الداعمة والعينة، أي القوة التي تعتمد بشدة على المسافة الفاصلة بين رأس الذراع والعينة عند كل نقطة. ويتحرك الرأس كما في جهاز STM.

## 10-27 النماذج المبكرة للذرة

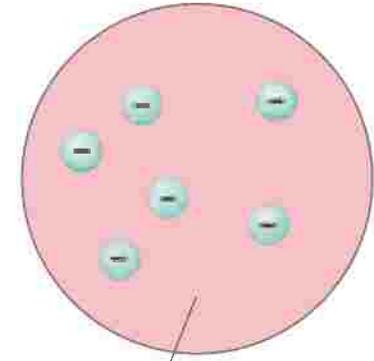
بحلول عام 1900، قبل معظم العلماء فكرة أنّ المادة مكونة من ذرات. ومع اكتشاف الإلكترون في تسعينيات القرن التاسع عشر (1890s)، بدأ العلماء بالتفكير بأنّ الذرة نفسها تمتلك بنياناً مع كون الإلكترونات جزءاً من هذا التركيب أو البنيان. ونقدّم الآن نهجنا الحديث للذرة والنظرية الكمية التي ترتبط بها.\*

\* يمكن أن يقول بعض القراء: "أخبرنا بالحقائق كما نعرفها اليوم، ولا نزعجنا بخلفيتها التاريخية ونظرياتها البائدة". إنّ هذا النهج يهمل الناحية الإبداعية للعلم، ويعطي انطباعاً غير صحيح عن كيفية تطور العلوم. إضافة إلى ذلك، فمن غير الممكن حقيقة استيعاب وجهة النظر الحالية للذرة دون الاطلاع على المبادئ التي أفضت إليها.

لقد تخيل النموذج النمطي للذرة خلال تسعينيات القرن التاسع عشر (1890s) على أنها كرة متجانسة موجبة الشحنة تحتوي في داخلها على إلكترونات صغيرة جدًا ذات شحنات سالبة. تشبه حبات الخوخ في حلوى هلامية نوعا ما. (الشكل 27 - 17).

في حوالي العام 1911، أجرى إرنست رذرفورد (1871 - 1937) وزملاؤه، تجاربا تعارض نتائجها نموذج حلوى الخوخ الهلامية للذرة. وفي هذه التجارب شعاع من "جسيمات ألفا" المشحونة بشحنات موجبة تم توجيهها على ورقة أسطوانية الشكل رقيقة مصنوعة من مادة فلزية كالذهب (الشكل 27 - 18 أ). (جسيمات  $\alpha$  هذه المكتشفة حديثا انبعثت من مواد مشعة. وقد تبين لاحقا أنها ذرات هيليوم ثنائية التآين - أي أنها تملك شحنة  $+2e$ ). وكان متوقفا وفقا لنموذج الخوخ - الحلوى الهلامية ألا تنحرف أي من جسيمات ألفا بدرجة كبيرة. لأن الإلكترونات أخف بكثير من جسيمات ألفا. ولأن جسيمات ألفا ليس من المفروض أن تواجه تركيزًا هائلًا من الشحنات الموجبة لتتنافر معها بشدة. وتعارضت النتائج العملية تمامًا مع هذه التوقعات. وقد وُجد أن معظم جسيمات ألفا قد مرّت من الورقة الأسطوانية الرقيقة دون أن تتأثر. كما لو أنّ الورقة في معظمها كانت فراغا. وانحرف عددٌ صغيرٌ من تلك الجسيمات بزوايا كبيرة جدًا. لدرجة أن بعضها قد ارتد نحو الخلف. ويكاد يعود من الاتجاه الذي قدم منه. ويمكن لهذا أن يحدث فقط. كما علل رذرفورد. إذا تنافرت جسيمات ألفا المشحونة بشحنات موجبة مع شحنة موجبة هائلة مركزة في منطقة صغيرة في الفضاء (انظر الشكل 27 - 18 ب). وافترض أن الذرة يجب

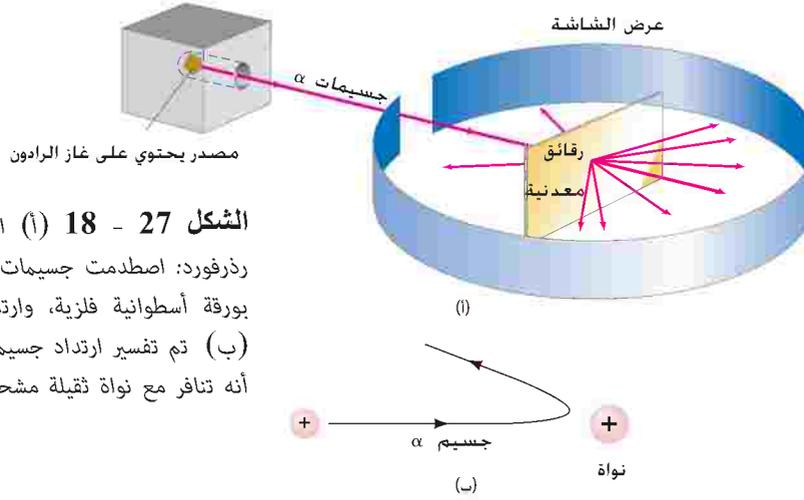
$\approx 10^{-10} \text{ m}$



المواد مشحونة ايجابيا

الشكل 27 - 17 نموذج حلوى الخوخ الهلامية للذرة.

### نموذج رذرفورد الكواكبي

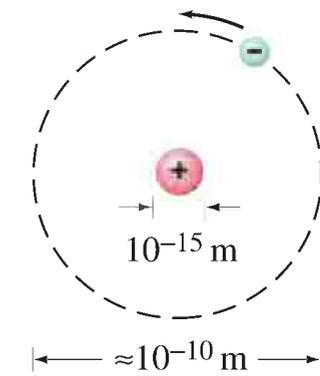


الشكل 27 - 18 (أ) الترتيب العملي لتجربة رذرفورد: اصطدمت جسيمات  $\alpha$  المشعة من الرادون بورقة أسطوانية فلزية، وارتد بعضها نحو الخلف. (ب) تم تفسير ارتداد جسيمات  $\alpha$  نحو الخلف على أنه تنافر مع نواة ثقيلة مشحونة بشحنة موجبة.

أن تتكون من نواة صغيرة جدًا، ولكنها ثقيلة ومشحونة بشحنة موجبة، وتحتوي على أكثر من 99.9% من كتلة الذرة. ومحاطة بإلكترونات بعيدة عنها مسافة ما. وتدور الإلكترونات في أفلاك حول النواة - في صورة مائلة لدوران الكواكب حول الشمس - لأنها لو كانت ساكنة، لسقطت باتجاه النواة بسبب التجاذب الكهربائي (الشكل 27 - 19). واقترحت جارب رذرفورد أن نصف قطر النواة يتراوح بين  $10^{-15} \text{ m}$  إلى  $10^{-14} \text{ m}$ . ومن النظرية الحركية، وخصوصًا خليل أينشتاين للحركة البراونية (انظر البند 13 - 1). فقد تم تقدير نصف قطر الذرة على أنه حوالي  $10^{-10} \text{ m}$ . ولذلك، فإن الإلكترونات تبدو وكأنها على بعد 10,000 إلى 100,000 ضعف نصف قطر النواة نفسها. ولو كانت النواة بحجم كرة القاعدة (البيسبول)، فستملك الذرة قطر مدينة كبيرة تمتد إلى عدة كيلو مترات). ولذلك تتكون الذرة في معظمها من الفراغ.

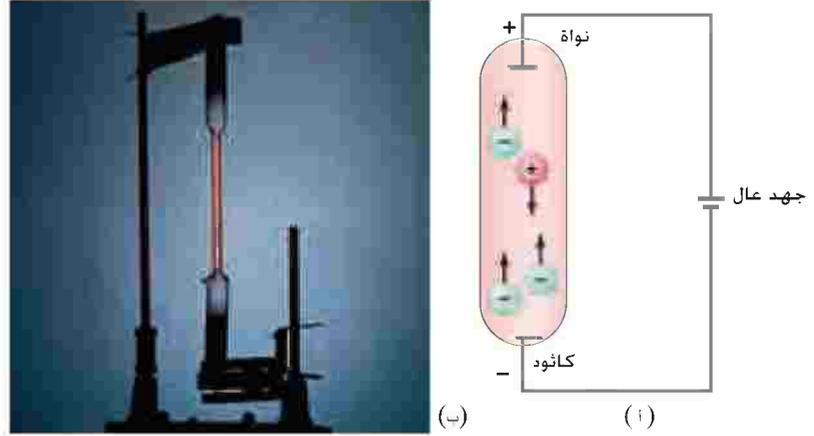
إن نموذج رذرفورد "الكواكبي" للذرة (المسمى أيضًا "النموذج النووي للذرة") كان خطوة رئيسية باتجاه الطريقة التي ننظر بها للذرة في هذه الأيام. ومع هذا، فلم يكن نموذجًا متكاملًا، حيث اكتنفته بعض المشاكل الرئيسية، كما سنرى.

الشكل 27 - 19 نموذج رذرفورد للذرة، وبدلته تدور الإلكترونات حول نواة موجبة صغيرة جدا (المقياس غير دقيق). ويتم تخيل الذرة على أنها تتكون (في معظمها) من الفراغ.



## 11-27 الأطياف الذرية، المفتاح إلى تركيب الذرة

في بداية هذا الفصل. رأينا أن المواد الصلبة المسخنة (بالإضافة إلى السوائل والغازات الكثيفة) تشع طيفاً مستمراً من أطوال الأمواج. وتم افتراض أن هذه الإشعاعات ناتجة من اهتزازات الذرات والجزيئات التي تخضع بدرجة كبيرة لتفاعل كل ذرة أو جزيء مع جيرانها / جيرانه. يمكن أن تثار الغازات النادرة أيضاً لتشع ضوءاً. ويتم هذا بالتسخين الشديد. أو بشكل أعم بتطبيق فولتية عالية على "أنبوب تفريغ" يحتوي على الغاز عند ضغط منخفض (الشكل 27 - 20).

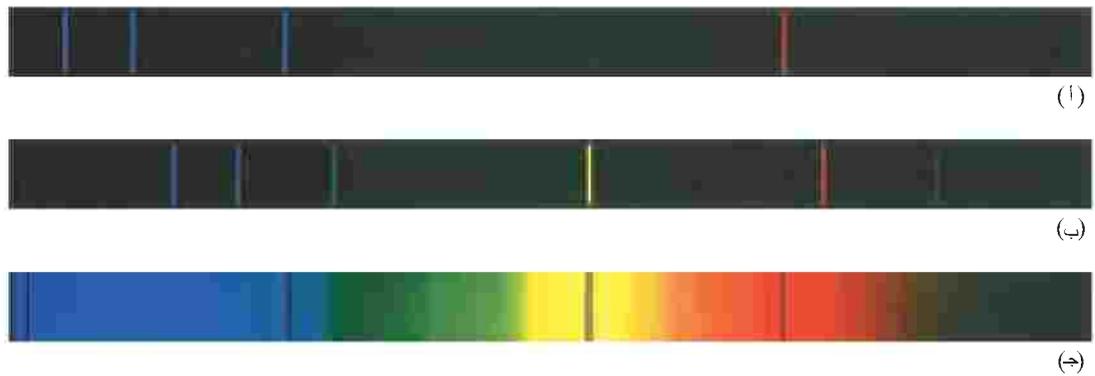


الشكل 27 - 20 أنبوب تفريغ - غازي : (أ) مخطط. (ب) صورة لأنبوب تفريغ حقيقي للهيدروجين.

تم ملاحظة الإشعاعات من الغازات المهيجة سابقاً في القرن التاسع عشر. ووجد أن الطيف لم يكن مستمراً. بل متقطعاً. وبما أن الغازات المهيجة تشع ضوءاً بأطوال موجية معينة. وعندما يحلل هذا الضوء خلال شق المطياف أو جهاز قياس الطيف. فإن طيفاً خطياً يشاهد بدلاً من طيف مستمر. الأطياف الخطية المشعة من عدد من العناصر في المنطقة المرئية مبينة في (الشكل 27 - 21). وكذلك في (الفصل 24) (الشكل 24 - 28). طيف الانبعاث يميز للمادة ويمكن أن يخدم "كبصمة" للتعرف إلى الغاز.

