الفصل الثاني

الإشعاع الكهرومغناطيسي

The Electromagnetic Radiation

٢-١: طبيعة الضوء والاشعاع الكهرومغناطيسي

2-1: The Nature of Light and Electromagnetic Radiation

كانت طبيعة شعاع الضوء مثار جدل بين علماء الفيزياء، فقد اعتقد نيوتن أن الضوء عبارة عن كُرَيّات جسيمية corpuscles، بينما اعتقد هويگنز Huygens أن الضوء ذو طبيعة موجية wave nature، وكان لكل من هاتين الفكرتين مؤيدوها. وفي عام 1803 وبعده قدّم يونگ Young وفرينل Fresnel وأراگو Arago في تجاربهم براهين توضح أن الأشعة الضوئية تتعرض للحيود وتتداخل بعضها مع البعض الآخر مثل الموجات الصوتية. وكان يُعتقد وفق النظرية الجسيمية أن سرعة الضوء في وسط كثيف تكون أكبر، بينما يُعتقد وفق النظرية الموجية أنه يسير أبطأ، إلى أن جاء منتصف القرن التاسع عشر حيث أثبت كل من فوكو Foucault وفيزو Fizeau تجريبياً أن سرعة الضوء في وسط كثيف (كالماء) كانت أبطأ مما في الفراغ، وهذا عزّز النظرية الموجية التي أصبحت النظرية الوحيدة التي استطاعت بنجاح شرح كل الظواهر البصرية optical phenomena المعروفة آنذاك للضوء. ورغم أن النظرية الموجية للضوء قد تم تعريفها حينئذ لكن طبيعة الموجات بقيت لغزاً. وقد اعتُقد أولاً أن هذه الموجات كانت مشابهة للموجات المستعرضة في الوسط الصلب المرن، حيث اعتُبر أن الأثير يمتلك بعض صفات الوسط الصلب المرن، وكان يُعتقد أن الأثير هو الوسط تام المرونة الذي ينتقل الضوء خلاله ويملأ الكون. كما إن ماكسويل قد بين في عمله حول الكهربائية والمغناطيسية عام 1864 أنه يجب أن ينتشر اضطراب يحوي مجالات مستعرضة كهربائية ومغناطيسية خلال الأثير بسرعة الضوء، وهذا زوّد النظرية الموجية بالأساس الرياضي الدقيق. ثم استطاع هيرتز Hertz عام 1887 توليد موجات كهرومغناطيسية بواسطة تيار متذبذب مما أثبت صحة نظرية ماكسويل.

وربما ظن البعض أنه بحلول عام 1900 أصبحت طبيعة الضوء مفهومة بشكل كبير، ولكن قد برزت صعوبات جدّية مع خصائص الأثير الذي افتُرض أن الموجات تنتشر خلاله. وقد حلّت النظرية النسبية

الخاصة لآينشتاين عام 1905 هذه الصعوبات بتبيان أن الأثير ليس ضرورياً لانتشار الموجات الكهرومغناطيسية. وبالرغم من نجاح النظرية الكهرومغناطيسية فقد بقيت عدة ظواهر لا يمكن تفسيرها بهذه النظرية، ومن بينها الانبعاث والامتصاص في الأطياف الذرية، والإشعاع الحراري أو إشعاع الجسم الأسود، والظاهرة الكهروضوئية. وقد أدّى تفسير هذه الظواهر إلى تطوير النظرية الكمية للإشعاع، والتي تُعتبر من أهم إنجازات فيزياء القرن العشرين فيما يتعلق بفهمنا للطبيعة. وأصل هذه النظرية يعود لما قدمه بلانك Planck عام 1900 من تفسير لتوزيع الطاقة في إشعاع الجسم الأسود، فقد افترض أن الإشعاع الكهرومغناطيسي عند تفاعله مع المادة يتصرف كما لو أنه متكون من جسيمات طاقة، ويُدعى كل من هذه الجسيمات بكَمِّ الطاقة quantum of energy، وقد سُميت بالفوتونات photons. ويمتلك الفوتون طاقة تتناسب مع تردد الإشعاع f بحيث:

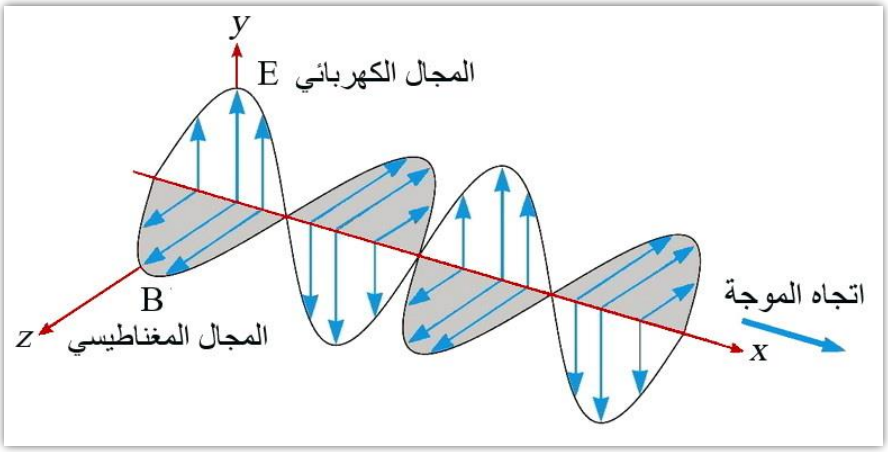
$$E = hf \qquad \dots\dots 2.1$$

و h هو ثابت التناسب والذي يُعرف الآن بثابت بلانك.