كما رأينا في (الفصل 24) أنه إذا مرّ طيف مستمر خلال غاز نادر. فمن الممكن حينئذٍ ملاحظة خطوط داكنة في الطيف الناتج. عند أطوال أمواج تعود لخطوط يتم إشعاعها في العادة بوساطة الغاز. ويدعى هذا بـ طيف الامتصاص (الشكل 27 - 21 ج). وأصبح من الواضح أن الغازات تستطيع أن تمتص الضوء عند الترددات نفسها التي تبعث عنها. وباستخدام غشاء حسّاس للضوء فوق البنفسجي للضوء تحت الأحمر. وجد أن الغازات تشع وتمتص ترددات متقطعة في هذه المناطق إضافة إلى المنطقة المرئية.

الشكل 27 - 21 أطياف انبعاث للغازات: (أ) هيدروجين ذري. (ب) هيليوم. (ج) طيف الامتصاص الشمسي.



في الغازات قليلة الكثافة، تكون الذرات أكثر بعداً عن بعضها بالتوسط. وعليه، يمكن اعتبار الضوء المنبعث أو الممتص ناجماً من ذرات مفردة بدلاً من التفاعل بين الذرات. كما في المادة الصلبة، أو السائلة، أو الغازات الكثيفة. ولذلك، فإن الطيف الخطّي يساعد كمفتاح لتركيّب الذرة. وأيّ نظرية في التركيّب الذري يجب أن تكون قادرة على تفسير سبب انبعاث الضوء من الذرات فقط على شكل أطوال أمواج متقطعة. ويجب أن تستطيع التنبؤ بأطوال الأمواج هذه.

إنّ أبسط ذرة هي ذرة الهيدروجين - وهي تمتلك إلكترونًا وحيدًا يدور حول نواتها. كما أنّها تمتلك أبسط طيف أيضًا. وأطياف معظم الذرات تبدي قليلًا من الانتظام الظاهر. إلا أنّ المسافة بين الخطوط في طيف الهيدروجين تتناقص بشكل منتظم (الشكل 27 - 22). وبالفعل، فقد أثبت "جي جي بالمر" (1825 - 1898) في عام 1855 أنّ الخطوط الأربعة في المنطقة المرئية لطيف الهيدروجين (وأطوال أمواجها المقاسة هي 656 nm و 486 nm و 434 nm و 410 nm) لها أطوال أمواج تتبع الصيغة

$$(9-27) \quad \frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, \dots$$

وتأخذ  $n$  هنا القيم 3 و 4 و 5 و 6 للخطوط المرئية الأربعة. ويُدعى  $R$  ثابت ريدبيرغ. وقيمته هي  $R = 1.0974 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ . ووُجد لاحقًا أنّ سلسلة خطوط بالمر الممتدة إلى منطقة فوق البنفسجي UV تنتهي عند  $\lambda = 365 \text{ nm}$  كما هو مبين في (الشكل 27 - 22). وتنطبق صيغة بالمر أيضًا (المعادلة 27 - 9) على الخطوط ذات أعداد  $n$  الصحيحة والمرتفعة. وأصبح من الصعب التفريق بين الخطوط القريبة من 365 nm؛ لالتصاقها الكبير ببعضها بعضًا. كما وتنطبق حدود السلسلة عند 365 nm على  $n = \infty$  (ولذلك فإنّ  $1/n^2 = 0$  في المعادلة 27 - 9).

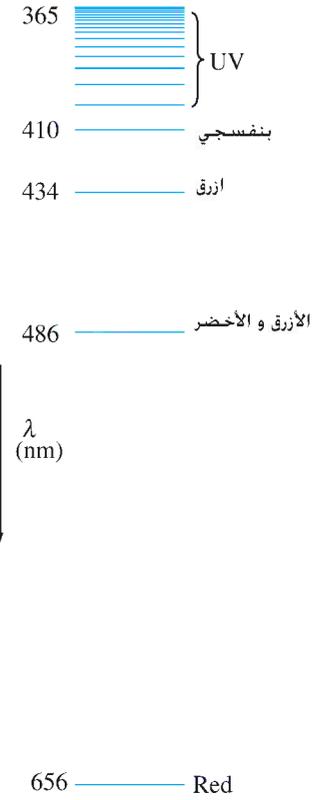
ولاحقًا، أظهرت التجارب على الهيدروجين أنّ هناك سلاسل متشابهة للخطوط في المنطقتين UV و IR. وكلّ سلسلة لها نمط مشابه لسلسلة بالمر، ولكن بأطوال أمواج مختلفة (الشكل 27 - 23). ووُجد أنّ كلًّا من هذه السلاسل تنطبق على صيغة مشابهة لشكل (المعادلة 27 - 9) ولكن مع استبدال  $1/1^2, 1/3^2, 1/4^2$  وهكذا دواليك، وعلى سبيل المثال، تحتوي سلسلة ليمان على خطوط بأطوال أمواج من 91 nm إلى 122 nm (في منطقة UV) وتنطبق على الصيغة

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

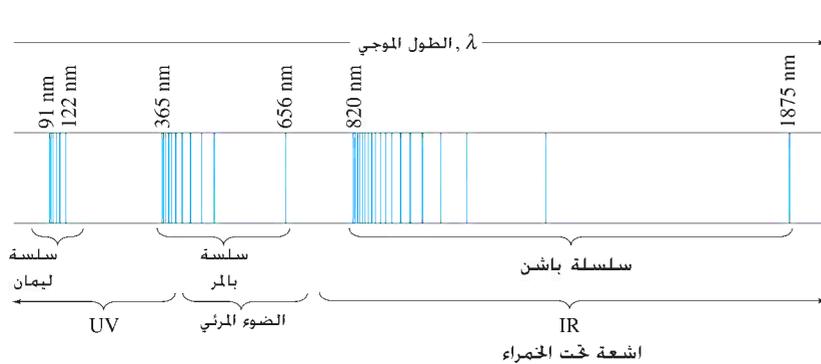
وتنطبق أطوال الأمواج في سلسلة باشن (في منطقة IR) على الصيغة

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

ولم يستطع نموذج رذرفورد تفسير سبب انبعاث الأطياف الخطية من الذرات. كما واجه أيضًا صعوبات أخرى. وحسب نموذج رذرفورد، فإنّ الإلكترونات تدور حول النواة، وبما أنّ مساراتها منحنية، فإنّ الإلكترونات تتسارع. ولذلك يجب أن تشع ضوءًا كأني شحنة كهربائية تتسارع (الفصل 22). وبما أنّ الضوء يحمل طاقة، وهذه الطاقة محفوظة، فإنّ طاقة الإلكترون الذاتية يجب أن تنقص للتعويض. وعليه، فمن المتوقع من الإلكترون أن



الشكل 27 - 22 سلاسل بالمر لخطوط الهيدروجين.



الشكل 27 - 23 الطيف الخطي لذرة الهيدروجين، كل سلسلة تنطبق على الصيغة

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

حيث

$n' = 1$  لسلسلة ليمان

$n' = 2$  لسلسلة بالمر

$n' = 3$  لسلسلة باشن. وهكذا دواليك، ويمكن لـ  $n$  أن تأخذ القيم الصحيحة جميعها من  $n = n' + 1$  إلى ما لا نهاية. والخطوط الوحيدة في المنطقة المرئية للطيف الكهرومغناطيسي هي جزء من سلسلة بالمر.

يتحرّك باتجاه النواة بحركة لولبية. وخلال حركة الإلكترونات اللولبية هذه باتجاه النواة. تزداد تردداتها خلال زمن قصير، وكذلك تردد الضوء المنبعث. ولذلك، فإنّ الصعوبتين الرئيسيتين لنموذج رذرفورد هما كما يلي:

- (1) تنبأ النظرية بانبعث ضوءي بمدى مستمر من الترددات. في حين أظهرت التجارب أطيافاً خطية.
- (2) تنبأت النظرية بأنّ الذرات غير مستقرة. - ستنبعث الإلكترونات مسارا لولبيا بسرعة باتجاه النواة- لكننا نعلم أنّ الذرات عموما مستقرة؛ لوجود مادة مستقرة حولنا في كلّ مكان.

ومن الواضح أنّ نموذج رذرفورد كان غير كاف. وهناك حاجة بشكل ما إلى التعديل. وقدّم هذا التعديل "نيل بور" بنموذج احتوى على الفرضية الكمية. وعلى الرغم من أنّ نموذج بور قد عدل بعد ذلك، إلاّ أنه كان خطوة حاسمة لصياغة فهمنا الحالي. وبعض جوانب نموذج بور لا تزال مفيدة إلى يومنا هذا. ولذلك سنختبرها بالتفصيل في البند القادم.

## 12-27 نموذج بور

درس بور في مختبر رذرفورد لعدة أشهر خلال عام 1912 وكان قد اقتنع لدرجة ما بصحة نموذج رذرفورد الكواكبي للذرة. ولكي يجعل النموذج قابلا للتطبيق؛ شعر بور أنّ النظرية الكمية المطوّرة حديثا يجب أن تدرج بطريقة ما في النموذج. وأظهر عمل كلّ من بلانك وأينشتاين على الأجسام الصلبة الساخنة، أنّ طاقة الشحنات الكهربائية المتذبذبة يجب أن تتغير بصورة غير مستمرة - من حالة طاقة محددة إلى أخرى. ليتصاحب هذا التغير مع انبعث كمّ من الضوء. وربما جادل بور، بأنّ الإلكترونات في ذرة ما لا يمكن لها أن تفقد طاقة بصورة مستمرة أيضا. ولكن يجب أن تقوم بذلك في "قفزات" كمية. وخلال بنائه لنموذجه على امتداد عام تال، اقترح بور مُسلمة حركة الإلكترونات لتدور حول النواة في أفلاكٍ دائرية. ومع هذا، فقد حدّد أفلاكًا معينة مسموحة. وزاد مقترحًا أيضًا هو أنّ الإلكترون يمتلك في كل فلكٍ طاقة محددة، ويتحرك في الفلك دون أن يشعّ أيّ طاقة (بالرغم من أنّ ذلك يتناقض مع الأفكار التقليدية؛ لأنّ الشحنات الكهربائية المسرعة يجب أن تشعّ أمواج EM. انظر الفصل 22). ولذلك أطلق على الأفلاك المحتملة الحالات الساكنة. واقترح أنّ الضوء ينبعث فقط عندما يفضز الإلكترون من مستوى ساكن (علوي) إلى مستوى آخر (سفلي) ذي طاقة أقل. وعندما تحدث هذه القفزة، فإنّ فوتونا ضوئيا وحيدا ينبعث وتعطى طاقته حسب مبدأ حفظ الطاقة كالتالي:

$$hf = E_u - E_l \quad (10 - 27)$$

وتشير  $E_u$  إلى طاقة الحالة العلوية. في حين تشير  $E_l$  إلى طاقة الحالة السفلية. انظر (الشكل 27 - 24). وبدأ بور سعيه لتحديد الطاقات التي ستمتلكها الأفلاك في أبسط ذرة: أي الهيدروجين. ليستطيع بعدئذ التنبؤ بالطيف الضوئي المنبعث حسب (المعادلة 27 - 10). ووجد بور المفتاح الذي كان يبحث عنه في صيغة بالمر. وقد وجد بسرعة أنّ نظريته ستوافق مع صيغة بالمر إذ افترض أنّ زخم الإلكترون الزاوي  $L$  مكمي، ويساوي عددا صحيحا  $n$  مضروبا في  $h/2\pi$ . وكما رأينا في الفصل 8، فإنّ الزخم الزاوي يعطى بـ  $L = I\omega$ . حيث  $I$  يمثل عزم القصور الذاتي، و  $\omega$  هي السرعة الزاوية. وجسيم وحيد كتلته  $m$  يتحرك على محيط دائرة نصف قطرها  $r$  بسرعة  $v$ .  $I = mr^2$ ، و  $\omega = v/r$ . لذلك  $L = I\omega = (mr^2)(v/r) = mvr$  ويكون الشرط الكمي لبور

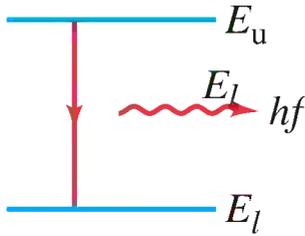
$$L = mvr_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (11 - 27)$$

وتمثل  $n$  عددا صحيحا، و  $r_n$  نصف قطر الفلك  $n^{\text{th}}$  المحتمل. وقد رقمت الأفلاك المسموحة 1، 2، 3، .... حسب قيمة  $n$  التي سميت العدد الكمي الرئيسي للفلك.

لم تبين (المعادلة 27 - 11) على أساس نظري متين. ولكن بحث "بور" عن "شرط كمي" ما، ومحاولات مثل  $E = hf$  (حيث تمثل  $E$  طاقة الإلكترون في الفلك) لم تفض إلى نتائج كذلك التجريبية. وقد استخدم "بور" (المعادلة 27 - 11) لأنها ببساطة تحقّق المطلوب. ونبحت الآن عن الكيفية. وبشكل خاص، دعنا نحدد تنبأ نظرية بور لأطوال الأمواج المقيسة للضوء المنبعث.

### حالة ساكنة

الشكل 27 - 24 تبعث ذرة فوتونا (طاقة  $hf$ ) عندما تتغير طاقتها من  $E_u$  إلى طاقة أقل  $E_l$ .



### زخم زاوي مكمي

### عدد كمي ، n

إلكترون ما في فلك دائري نصف قطره  $r$  (الشكل 27 - 25) يمتلك تسارعاً مركزياً  $v^2/r$  ناجماً من قوة التجاذب الكهربائية بين الإلكترون السالب والنواة الموجبة. وتعطى هذه القوة بقانون كولوم الآتي:

$$F = k \frac{(Ze)(e)}{r^2}$$

حيث  $k = 1/4\pi\epsilon_0 = 9.00 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$  والشحنة على الإلكترون  $q_1 = -e$  وتلك على النواة  $q_2 = +Ze$  وتمثل  $Z$  عدد الشحنات الموجبة\* (أي البروتونات). ولذرة الهيدروجين  $Z = +1$ . وحسب قانون نيوتن الثاني،  $F = ma$  نعوض عن  $F$  بدلالة قانون كولوم و  $a = v^2/r_n$  لفلك (لدار) معين مسموح به نصف قطره  $r_n$  فنحصل على مايلي:

$$F = ma$$

$$k \frac{Ze^2}{r_n^2} = \frac{mv^2}{r_n}$$

ونحل لإيجاد  $r_n$

$$r_n = \frac{kZe^2}{mv^2}$$

وبعد ذلك نعوض لإيجاد  $v$  من (المعادلة 27 - 11) (والتي تعطي  $v = nh/2\pi mr_n$ ) :

$$r_n = \frac{kZe^2 4\pi^2 m r_n^2}{n^2 h^2}$$

ونحل لإيجاد  $r_n$  (تظهر على جانبي المعادلة، فنختصر واحدة منهما):

$$(12 - 27) \quad r_n = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m k Z e^2} = \frac{n^2}{Z} r_1$$

ويكون

$$r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2}$$

تعطي (المعادلة 27 - 12) أنصاف الأقطار لكل فلك ممكن. وأصغر فلك يكون لـ  $n = 1$ ، وقيمه للهيدروجين ( $Z = 1$ )

$$r_1 = \frac{(1)^2 (6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})^2}{4(3.14)^2 (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(9.00 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1.602 \times 10^{-19} \text{ C})^2}$$

$$(13 - 27) \quad r_1 = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m}$$

ويُدعى في بعض الأحيان نصف قطر أصغر فلك في ذرة الهيدروجين  $r_1$ ، بـ **نصف قطر بور**. ومن (المعادلة 27 - 12)، نرى أنّ أنصاف أقطار أكبر الأفلاك\*\* تزداد بدلالة  $n^2$ . ولذلك فإنّ

$$r_2 = 4r_1 = 2.12 \times 10^{-10} \text{ m},$$

$$r_3 = 9r_1 = 4.76 \times 10^{-10} \text{ m},$$

⋮

$$r_n = n^2 r_1, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

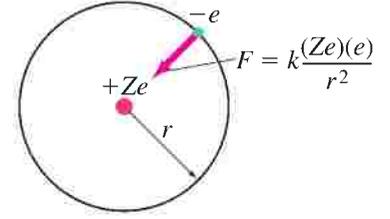
أول أربعة أفلاك مبينة في (الشكل 27 - 26). لاحظ أنه، بالنسبة إلى نموذج بور، يمكن للإلكترون أن يوجد فقط في أفلاك تُعطى وفق (المعادلة 27 - 12). ولا توجد أيّ أفلاك مسموحة أخرى بينها. ولذرة ذات  $Z \neq 1$ ، نستطيع أن نكتب أنصاف الأقطار الفلكية  $r_n$  باستخدام (المعادلة 27 - 12):

$$r_n = \frac{n^2}{Z} (0.529 \times 10^{-10} \text{ m}), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (14 - 27)$$

وفي كل فلك من الأفلاك الممكنة، يمكن للإلكترون أن يمتلك حسب نموذج بور

\* نشمل  $Z$  في اشتقاقنا بحيث نستطيع أن نتعامل مع الذرات الأخرى أحادية الإلكترون ("المشابهة للهيدروجين") مثل الأيونات التالية ( $\text{He}^+$  ( $Z = 2$ ) و  $\text{Li}^{2+}$  ( $Z = 3$ )). يمتلك الهيليوم في الحالة المتعادلة إلكترونين. فإذا فقد إلكترون واحد، فإنّ أيون  $\text{H}^+$  المتبقي سيتكون من إلكترون واحد يدور حول نواة شحنتها  $\text{He}^+$ . وبالمثل، الليثيوم ثنائي التأيين  $\text{Li}^{2+}$  له أيضاً إلكترون وحيد، وفي هذه الحالة  $Z = 3$ .

\*\* كن حذراً، ولا تصدق أنّ هذه الأفلاك المعرفة جيداً موجودة في الحقيقة. واليوم يعتقد أنّ الإلكترونات تشكّل "غيوما" كما ستناقش في (الفصل 28).

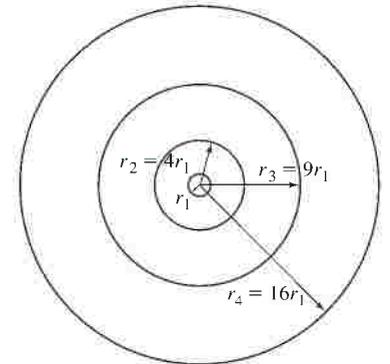


الشكل 27 - 25 القوة الكهربائية (قانون كولوم) تبقي الإلكترون السالب في فلك حول النواة موجبة الشحنة.

### نصف قطر بور

الشكل 27 - 26 أفلاك ممكنة في

نموذج بور للهيدروجين:  
 $r_1 = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m}$



طاقة محددة. كما تظهر الحسابات التالية. تعادل الطاقة الكلية مجموع الطاقتين: الحركية والوضع. وتُعطي طاقة وضع الإلكترون كالتالي:  $PE = qV = -eV$ . حيث تمثل  $V$  الجهد الناتج من شحنة نقطية  $+Ze$  كما أعطي وفق (المعادلة 17 - 5). ولذلك:  $V = kQ/r = kZe/r$ .

$$PE = -eV = -k \frac{Ze^2}{r}$$

إنّ الطاقة الكلية  $E_n$  لإلكترون في الفلك  $n^{\text{th}}$  ذي نصف القطر  $r_n$  هي مجموع طاقتي الحركة والوضع

$$E_n = \frac{1}{2} mv^2 - \frac{kZe^2}{r_n}$$

وعندما نعوّض  $v$  من (المعادلة 27 - 11) و  $r_n$  من (المعادلة 27 - 12) في هذه المعادلة. نحصل على

مستويات طاقة

$$(27 - 15 \text{ أ}) \quad E_n = -\frac{2\pi^2 Z^2 e^4 m k^2}{h^2} \frac{1}{n^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

وإذا قيّمنا الحدّ الثابت في (المعادلة 27 - 15) أو وحوّنا به بدلالة الإلكترون فولت. كما هو متّبع عادةً في الفيزياء الذرية. فسنحصل على

الحالة الأرضية للهيدروجين

$$(27 - 15 \text{ ب}) \quad E_n = -(13.6 \text{ eV}) \frac{Z^2}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

أخفض مستوى طاقة ( $n = 1$ ) للهيدروجين ( $Z = 1$ )

$$E_1 = -13.6 \text{ eV}$$

وهي أنّ  $n^2$  تظهر في مقام (المعادلة 27 - 15 ب). فإنّ طاقة الأفلاك الأكبر في الهيدروجين ( $Z = 1$ ) تعطي كالتالي:

$$E_n = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2}$$

وعلى سبيل المثال

$$E_2 = \frac{-13.6 \text{ eV}}{4} = -3.40 \text{ eV}$$

$$E_3 = \frac{-13.6 \text{ eV}}{9} = -1.51 \text{ eV}$$

الحالات المثارة (أول اثنين)

ليست أنصاف الأقطار هي الوحيدة المكمية. فالطاقة مكمية كذلك كما يظهر من (المعادلتين 27 - 15). إنّ العدد الكمي  $n$  الذي يرمز إلى أنصاف الأقطار يرمز إلى مستويات الطاقة أيضا. وأنّ مقدار أخفض مستوى طاقة أو حالة طاقة هو  $E_1$  وتدعى الحالة الأرضية. والحالات الأعلى  $E_2$  و  $E_3$ . وهكذا دواليك. تدعى الحالات المهيجة (المثارة).

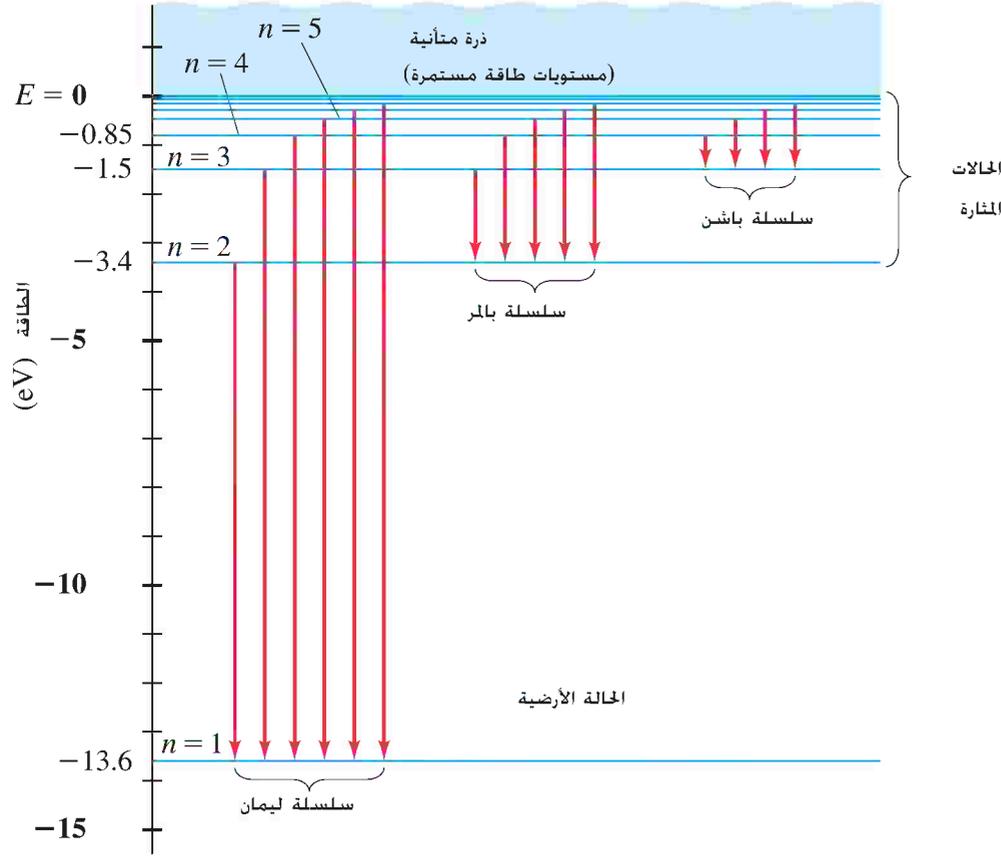
ولاحظ أنه بالرغم من أنّ طاقة الأفلاك الكبيرة لها قيم عديدة أقلّ. فإنّ الطاقات جميعها أقلّ من الصفر. ولذلك. فإنّ  $-3.4 \text{ eV}$  هي طاقة أكبر من  $-13.6 \text{ eV}$ . ويترتب على ذلك أنّ الفلك الأقرب للنواة ( $r_1$ ) يمتلك أقلّ طاقة. والسبب وراء القيم السالبة للطاقات يرتبط بالطريقة التي عرّفنا بها صفر طاقة الوضع. ولشحنتين نقطيتين.  $PE = kq_1 q_2 / r$  تكافئ صفر PE عندما تكون المسافة الفاصلة بينهما تصل إلى ما لانهاية كما نوقشت في (البند 17 - 5). ولذلك. فإنّ إلكتروننا يستطيع بالكاد أن يتحرر من الذرة بالوصول إلى  $r = \infty$  (أو. على الأقل. بالابتعاد عن النواة) مع طاقة حركية تساوي صفرا. سيمتلك  $E = KE + PE = 0 + 0 = 0$  ناتجة من  $n = \infty$  في (المعادلتين 27 - 15). وإذا كان إلكترون ما حرّاً وله طاقة حركية ما. فإنّ  $E > 0$ . وإزالة إلكترون ما يمثل جزءا من ذرة ما؛ يجب أن تتوافر طاقة مدخلة (وعدا عن ذلك فإنّ الذرات لن تكون ثابتة). وبما أنّ  $E \geq 0$  للإلكترون الحرّ. فإنّه من المنطقي أن يمتلك أيّ إلكترون مرتبط بذرة  $E < 0$ . أي أنه يجب أن تضاف طاقة لرفع مقدار طاقة الإلكترون الكلية من قيمة سالبة ما إلى الصفر من أجل خريه من موضعه.

طاقة الترابط (طاقة التأين).

تُدعى الطاقة الدنيا اللازمة لإزالة إلكترون من الحالة الأرضية لذرة ما طاقة الترابط أو طاقة التأين. قيست طاقة تأين الهيدروجين فوجدت أنها  $13.6 \text{ eV}$ . وهذا يرتبط تماما بإزالة إلكترون من أخفض حالة.  $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ . نحو الأعلى إلى  $E = 0$  حيث يمكنه أن يكون حرّاً.

## تفسير انبعاث الأطياف الخطية

من المفيد إظهار مختلف قيم الطاقة الممكنة كخطوط أفقية على مخطط مستوى - طاقة . وهذا مبين للهيدروجين في (الشكل 27 - 27). \* يمكن أن يكون الإلكترون في ذرة الهيدروجين في أي من هذه المستويات حسب نظرية بور. ولكن لا يمكن له أن يكون بين ذلك، ولنقل عند  $9.0 \text{ eV}$  - وعند درجة حرارة الغرفة. فإن معظم ذرات H تقريباً ستكون في الحالة الأرضية ( $n = 1$ ). وعند درجات الحرارة الأعلى، أو خلال تفريغ كهربائي، عندما يكون هناك تصادمات كثيرة بين الإلكترونات الحرة والذرات، يمكن لذرات كثيرة أن تكون في حالات مهيجة ( $n > 1$ ). وعندما يكون إلكترون ذرة ما في الحالة المهيجة، فإنه يستطيع أن يقفز نحو الأسفل إلى حالة أخفض، معطياً فوتوناً في تلك العملية. وهذا طبقاً لنموذج بور، يمثل الأصل في أطياف انبعاث الغازات المهيجة.



**الشكل 27 - 27** مخطط مستوى - طاقة لذرة هيدروجين، يظهر أساس الأطياف الخطية لسلاسل لايمان وبالمر وباشن (الشكل 27 - 23). كل سهم رأسي يمثل انتقالاً ذرياً محفزاً لفوتونات أحد الأطياف الخطية (طول موجي وحيد أو تردد).

تمثل الأسهم الرأسية في (الشكل 27 - 27) انتقالات أو قفزات ترتبط بمختلف الأطياف الخطية الملاحظة. وعلى سبيل المثال، يحفز الإلكترون الذي يقفز من مستوى  $n = 3$  إلى  $n = 2$  الخط  $656\text{-nm}$  في سلسلة بالمر، في حين تحفز القفزة من  $n = 4$  إلى  $n = 2$  الخط  $486\text{-nm}$  (انظر الشكل 27 - 22). ونستطيع التنبؤ بأطوال أمواج الأطياف الخطية المنبعثة بدمج (المعادلة 27 - 10) مع (المعادلة 27 - 15). وبما أن  $hf = hc/\lambda$ ، فسنحصل من (المعادلة 27 - 10) على

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{hf}{hc} = \frac{1}{hc}(E_n - E_{n'})$$

وتشير  $n$  إلى الحالة العليا، أما  $n'$  فتشير إلى الحالة السفلى. وباستخدام (المعادلة 27 - 15) بعد ذلك،

$$(16-27) \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{2\pi^2 Z^2 e^4 m k^2}{h^3 c} \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

وهذه الصيغة النظرية لها شكل صيغة بالمر العملية نفسها (المعادلة 27 - 9). مع  $n' = 2$ . ولذلك فإننا نرى أن سلسلة خطوط بالمر تعود إلى انتقالات أو "قفزات" تهبط بالإلكترون نحو الأسفل إلى مستوى الطاقة الثاني. وبالمثل، تعود  $n' = 1$  إلى سلسلة لايمان، في حين تعود  $n' = 3$  إلى سلسلة باشن (انظر الشكل 27 - 27).

\* لاحظ أن الإلكترون سيكون حراً عندما تكون طاقته أعلى من  $E = 0$ . ويستطيع أن يمتلك أي طاقة (تكون  $E$  عندها غير مكمية). لذا، فهناك حالات من الطاقة المستمرة فوق  $E = 0$ . كما يظهر في مخطط مستوى - طاقة (الشكل 27 - 27).

وُجِدَ أنَّ قيمة الثابت في (المعادلة 27 - 16) عندما  $Z = 1$ ، تتفق مع قيمة ثابت ريدبرج المقاسة. والنجاح الباهر لنموذج بور هو إعطاؤه التفسير المناسب لانبعث الأطياف الخطية من الذرات. وكذلك تنبؤه الدقيق بأطوال أمواج الضوء المنبعث من الهيدروجين. ويفسر نموذج بور أيضاً أطياف الامتصاص: فوتونات بأطوال أمواج مناسبة يستطيع كل منها دفع إلكترون ما من أحد مستويات الطاقة لينقله إلى مستوى أعلى. ولكي تحفظ الطاقة، فإن الفوتونات ذات الطاقة المناسبة فقط سيتم امتصاصها. وهذا يفسر خروج الطيف الضوئي المستمر الداخل على غاز ما مصحوباً بخطوط (امتصاص) داكنة عند ترددات مرتبطة بخطوط انبعث (الشكل 27 - 21 ج). وتؤكد نظرية بور أيضاً اتزان الذرات. فهي تؤسس الاتزان بالقانون: الحالة الأرضية هي أخفض حالة للإلكترون، ولا يوجد أي مستوى طاقة أقل يستطيع أن يذهب إليه لينبعث منه طاقة أكثر. وفي النهاية، كما رأينا بالأعلى، تنبأ نظرية بور بطاقة تأين مقدارها 13.6 eV للهيدروجين. ومع هذا، فلم يكن نموذج بور ناجحاً تماماً مع الذرات الأخرى. وتم تعديله كما سنناقش في الفصل القادم. وناقش نموذج بور: لأنه كان بداية مهمة؛ ولأننا لا نزال نستخدم مبدأ الحالات الساكنة، والحالة الأرضية، والانتقال بين الحالات. كما أنَّ المصطلحات المستخدمة في نموذج بور لا تزال مستخدمة من قبل الكيميائيين وعلماء التحليل الطيفي.

### المثال 12-27 طول موجة خط لايمان

استخدم (الشكل 27 - 27) لتحديد الطول الموجي لأول خطٍ لللايمان. الانتقال من  $n = 2$  إلى  $n = 1$ . في أي منطقة من الطيف الكهرومغناطيسي يقع هذا الخط؟  
**النَّهَج:** نستخدم (المعادلة 10 - 27)،  $hf = E_u - E_l$ . الطاقات المأخوذة من (الشكل 27 - 27) لإيجاد طاقة الانتقال وطول موجته. يتم تحديد منطقة الطيف الكهرومغناطيسي باستخدام الطيف الكهرومغناطيسي EM في (الشكل 22 - 8).  
**الحل:** في هذه الحالة .

$$hf = E_2 - E_1 = \{-3.4 \text{ eV} - (-13.6 \text{ eV})\} = 10.2 \text{ eV} = (10.2 \text{ eV})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = 1.63 \times 10^{-18} \text{ J}$$

وبما أن  $\lambda = c/f$  فإن

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{E_2 - E_1} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{1.63 \times 10^{-18} \text{ J}} = 1.22 \times 10^{-7} \text{ m}$$

أو 122 nm. وهو في منطقة UV من الطيف EM (الشكل 22 - 8). انظر أيضاً (الشكل 27 - 23).

**ملحوظة:** كنهج آخر يمكن استخدام (المعادلة 27 - 16) لإيجاد  $\lambda$  التي ستعطي النتيجة ذاتها.

### المثال 13-27 طول موجة خط بالمر

حدد طول موجة الضوء المنبعث عندما تقوم ذرة هيدروجين بالانتقال من  $n = 6$  إلى  $n = 2$  حسب نموذج بور.  
**النَّهَج:** نستطيع استخدام (المعادلة 27 - 16) أو (المعادلة 27 - 9) التي تكافؤها. مع  $R = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

**الحل:** نوجد

$$\frac{1}{\lambda} = (1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}) \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{36} \right) = 2.44 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$$

ولذلك  $\lambda = 1/(2.44 \times 10^6 \text{ m}^{-1}) = 4.10 \times 10^{-7}$  أو 410 nm وهذا هو الخط الرابع في سلسلة بالمر (الشكل 27 - 22). ولونه بنفسجي.

## المثال 14-27 طول موجة امتصاص

استخدم (الشكل 27 - 27) لتحديد أعلى طول موجي يستطيع أن يمتصه الهيدروجين وهو في حالته الأرضية. وما ثاني أقصر طول موجي يمكن أن يحقق ذلك؟  
**النَّهَج:** إنَّ أعلى طول موجي يرتبط بأدنى طاقة سيكون بمثابة القفز من الحالة الأرضية إلى أوَّل حالة مهيجة (الشكل 27 - 27). ويحدث أصغر طول موجي تالٍ للقفزة من الحالة الأرضية إلى الحالة المهيجة الثانية. وفي كلِّ وضع، يمكن استخدام فرق الطاقة لإيجاد الطول الموجي.  
**الحلُّ:** الطاقة اللازمة للقفز من الحالة الأرضية إلى أوَّل حالة مهيجة هي:  
 $13.6 \text{ eV} - 3.4 \text{ eV} = 10.2 \text{ eV}$ . الطول الموجي اللازم، كما رأينا في (المثال 27 - 12)،  $122 \text{ nm}$ . أمَّا الطاقة اللازمة للقفز من الحالة الأرضية إلى ثاني حالة مهيجة فهي:  $13.6 \text{ eV} - 1.5 \text{ eV} = 12.1 \text{ eV}$  والتي تعود لطول موجي

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{hf} = \frac{hc}{E_3 - E_1}$$

$$= \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{(12.1 \text{ eV})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} = 103 \text{ nm}$$

## أمثلة إضافية

### المثال 15-27 طاقة التآين

(أ) استخدم نموذج بور لتحديد طاقة تآين أيون  $\text{He}^+$  الذي يمتلك إلكترونًا واحدًا. (ب) احسب أيضًا أعلى طول موجي يمكن لفوتون يسبب تآينًا.  
**النَّهَج:** نريد أن نحدد أقل طاقة لازمة لرفع الإلكترون من حالته الأرضية ليصل إلى الحالة الحرّة عند  $E = 0$ . وتُعطى طاقة الحالة الأرضية لأيون الهيليوم  $\text{He}^+$  وفق (المعادلة 27 - 15) ب مع  $n = 1$  و  $Z = 2$ .  
**الحلُّ:** (أ) بما أنَّ الرموز جميعها في (المعادلة 27 - 15) هي نفسها لذرة الهيدروجين، ماعدا كون  $Z = 2$  بدلًا من 1، فإننا سنرى أنَّ  $E_1$  ستكون  $Z^2 = 2^2 = 4$  أضعاف  $E_1$  للهيدروجين. أي أنَّ  $E_1 = 4(-13.6 \text{ eV}) = -54.4 \text{ eV}$   
 ولذلك، فمن الضروري توافر  $54.4 \text{ eV}$  لكي يتآين  $\text{He}^+$ ، وتتوافق هذه القيمة مع التجربة.  
 (ب) سيكون أكبر طول موجي لفوتون يستطيع أن يسبب تآينًا سيكون له طاقة مقدارها  $hf = 54.4 \text{ eV}$  وطول موجي

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{hf} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{(54.4 \text{ eV})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} = 22.8 \text{ nm}$$

لذا، إذا كانت  $\lambda > 22.8 \text{ nm}$ ، فلن يحدث التآين.  
**ملحوظة:** إذا امتصت الذرة فوتونًا ذا طاقة عالية (طول موجة أقصر من  $22.8 \text{ nm}$ )، فيمكنها أن تتآين وسيبقى للإلكترون المحرّر طاقة حركية خاصة به.

وفي هذا المثال الأخير، رأينا أنَّ  $E_1$  لأيون  $\text{He}^+$  هي سالبة بمقدار أربعة أضعاف أكثر من تلك للهيدروجين. وبالفعل، فإنَّ مخطط مستوى - الطاقة  $\text{He}^+$  يبدو تمامًا مثل ذلك للهيدروجين (الشكل 27 - 27)، غير أنَّ القيم العددية لكلِّ مستوى طاقة أكبر بأربع مرات. ومع هذا، لاحظ أننا نتكلم هنا عن أيون  $\text{He}^+$ ، يمتلك الهيليوم (المتعادل) العادي إلكترونين ومخطط مستوى طاقته مختلف تمامًا.

قدّر متوسط الطاقة الحركية لذرات هيدروجين كاملة (وليس للإلكترونات فقط) عند درجة حرارة الغرفة. واستخدم الناتج لتفسّر سبب أنّ ذرات H جميعها تقريبًا هي في الحالة الأرضية عند درجة حرارة الغرفة. ولا ينبعث عنها أي ضوء.

الإجابة: بناءً على النظرية الحركية (الفصل 13). يُعطى متوسط الطاقة الحركية KE للذرات أو الجزيئات في الغاز وفق (المعادلة 13 - 8)

$$\overline{KE} = \frac{3}{2}kT$$

وتمثل  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  ثابت بولتزمان. و  $T$  هي درجة الحرارة (المطلقة) بالكلفن. ودرجة حرارة الغرفة هي حوالي  $T = 300 \text{ K}$ . ولذلك فإنّ

$$\overline{KE} = \frac{3}{2}(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(300 \text{ K}) = 6.2 \times 10^{-21} \text{ J}$$

أو بدلالة الإلكترون فولت

$$\overline{KE} = \frac{6.2 \times 10^{-21} \text{ J}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} = 0.04 \text{ eV}$$

لذا، فإنّ متوسط KE لذرة كاملة صغير جدًا مقارنة بالطاقة بين مستوى الاستقرار ومستوى الطاقة الأعلى التالي هو ( $13.6 \text{ eV} - 3.4 \text{ eV} = 10.2 \text{ eV}$ ). وأيّ ذرات في حالة التهيج تهبط بسرعة إلى الحالة الأرضية وتبعث ضوءًا. وعندما تكون في الحالة الأرضية، تصبح تصادماتها مع الذرات الأخرى قادرة على نقل  $0.04 \text{ eV}$  من الطاقة فقط بالمتوسط. وأنّ جزءًا صغيرًا من الذرات يمكن أن يمتلك طاقة أكثر من ذلك بكثير (انظر البند 13 - 11 عن توزيع السرعات الجزيئية). ومع هذا، فإنّ KE تعادل 10 أضعاف المتوسط ليست كافية نهائيًا لتهيج الذرات فوق الحالة الأرضية. وبناءً على ذلك، وعند درجة حرارة الغرفة، تكون الذرات جميعها تقريبًا في الحالة الأرضية. ويمكن للذرات أن تثار لمستويات طاقة عالية بواسطة درجات حرارة عالية، أو بتمرير تيار إلكتروني عالي الطاقة خلال الغاز كما في أنبوب التفريغ (الشكل 27 - 20).

## مبدأ الاتفاق

يجب أن نلاحظ أنّ بور وضع بعض الفرضيات الجذرية التي كانت غير متفقة مع الأفكار التقليدية. فافترض أنّ الإلكترونات في الأفلاك الثابتة لا تشع ضوءًا بالرغم من أنها تتسارع (تتحرك دائريًا) وافترض أنّ الزخم الزاوي مكمّي. بالإضافة إلى ذلك، فإنّه لم يكن قادرًا على تفسير كيفية حرك الإلكترون عندما ينتقل من مستوى طاقة إلى آخر. وإضافة إلى ذلك، فليس هناك أيّ سبب حقيقي للتوقع، بأنه في العالم الضئيل للذرة، ستتصرف الإلكترونات كالأجسام عادية - الحجم. وبالرغم من هذا، فقد شعر أنه أينما تقاطع النظرية الكمية مع العالم الجاهري، فيجب عليها أن تتنبأ بالنتائج التقليدية. وهذا هو مبدأ الاتفاق الذي ذكر سابقًا في النسبية (البند 26 - 11). ويحقق هذا المبدأ نظرية بور لذرة الهيدروجين. وطاقات وأحجام الفلكين، ولنقل عندما  $n = 1$  و  $n = 2$  هي مختلفة تمامًا. ولكنها ستكون قريبة جدًا من الفلكين  $n = 100,000,000$  و  $n = 100,000,001$  حجمًا وطاقة (انظر الشكل 27 - 27). وبالفعل، سيكون القفز بين هذه الأفلاك الهائلة، والتي قد تصل إلى الأحجام الجاهرية دقيقًا. لذلك ستبدو هذه الأفلاك وكأنها متصلة، وهذا ما نتوقعه في العالم اليومي. وفي النهاية، يجب أن يؤكد على أنّ الأفلاك المعرفة بدقة لنموذج بور غير موجودة في الحقيقة. ونموذج بور ما هو إلا نموذج فقط، وليس حقيقة. وقد تم رفض فكرة الأفلاك الإلكترونية بعد عدة سنوات لاحقة. وبات ينظر إلى الإلكترونات (الفصل 28) على أنّها تشكل "غيومًا احتمالية".

مبدأ الاتفاق

## 13-27 تطبيق نظرية دي برولي على الذرات

كانت نظرية بور لدرجة كبيرة تخدم هدفًا ما. ووُضعت الفرضيات بحيث تتوافق النظرية مع التجربة العملية. ولكن لم يستطع بور أن يقدم أيّ تبرير عن سبب كون الأفلاك مكمية، أو كون الحالة الأرضية متزنة. وفي النهاية، وبعد عشر سنوات لاحقة، تمّ اقتراح السبب بواسطة لويس دي برولي. ولقد رأينا في (البند 27 - 8) في 1923 اقتراح دي برولي أنّ الجسيمات المادية مثل الإلكترونات: لها طبيعة موجية. وأنّ هذه الفرضية تمّ تأكيدها بالتجربة بعد عدة سنوات. ولقد قدّمت إحدى مجادلات دي برولي الأصلية المنسجمة مع الطبيعة الموجية للإلكترونات تفسيرًا لنموذج بور لذرة الهيدروجين. وطبقًا لدي برولي، فإنّ جسيمًا كتلته  $m$  ويتحرك بسرعة غير نسبية  $v$ ، سيملك طولًا موجيًا (المعادلة 27 - 8)

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

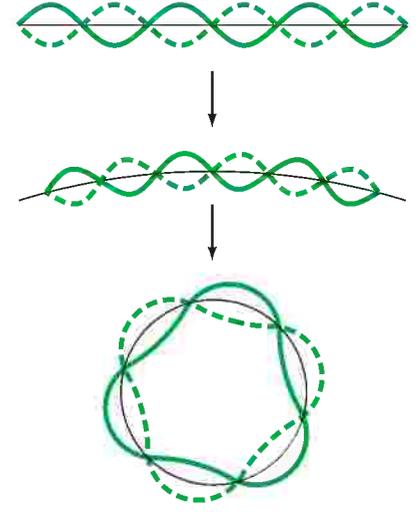
واقترح أنّ كلّ فلكٍ إلكتروني في ذرة ما هو فعليًا موجة عرضية. وكما رأينا في الفصل الحادي عشر، عندما يعزف وتر قيثارة أو كمان، فإنّ عددًا كبيرًا من أطوال الأمواج تنار. ومع هذا، فإنّ أطوال الأمواج تلك التي تمتلك عقدا عند النهايتين فقط هي التي تبقى. وهذه هي أنماط رنين الوتر. أمّا الأمواج ذات أطوال الأمواج الأخرى، فتتداخل مع بعضها بعد انعكاسها لتؤول اتساعاتها بسرعة إلى الصفر. ومع حرك الإلكترونات في دوائر، حسب نظرية بور، جادل دي برولي في أنّ موجة الإلكترون هي موجة دائرية عرضية تغلق على نفسها (الشكل 27 - 28). وإذا لم يغلق الطول الموجي على نفسه، كما في (الشكل 27 - 29)، يحدث تداخل هدام خلال انتقال الموجة في دائرة مغلقة، ولتضمحل الموجة عندئذٍ بسرعة. ولذلك، فإنّ الموجات الوحيدة التي ستبقى هي تلك التي يحتوي عندها محيط الفلك الدائري على عدد صحيح من أطوال الأمواج (الشكل 27 - 30). محيط فلك بور لنصف قطر  $r_n$  هو  $2\pi r_n$ ، وعندها يكون لدينا

$$2\pi r_n = n\lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

وعندما نعوض  $\lambda = h/mv$  نحصل على  $2\pi r_n = nh/mv$  أو

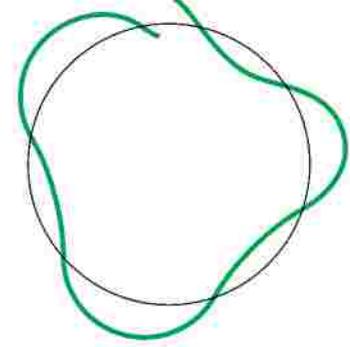
$$mvr_n = \frac{nh}{2\pi}$$

وهذا هو الشرط الكميّ الذي اقترحه بور ليخدم هدفًا ما (المعادلة 27 - 11). ومن هذه المعادلة تمّ اشتقاق الأفلاك المتقطعة ومستويات الطاقة. ولذلك، كان لدينا تفسير أوليّ للأفلاك الكمية وحالات الطاقة في نموذج بور. وهي نتيجة للطبيعة الموجية للإلكترون. فقط

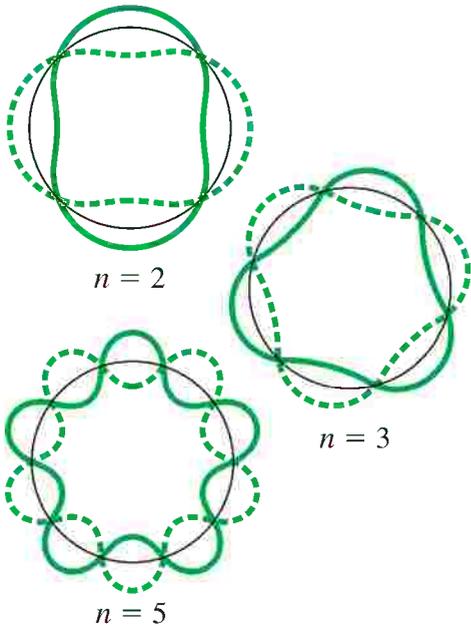


الشكل 27 - 28 موجة عادية عرضية مقارنة مع موجة دائرية عرضية.

الشكل 27 - 29 عندما لا تغلق موجة ما، (وكتيجة لذلك تتداخل تداخلًا هدامًا مع نفسها)، فإنها تضمحل بسرعة.



الأفلاك الكمية هي نتيجة للطبيعة الموجية.



الشكل 27 - 30 أمواج دائرية عرضية لطولين موجيين، وثلاثة، وخمسة أطوال على المحيط. تمثل  $n$  العدد الكمي عند أطوال الأمواج أيضا.

موجات الرنين "العرضية" تستطيع أن تستمر\* وهذا يوحي أنّ الازدواجية الموجية - الجسيمية هي في صميم التركيب الذري.

وحسب رؤيتنا للأمواج الإلكترونية الدائرية في (الشكل 27 - 30)، يجب ألاّ يتمّ التفكير بالإلكترون على أنّه يتبع نمط الموجة المهترزة. ففي نموذج بور للهيدروجين، يتحرك الإلكترون في دائرة. والموجه الدائرية، على الوجه الآخر تمثل اتساع "الموجة المادية" للإلكترون. وفي (الشكل 27 - 30) عُرض اتساع الموجة مركبا على المسار الدائري لفلك الجسم للسهولة.

لقد انطبقت نظرية بور بشكلٍ جيّدٍ على الهيدروجين والأيونات أحادية الإلكترون. ولكنّها لم تثبت نجاحها مع الذرات متعددة الإلكترونات. حيث إنها لم تستطع أن تتنبأ بالأطياف الخطية حتى مع ثاني أبسط ذرة؛ الهيليوم. إضافة إلى أنّها لم تستطع تفسير سبب اللمعان الأكثر لبعض خطوط الانبعاث مقارنة بالخطوط الأخرى. ولا سبب انقسام بعض الخطوط إلى خطين متلاصقين أو أكثر ("التركيب الدقيق"). لذا، كانت هناك حاجة إلى نظرية جديدة. وبالفعل، طوّرت نظرية جديدة في عشرينيّات القرن العشرين (1920s)، ودُعيت هذه النظرية الجديدة والثورية الميكانيكا الكمّية التي حلّت في النهاية مشكلة التركيب الذري. ولكنها أعطتنا نظرة مختلفة كليًا. فتّمّ استبدال فكرة "الغيوم" الإلكترونية بدلا من فكرة الإلكترونات في أفلاك معرفة جيدا. وأعطتنا هذه النظرية الجديدة في الميكانيكا الكمية نظرة جديدة كليًا عن الآليات الأساسية المسؤولة عن العمليات الفيزيائية.

\* وبالرغم من ذلك، نلاحظ أنّ (المعادلة 27 - 11) لم تعد صالحة، كما ستناقش في الفصل القادم.

## ملخص

ويمثل  $p$  زخم الجسم ( $p = mv$ ) لجسم كتلته  $m$  وسرعته  $v$ ).  
يخبرنا مبدأ التّتام أنّنا يجب أن نعي الخصائص الجسيمية والموجية للضوء والمادة لكي نفهمهما تمامًا.

تضم النماذج الأولية للذرة نموذج حلوى الخوخ الهلامية. ونموذج رذرفورد الكواكبي (أو النووي) للذرة الذي يتكون من نواة صغيرة جدًا مشحونة بشحنة موجبة كبيرة محاطة (عند مسافات كبيرة نسبياً) بالإلكترونات.

ولتفسير الأطياف الخطية المنبعثة من الذرات، بالإضافة إلى اتزان الذرات، قدمت نظرية بور مُسلمات هي: (1) تستطيع الإلكترونات المرتبطة بذرة ما أن تحتل فقط أفلاك ذات زخم زاوي محفوظ. والتي ينتج منها قيم متقطعة لنصف القطر والطاقة. (2) الإلكترون الموجود في الحالة الساكنة لا ينبعث عنه أي إشعاعات. (3) إذا قفز إلكترون ما إلى حالة أدنى، سينبعث عنه فوتون طاقته تساوي الفرق في الطاقة بين الحالتين. (4) الزخم الزاوي  $L$  للإلكترونات الذرية مكمى حسب القانون

$$L = \frac{nh}{2\pi} \quad (11 - 27)$$

وتمثل  $n$  عددًا صحيحًا يُدعى العدد الكمّي. والحالة  $n = 1$  هي الحالة الأرضية وطاقته في الهيدروجين  $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ . وترتبط القيم الأعلى لـ  $n$  بالحالات المهيجة وتكون طاقتها

$$E_n = -(13.6 \text{ eV}) \frac{Z^2}{n^2} \quad (15 - 27 \text{ ب})$$

وتهيح الذرات إلى هذه الحالات العليا بالتصادمات مع الذرات أو الإلكترونات الأخرى. أو بوساطة امتصاص فوتون بتردد صحيح تماما.

منح افتراض دي برولي أنّ الإلكترونات (ومواد أخرى) لها طول موجي  $\lambda = h/mv$  تفسيرًا لأفلاك بور المكمية باستحضار ازدواجية

الموجة - الجسيم: ترتبط الأفلاك بأموذج دائرية عرضية بحيث يساوي محيط الفلك عددًا صحيح من أطوال الأمواج.

إنّ أصول النظرية الكمية في فرضية بلانك الكمية هو أنّ الاهتزازات الجزيئية مكمية: طاقتها  $E$  يمكن أن تكون فقط مضاعفات  $hf$  مضروبة في عدد صحيح ( $n$ ). ويمثل  $h$  ثابت بلانك. أمّا  $f$  فهو التردد الطبيعي للاهتزاز:

$$E = nhf \quad (3 - 27)$$

وفسّرت هذه الفرضية الطيف الإشعاعي المنبعث بوساطة جسم أسود عند درجة حرارة مرتفعة.

اقترح أينشتاين لأجل بعض التجارب، إمكانية تخيل الضوء منبعثًا ومنتصًا (كجسيمات) كمة والتي نطلق عليها حاليا الفوتونات و طاقة كلّ منها

$$E = hf \quad (4 - 27)$$

وزخمها

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (6 - 27)$$

واقترح الأثر الكهروضوئي كاختبار لنظرية الفوتون الضوئية. وفي الأثر الكهروضوئي، تقول نظرية الفوتون: إنّ كلّ فوتون ساقط يمكن أن يصطدم بإلكترون في المادة فيخرجه عند امتلاكه لطاقة كافية. ولذلك، فإنّ أعلى طاقة للإلكترونات المخرجة ترتبط خطيًا بتردد الضوء الساقط. ونظرية الفوتون تم دعمها أيضا بوساطة أثر كومبتون وملاحظة إنتاج الثنائي الإلكترون - البوزيترون.

تشير ازدواجية الموجة - الجسيم إلى فكرة أنّ الضوء والمادة (مثل الإلكترون) لهما خصائص موجية وجسيمية ويعطى الطول الموجي لجسم ما كالتالي:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (8 - 27)$$

16. ما الذي يمنع الإلكترونات من الانفلات إلى الفضاء في نموذج رذرفورد الكوكبي للذرة؟
17. كيف يمكنك أن تعرف ما إذا كان هناك أكسجين قرب سطح الشمس؟
18. عندما يمرّ طيف ضوئي عريض خلال غاز هيدروجين عند درجة حرارة الغرفة، يلاحظ خطوط امتصاص تعود لسلسلة لايمان فقط. فلم لا نلاحظ السلاسل الأخرى؟
19. فسّر كيف ترتبط مستويات طاقة الهيدروجين القريبة من بعضها قرب أعلى (الشكل 27 - 27) بالأطياف الخطية القريبة من بعضها عند قمة (الشكل 27 - 22).
20. هل يمكن أن يكون طول موجة دي برولي "الجسيم" ما أكبر من أبعاد الجسيم ذاته؟ أم أصغر؟ هل هناك أي علاقة مباشرة؟
21. لذرة هيليوم تحتوي على إلكترونين، هل تعتقد بالمتوسط أنّ الإلكترونين أقرب للنواة بالمقارنة مع نواة ذرة هيدروجين؟ ولماذا؟
22. كيف يمكن لطيف الهيدروجين أن يحتوي على خطوط كثيرة في حين يحتوي الهيدروجين على إلكترون واحد فقط؟
23. تُعدّ سلسلة لايمان منيرة أكثر من سلسلة بالمر؛ لأنّ هذه السلسلة من الانتقالات تنتهي عند أكثر حالة عامة للهيدروجين. الحالة الأرضية. لماذا تمّ إذن اكتشاف سلسلة بالمر أولاً؟
24. استخدم مبدأ حفظ الزخم لتفسّر سبب امتلاك الفوتونات المنبعثة من الهيدروجين طاقة أقلّ بقليل من تلك التي تنبأت بها (المعادلة 27 - 10).
25. دالتا الشغل للصوديوم والسييزيوم هما  $2.28 \text{ eV}$  و  $2.14 \text{ eV}$ . على الترتيب. لفوتونات ساقطة ذات تردد محدد، ما هو الفلز الذي سيمنح طاقة حركية أعلى للإلكترونات؟
26. (أ) هل سيمتلك شعاع من الفوتونات تحت الحمراء دائماً طاقة أقلّ من شعاع من الفوتونات فوق البنفسجية؟ فسّر. (ب) هل سيمتلك فوتون تحت أحمر وحيد دائماً طاقة أقلّ من فوتون فوق بنفسجي وحيد؟
27. إذا اصطدم ضوء طوله الموجي  $450 \text{ nm}$  بسطح فلزي، فسيخرج شلال إلكترونات من الفلز. ولكن، إذا اصطدم ضوء له الشدة نفسها، و طوله الموجي  $400 \text{ nm}$  بالسطح، فهل ستنبعث إلكترونات أكثر؟ هل ستتغير طاقة الإلكترونات المنبعثة؟ فسّر.
28. لنفترض أننا حصلنا على طيف انبعاث للهيدروجين عند درجة حرارة عالية جداً (عندما تكون بعض الذرات في الحالات المهيجة). وطيف امتصاص عند درجة حرارة الغرفة. (عندما تكون الذرات جميعها في الحالة الأرضية). هل سيحتوي الطيفان على خطوط متماثلة؟
1. ماذا يمكن أن يُقال عن الحرارة النسبية للنجوم البيضاء - المصفرة والحمراء والزرقاء؟ فسّر.
2. إذا أشعت الأجسام جميعها طاقة، فلم لا نستطيع أن نراها في الظلام؟ (انظر أيضاً البند 14 - 8).
3. هل ينتج مصباح ضوئي درجة حرارته  $2500 \text{ K}$  ضوءاً أبيض كالذي تنتجه الشمس عند  $6000 \text{ K}$ ؟ فسّر.
4. تتمّ إنارة الغرف المعتمة المستخدمة لتطوير الأفلام البيضاء - والسوداء في بعض الأحيان بمصباح أحمر. لم يستخدم هذا اللون بالتحديد؟ وهل يمكن استخدام هذا الضوء في غرفة معتمة لتطوير صور ملونة؟
5. إذا إزداد طول موجة العتبة في الأثر الكهروضوئي عند تغيير الفلز الباعث بفلز آخر، فماذا تقول عن دالتي الشغل للفلزين؟
6. فسّر السبب في دعم وجود تردد القطع في الأثر الكهروضوئي النظرية الجسيمية للضوء بدلاً من النظرية الموجية؟
7. يتسبّب الضوء فوق البنفسجي UV باحمرار الجلد، ولا يسبّب ذلك الضوء المرئي. اذكر سببا واحدا لهذا.
8. إذا استطار فوتون أشعة إكس بوساطة إلكترون، فهل سيتغير طول موجته؟ وإذا كانت الإجابة نعم، فهل الاستطارة بالازدياد أم بالنقصان؟
9. في كلّ من الأثرين، الكهروضوئي وكومبتون، يصطدم فوتون مع إلكترون مسببا هروب الإلكترون. إذن، ما الفرق بين العمليتين؟
10. افترض مصدرا نقطياً ضوئياً. كيف يمكن لشدة الضوء أن تتغير مع البعد عن المصدر حسب: (أ) النظرية الموجية؟ (ب) نظرية (الفوتون) الجسيم؟ هل يساعد هذا على التمييز بين النظريتين؟
11. فسّر كيف يمكن استخدام الدارة الكهروضوئية في (الشكل 27-6) في (أ) جهاز إنذار سرقة. (ب) كاشف الدخان. (ج) جهاز قياس الصور الضوئي.
12. لماذا نقول إنّ للضوء خصائص موجية؟ ولم نقول إنّ له خصائص جسيمية أيضاً؟
13. لماذا نقول إنّ للإلكترونات خصائص موجية؟ ولم نقول إنّ لها خصائص جسيمية أيضاً؟
14. ما الفرق بين الفوتون والإلكترون؟ حدّد إيجابتك: اعمل قائمة.
15. إذا تحرك إلكترون وبروتون بالسرعة نفسها، فأيهما سيمتلك أقصر طول موجي؟ فسّر.

## مسائل

- 27 - 2 فرضية بلانك الكمية
4. (I) ما درجة الحرارة التي لحم عندها فلز ما إذا كان أشدّ اشعاع له عند  $440 \text{ nm}$ ؟
5. (I) قدر قمة الطول الموجي للإشعاع من: (أ) ثلج عند  $0^\circ \text{C}$ . (ب) مصباح ضوئي عند  $3500 \text{ K}$ . (ج) هيليوم عند  $4 \text{ K}$ . (د) الكون عند درجة حرارة  $T = 2.725 \text{ K}$ . مفترضاً انبعاث جسم أسود. في أيّ منطقة من الطيف EM كلّ منهم؟
6. (I) (أ) ما درجة الحرارة إذا كانت قمة الطيف لجسم أسود هي  $18.0 \text{ nm}$ ؟ (ب) ما الطول الموجي عند قمة طيف جسم أسود إذا كانت درجة حرارة الجسم عند  $2000 \text{ K}$ ؟

## 27 - 1 اكتشاف الإلكترون

1. (I) ما قيمة  $e/m$  لجسيم يتحرك في دائرة نصف قطرها  $7.0 \text{ mm}$  داخل مجال مغناطيسي قيمته  $0.86 \text{ T}$  إذا جعل مجال كهربائي عمودي شدته  $320 \text{ V/m}$  المسار مستقيماً؟
2. (II) (أ) ما سرعة شعاع من الإلكترونات يسير دون انحراف عند مروره خلال مجالين متداخلين (متعامدين) كهربائي ومغناطيسي قيمتهما  $1.88 \times 10^4 \text{ V/m}$  و  $2.90 \times 10^{-3} \text{ T}$ . على الترتيب؟ (ب) ما نصف قطر فلك الإلكترون إذا ألغى المجال الكهربائي؟
3. (II) تمّ تحديد كتلة قطرة زيت فوجدت  $2.8 \times 10^{-15} \text{ kg}$  إذا حجزت ساكنة بين لوحين كبيرين تفصلهما مسافة  $1.0 \text{ cm}$  وفرق الجهد بينهما  $340 \text{ V}$ . فكم عدد الإلكترونات الزائدة التي تمتلكها هذه القطرة؟

7. (I) يهتز جزيء HCl بتردد طبيعي  $8.1 \times 10^{13}$  Hz. ما الفرق في الطاقة (بالجول والإلكترون فولت) بين القيم الممكنة لطاقة التذبذب؟  
 8. (II) ارتفاع الدرجات في سلم كبير هو 20.0 cm (رأسياً). إذا وقف شخص كتلته 68.0-kg وقدماه على الدرجة نفسها. فما طاقة الجاذبية المختزنة لهذا الشخص بالنسبة إلى الأرض عند: (أ) الدرجة الأولى؟ (ب) الدرجة الثانية؟ (ج) الدرجة الثالثة؟ (د) الدرجة  $n^{\text{th}}$ ؟ (هـ) ما التغير في الطاقة الناجمة عن نزول الشخص من الدرجة السادسة إلى الثانية؟  
 9. (II) قدر أعلى طول موجي للضوء الناجم من بؤبؤ عين بشرية (تمثل جسمًا أسود) مفترضًا درجة حرارة الجسم الطبيعية.

### 27 - 3 و 27 - 4 الفوتونات و الأثر الكهروضوئي

10. (I) ما طاقة الفوتونات (بالجول) المنبعثة من محطة مذياع FM ترددها 88.5-MHz FM  
 11. (I) ما مدى الطاقة (بالجول و eV) للفوتونات في الطيف المرئي للطولين الموجيين 400 nm و 750 nm؟  
 12. (I) يمكن لأشعة جاما العادية المنبعثة من نواة ما خلال اضمحلال إشعاعي نشط أن تمتلك طاقة 300 keV. ما طول موجتها؟ هل يمكن أن نتوقع حيودًا كبيرًا لهذا النوع من الضوء نتيجة مروره خلال فتحة عادية كفتحة باب؟  
 13. (I) هناك حاجة إلى حوالي 0.1 eV لكسر "رابطة هيدروجينية" ما في جزيء بروتين. احسب أقل تردد وأطول موجة لفوتون ما يستطيع أن يقوم بذلك.  
 14. (I) احسب زخم فوتون ضوء أصفر طول موجته  $6.00 \times 10^{-7}$  m.  
 15. (I) ما زخم فوتون أشعة إكس طول موجته  $\lambda = 0.010$  nm؟  
 16. (II) يمكن لعين الإنسان أن تتجاوب مع قدر ضئيل جدًا من الطاقة الضوئية تصل إلى  $10^{-18}$  J. كم عدد الفوتونات التي تؤدي إلى ملاحظة لمحة عند طول موجي 550 nm قرب قمة المنطقة المرئية الحساسة؟  
 17. (II) ما أقل تردد ضوء لازم لقتل إلكترونات من فلز شغل دالته  $4.3 \times 10^{-19}$  J  
 18. (II) ما أطول موجة - ضوء تعمل على انبعاث إلكترونات من فلز شغل دالته 3.10 eV؟  
 19. (II) دوال الشغل لكل من الصوديوم، والسييزيوم، والنحاس، والحديد هي: 2.3، و 2.1، و 4.7، و 4.5 eV على الترتيب. أي من هذه الفلزات لن ينبعث منه إلكترونات عندما يُسلط الضوء المرئي عليه؟  
 20. (II) في تجربة الأثر الكهروضوئي، تم ملاحظة عدم انسياب أي تيار إلا إذا كان الطول الموجي أقل من 570 nm. (أ) ما شغل دالة هذه المادة؟ (ب) ما جهد الإيقاف اللازم استخدامه لضوء طول موجي 400 nm؟  
 21. (II) ما أكبر طاقة حركية للإلكترونات المقذوفة من الباريوم ( $W_0 = 2.48$  eV) عند إضاءته بضوء أبيض  $\lambda = 400$  nm إلى 750 nm؟  
 22. (II) يمتلك الباريوم شغل دالة مقداره 2.48 eV. ما أكبر طاقة حركية للإلكترونات الناتجة من تسليط ضوء فوق بنفسجي على فلز طول موجي 365 nm؟ ما سرعة الإلكترونات؟  
 23. (II) عندما يقع ضوء فوق بنفسجي طول موجي 285 nm على سطح فلز، فإن الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنبعثة هي 1.40 eV. ما شغل الدالة لهذا الفلز؟  
 24. (II) طول موجة العتبة لانبعث الإلكترونات من سطح ما هو 350 nm. ما أكبر طاقة حركية للإلكترونات المقذوفة عندما يتغير الطول الموجي إلى (أ) 280 nm؟ (ب) 360 nm؟

25. (II) نوع معين من الأغشية حساس فقط لضوء طول موجته أقل من 660 nm. ما الطاقة (eV و kcal/mol) اللازمة لحدوث التفاعل الكيميائي الذي يسبب تغير الغشاء؟  
 26. (II) عند سقوط ضوء طول موجي 230-nm على فلز، فإن التيار المار خلال الدارة الكهروضوئية (الشكل 27 - 6) جُعل صفرًا عند جهد إيقاف 1.64 V. فما شغل دالة هذا الفلز؟  
 27. (II) في تجربة كهروضوئية باستخدام سطح صوديوم نظيف، تم قياس أعلى طاقة للفوتونات المنبعثة لعدد من الترددات الساقطة المختلفة. وكانت النتائج كما يلي:

التردد ( $10^{14}$ Hz)	الطاقة (eV)
11.8	2.60
10.6	2.11
9.9	1.81
9.1	1.47
8.2	1.10
6.9	0.57

- ارسم مخططًا لهذه النتائج. وأوجد: (أ) ثابت بلانك. (ب) تردد القطع للصوديوم. (د) شغل الدالة.  
 28. (II) أثبت أن الطاقة  $E$  (بالإلكترون فولت) لفوتون طول موجي  $\lambda$  (nm) تعطى كالتالي:

$$E = \frac{1.240 \times 10^3 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda \text{ (nm)}}$$

### \*27-5 أثر كمبتون

- 29\* (II) الكمية  $h/m_0c$ . لها أبعاد طول تدعى طول موجة كومبتون. حدد طول موجة كومبتون لكل من: (أ) إلكترون. (ب) بروتون. وأثبت أنه إذا امتلك فوتون طولًا موجيًا مساويًا لطول موجة كومبتون لجسم ما، فإن طاقة الفوتون تساوي الطاقة السكونية للجسم.  
 30\* (II) استطارت أشعة إكس طول موجتها  $\lambda = 0.120$  nm من كربون. فما الانزياح في طول موجة كومبتون لفوتونات قيست (بالنسبة إلى الشعاع الساقط) عند الزوايا: (أ)  $45^\circ$ ؛ (ب)  $90^\circ$ ؛ (ج)  $180^\circ$ ؟  
 31\* (III) في تأثير كومبتون، فوتون يصطدم بإلكترون حر في تصادم مباشر ويطرده إلى الأمام. ويعود الفوتون المرتد مباشرة نحو الخلف. استخدم حفظ الطاقة (النسبية) والزخم لتحديد: (أ) طاقة الإلكترون الحركية. (ب) طول موجة الفوتون المرتد. (ملحوظة: استخدم المعادلة 27 - 6، وليس المعادلة 27 - 7).

### 27 - 6 إنتاج الثنائيات

32. (I) ما مقدار الطاقة الحركية الكلية التي سيمتلکها ثنائي إلكترون-بوزيترون إذا انتجتهما 3.84-MeV فوتون؟  
 33. (II) ما أطول طول موجة فوتون قادر على إنتاج ثنائي بروتون - مضاد بروتون؟ (كتلة كل منهما  $1.67 \times 10^{-27}$  kg).  
 34. (II) ما أقل طاقة فوتون لازمة لإنتاج ثنائي  $\mu^+ - \mu^-$ ؟ كتلة كل  $\mu$  (ميون) هي 207 أضعاف كتلة الإلكترون. كم يبلغ الطول الموجي لفوتون من هذا النوع؟  
 35. (II) يتحرك كل من إلكترون وبوزيترون بسرعة  $1.0 \times 10^5$  m/s تصادمًا مباشرًا، فاخفيا وتولّد فوتونان بدلًا منهما. لكل منهما الطاقة نفسها والزخم ذاته، ويتحركان في اتجاهين متعاكسين. كم تبلغ طاقة كل فوتون وزخمه؟

51. (I) احسب طاقة التأيّن لليثيوم ثنائي التأيّن.  $Li^{2+}$ . إذا كانت  $Z = 3$ .
52. (I) (أ) حدّد الطول الموجي لخط بالمر الثاني (الانتقال من  $n = 4$  إلى  $n = 2$ ) باستخدام (الشكل 27 - 27). حدّد بالمثل كلاً من: (ب) الطول الموجي لخط لايمان الثاني. (ج) الطول الموجي لخط بالمر الثالث.
53. (I) قيّم ثابت رديبيرغ  $R$  باستخدام نظرية بور (قارن المعادلتين 27 - 9 و 27 - 16) وأثبت أنّ قيمته هي  $R = 1.0974 \times 10^7 m^{-1}$ .
54. (II) ما أطول طول موجي لضوء قادر على تأيّن ذرة هيدروجين في الحالة الأرضية؟
55. (II) ما الطول الموجي اللازم لفوتون لتأيّن هيدروجين في الحالة الأرضية وإعطاء الإلكترون المذبذب طاقة حركية مقدارها  $10.0 eV$ ؟
56. (II) داخل الشمس، تقوم ذرة هيليوم مؤينة ( $He^+$ ) بالانتقال من الحالة  $n = 6$  إلى الحالة  $n = 2$ . باعثة فوتوناً. هل يمكن لهذا الفوتون أن يمتص بوساطة ذرات الهيدروجين الموجودة في الشمس؟ وإذا أمكن ذلك، فما مستويات الطاقة التي ستقفز ذرة الهيدروجين بينها؟
57. (II) شكّل مخطط مستوى - طاقة لأيون  $He^+$  (انظر الشكل 27 - 27).
58. (II) شكّل مخطط مستوى - طاقة لليثيوم ثنائي التأيّن.  $Li^{2+}$ .
59. (II) ما الطاقتان المحتزنة والحركية للإلكترون في الحالة الأرضية لذرة الهيدروجين؟
60. (II) مبدئياً، يمكن لغيمة ذرة هيدروجين مثارة أن تمتلك نصف قطر  $1.00 mm$ . ما قيمة  $n$  المحتملة لفلك بور بهذا الحجم؟ ما طاقته المحتملة؟
61. (II) هل تم تبرير استخدام الصيغ غير النسبوية في ذرة بور؟ للتحقق، احسب سرعة الإلكترون  $v$  بدلالة  $c$  للحالة الأرضية للهيدروجين، ثم احسب  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ .
62. (III) لنفترض أنّ إلكترونًا كان مرتبطًا ببروتون، كما في ذرة الهيدروجين، ولكن بوساطة قوة الجذب بدلا من القوة الكهربائية. فما مقدار نصف القطر و الطاقة عند ذلك للفلك الأول لبور؟

## 27 - 13 فرضية دي برولي مطبقة على الذرات

63. (III) افرض أنّ جسما كتلته  $m$  محتجزا في بعد واحد في صندوق عرضه  $L$ . وحسب النظرية الكمية، فإنّ موجة الجسم (مع  $\lambda = h/mv$ ) هي موجة عرضية مع عقدتين عند طرفي الصندوق. (أ) أظهر أنظمة الاهتزاز على مخطط. (ب) أثبت أنّ طاقة الجسم الحركية مكمية وتعطى كالتالي:
64. (ج) احسب طاقة الحالة الأرضية ( $n = 1$ ) للإلكترون محجوز في صندوق عرضه  $0.50 \times 10^{-10} m$ . (د) ما طاقة الحالة الأرضية وسرعة كرة ببسبول ( $m = 140 g$ ) في صندوق عرضه  $0.50 m$ . (هـ) يمتلك إلكترون محجوز في صندوق طاقة حالة استقرار قدرها  $22 eV$ . ما عرض الصندوق؟

36. (II) أنتج فوتون أشعة جاما ثنائيا (إلكترون- بوزيترون). يمتلك كلّ منهما طاقة حركية مقدارها  $245 keV$ . كم كانت طاقة موجة الفوتون وطولها؟

## 27 - 8 الطبيعة الموجية للمادة

37. (I) احسب الطول الموجي لكرة  $0.23\text{-kg}$  تنتقل بسرعة  $0.10 m/s$ .
38. (I) حدّد الطول الموجي لنيترون ( $m = 1.67 \times 10^{-27} kg$ ) ينتقل بسرعة  $6.5 \times 10^4 m/s$ ؟
39. (I) ما فرق الجهد بالفولت اللازم لتسارع الإلكترون خلاله للوصول إلى طول موجي  $0.24 nm$ ؟
40. (II) احسب نسبة طاقة الإلكترون الحركية إلى طاقة البروتون الحركية عند تساوي طول موجيهما؟
41. (II) طول موجة دي برولي للإلكترون ما هي  $\lambda = 5.0 \times 10^{-10} m$ . (أ) ما مقدار زخمه؟ (ب) ما سرعته؟ (ج) كم تبلغ الفولتية اللازمة لتسريعه إلى هذه السرعة؟
42. (II) ما طول موجة إلكترون طاقته: (أ)  $10 eV$ ؟ (ب)  $100 eV$ ؟ (ج)  $1.0 keV$ ؟
43. (II) أثبت أنّه إذا امتلك إلكترون وبروتون الطاقة الحركية غير النسبوية نفسها، فإنّ البروتون سيمتلك الطول الموجي الأقصر.
44. (II) احسب طول موجة دي برولي للإلكترون في أنبوب صور تلفازك إذا تم تسريعه بوساطة  $30,000 V$ . هل هي نسبوية؟ كيف يمكن مقارنة طول موجته مع حجم "عق" الأنبوب.  $5 cm$  تقريبا؟ هل يجب أن نقلق بشأن مشكلات حيود تجعل الصور غير واضحة على الشاشة؟
45. (III) كتلة سيارة فيراري  $1400 kg$ . تقترب من جسر طريق حرّ عرضه  $10 m$ . ما السرعة اللازمة للسيارة أن تسير بها كي تمتلك طولاً موجياً بحيث، ربما بطريقة ما "تجيد" بعد مرورها من هذا "الشقّ الأحادي"؟ كيف يمكن مقارنة هذه الظروف مع السرعات العادية على الطريق الحرّ.  $30 m/s$

## \* 27 - 9 المجهر الإلكتروني

46. (II) ما الجهد الضروري لانتاج طول موجي للإلكترون مقدارها  $0.20 nm$ ؟ (افرض أنّ الإلكترونات غير نسبوية).
47. (II) إذا سُرعت إلكترونات بوساطة  $2450 V$  في مجهر إلكتروني، فما هو أعلى تحليل يمكن؟

## 27 - 12 نموذج بور

48. (I) لأجل الانتقالات الهيدروجينية الثلاثة المشار إليها في الأسفل، وتمثل  $n$  الحالة الابتدائية، و  $n'$  الحالة النهائية، فهل يعدّ الانتقال امتصاصا أم انبعاثا؟ أيهما أعلى. طاقة الحالة الابتدائية أم طاقة الحالة النهائية للذرة؟ وأخيرا، أي من هذه الانتقالات يتعلق بأكبر طاقة فوتون؟ (أ)  $n = 1$  و  $n' = 3$ . (ب)  $n = 6$  و  $n' = 2$ . (ج)  $n = 4$  و  $n' = 5$ .
49. (I) ما مقدار الطاقة اللازم لتأيّن ذرة هيدروجين في الحالة  $n = 2$ ؟
50. (I) مع أيّ انتقال يتفق ثالث أطول طول موجي في سلسلة باشن في الهيدروجين (الشكل 27 - 27)؟

## مسائل عامة

66. استنطار شعاع من الإلكترونات  $85\text{-eV}$  من بلورة. كما في حيود أشعة إكس، ولوحظت قمة الترتيب -الأول عند  $\theta = 38^\circ$ . ما مقدار المسافة بين السطوح في بلورة الجيود؟ (انظر البند 25 - 11).
67. يستطيع فرن مايكروويف أن ينتج إشعاعاً كهرومغناطيسياً عند  $\lambda = 12.2 cm$  وينتج قدرة مقدارها  $760 W$ . احسب عدد فوتونات المايكروويف المنتجة بوساطة فرن المايكروويف لكل ثانية.

64. تنصّ نظرية الانفجار الكبير على أنّ بداية الكون صاحبها ازدياد هائل في الفوتونات. ولا تزال هذه الفوتونات موجودة إلى يومنا هذا. وتشكل ما يُدعى إشعاعات مايكروويف الخلفية الكونية. ويشع الكون مثل جسم أسود درجة حرارته  $2.7 K$ . احسب طول موجة قمة هذه الإشعاعات.
65. عند درجات الحرارة المنخفضة، ستكون الذرات في غاز الهيدروجين جميعها في الحالة الأرضية تقريبا. ما هو الفوتون صاحب أقل تردد اللازم لملاحظة الأثر الكهروضوئي؟

79. تبلغ شدة ضوء الشمس بالقرب من الأرض حوالي  $1000 \text{ W/m}^2$ . تحيل سفينة فضاء مع شراع مربع عاكس للضوء بطول  $1.0 \text{ km}$ . قدر مقدار الدفع (باليوتن) الذي ستشعر به هذه السفينة الناتج من التصادمات مع الفوتونات الشمسية. [مساعدة: افرض أنّ الفوتونات ترتد عن الشراع دون تغيير في قيمة زخمها].
80. ضوء طوله الموجي  $300 \text{ nm}$ . يصطدم بفلز شغل دالته  $2.2 \text{ eV}$ . ما أقصر طول موجة لدي برولي للإلكترونات المنتجة كإلكترونات ضوئية؟
81. تسقط فوتونات طاقتها  $6.0 \text{ eV}$  على فلز. فيبدأ تياراً بالانسياب من الفلز إلى أن يُطبّق جهد إيقاف قدره  $4.0 \text{ V}$ . إذا ضوعف الطول الموجي للفوتونات الساقطة، فما أعلى طاقة حركية للإلكترونات المذفوفة؟ وماذا سيحدث عند مضاعفة الطول الموجي للفوتونات الساقطة ثلاث مرات؟
82. ضوء مرئي ساقط على محرزة حيود فتحة شقها  $0.010 \text{ mm}$ . أوّل أعلى قمة تسببها المحرزة تصنع زاوية  $3.5^\circ$  مع القمة الوسطى. إذا أمكن حثيد الإلكترونات بوساطة المحرزة نفسها، فكم ستكون سرعة الإلكترون التي ستنتج نمط الحيود نفسه الذي ينتجه الضوء المرئي؟
83. (أ) افرض أنّ لعنصر مجهول طيف امتصاص بخطوط عند  $2.5$  و  $4.7$  و  $5.1 \text{ eV}$  فوق الحالة الأرضية. وطاقة تأيين مقدارها  $11.5 \text{ eV}$ . ارسم مخطط مستوى طاقة لهذا العنصر. (ب) إذا امتص  $5.1 \text{ eV}$  فوتون بوساطة ذرة من هذه المادة، ففي أيّ حالة كانت الذرة قبل امتصاص الفوتون؟ وما هي طاقات الفوتونات التي يمكن انبعاثها لاحقاً من هذه الذرة؟
84. ضوء طوله الموجي  $424 \text{ nm}$  يسقط على فلز شغل دالته  $2.28 \text{ eV}$ . (أ) ما مقدار الفولتية اللازم تطبيقها لأخذ التيار إلى الصفر؟ (ب) ما مقدار أعلى سرعة للإلكترونات المنبعثة؟ (ج) ما طول موجة دي برولي لهذه الإلكترونات؟
85. حقن إلكترون تم تسريعه من السكون بوساطة فرق جهد مقدار  $96 \text{ V}$  إلى داخل مجال مغناطيسي قيمته  $3.67 \times 10^{-4} \text{ T}$  لينتقل في دائرة قطرها  $18 \text{ cm}$ . احسب  $e/m$  من هذه المعلومات.
86. قدر عدد الفوتونات المنبعثة من الشمس خلال عام كامل. (خذ متوسط الطول الموجي ليكون  $550 \text{ nm}$  وشدة ضوء الشمس الواصلة إلى الأرض (الجو الخارجي) لتكون  $1350 \text{ W/m}^2$ ).
87. طبق فرضيات بور على نظام الأرض - القمر لتحسب الطاقات المسموحة وأنصاف أقطار الحركة. آخذاً بالحسبان المسافة المعروفة بين الشمس والقمر. هل تكمية الطاقة ونصف القطر ظاهران؟

68. تعادل شدة ضوء الشمس الذي يصل سطح الأرض حوالي  $1000 \text{ W/m}^2$ . قدر عدد الفوتونات في هذه الحالة لكل متر مربع لكل ثانية. خذ متوسط الطول الموجي على أنه  $550 \text{ nm}$ .
69. شعاع ضوء ليزر أحمر ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ) يصدم حائطا أسود ويمتص بالكامل. إذا أثر هذا الضوء بقوة كلية  $F = 5.5 \text{ nN}$  في الحائط، فكم عدد الفوتونات التي تصطدم بالحائط لكل ثانية؟
70. مصباح ضوئي قدرته  $100 \text{ W}$  يبعث  $3.0\%$  من الطاقة المدخلة كضوء مرئي (متوسط الطول الموجي  $550 \text{ nm}$ ) بانتظام في الاتجاهات جميعها. قدر عدد الفوتونات لكل ثانية من الضوء المرئي التي ستصطدم ببؤبؤ عين مراقب (قطره  $4.0 \text{ mm}$ ) يقف على بعد  $1.0 \text{ km}$ .
71. يصطدم إلكترون وبوزيترون تصادمًا مباشرًا. فيلغي كلٌّ منهما الآخر، ويتشكل فوتونان (طاقة كلٍّ منهما  $0.90 \text{ MeV}$ ) ينتقلان في اتجاهين متعاكسين. كم كانت الطاقة الحركية لكلٍّ من الإلكترون والبوزيترون؟
72. ما فرق الجهد اللازم لتسريع (أ) بروتون ( $m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ) (ب) إلكترون ( $m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ) لكي يمتلكا طولًا موجيًا  $\lambda = 5.0 \times 10^{-12} \text{ m}$ ؟
73. في بعض تجارب رذرفورد (الشكل 27 - 18)، امتلكت جسيمات  $\alpha$  ( $m = 6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ) طاقة حركية مقدارها  $4.8 \text{ MeV}$ . ما أقرب مسافة تستطيع أن تصلها من نواة الذهب (الشحنة  $+79e$ )؟ أهمل الحركة الارتدادية للنواة.
74. ما نسبة النقص في كتلة ذرة H عندما تنتقل من  $n = 3$  إلى  $n = 1$ ؟
75. احسب النسبة بين قوتي الجاذبية والكهربائية للإلكترون في ذرة هيدروجين. هل يمكن إهمال قوة الجاذبية بأمان؟
76. مرّت إلكترونات سُرعّت بوساطة فرق جهد  $12.3 \text{ V}$  من خلال غاز يتكون من ذرات الهيدروجين عند درجة حرارة الغرفة. ما أطوال أمواج الضوء المنبعث نتيجة ذلك؟
77. في تجربة كهروضوئية معينة، تمّ قياس جهد إيقاف مقداره  $2.10 \text{ V}$  فولت عند سقوط ضوء فوق بنفسجي طوله الموجي  $290 \text{ nm}$  على الفلز. باستخدام الجهاز نفسه، ما قيمة جهد الأيقاف الجديد الذي سينتج إذا استخدم ضوء أزرق طوله الموجي  $440 \text{ nm}$  بدلا من فوق البنفسجي؟
78. في أنبوب أشعة إكس (انظر الشكل 25 - 35) والنقاش في البند (25 - 11)، فرق الجهد العالي بين الفتيبة والهدف هو  $V$ . وبعد تسريع الإلكترون خلال هذه الفولتية، يصطدم بالهدف فيتباطأ (بوساطة الأنوية موجبة الشحنة) وينبعث فوتون أو أكثر من فوتونات أشعة إكس خلال العملية. (أ) أثبت أنّ الفوتون ذو أقصر طول موجي سيتملك
- $$\lambda_0 = \frac{hc}{eV}$$
- (ب) ما أقصر طول موجي لأشعة إكس المنبعثة والناجئة من اصطدام الإلكترونات المسرعة بوجه أنبوب صور تلفاز جهده  $30 \text{ kV}$ ؟

## إجابة التمارين

د : فقط.

هـ : تقل.

أ :  $\lambda_p = 725 \text{ nm}$ ، لذلك أحمر.

ب : أكثر  $1000 \text{ nm}$  فوتونات (تردد أقل).

ج :  $5.50 \times 10^{14} \text{ Hz}$  و  $545 \text{ nm}$ .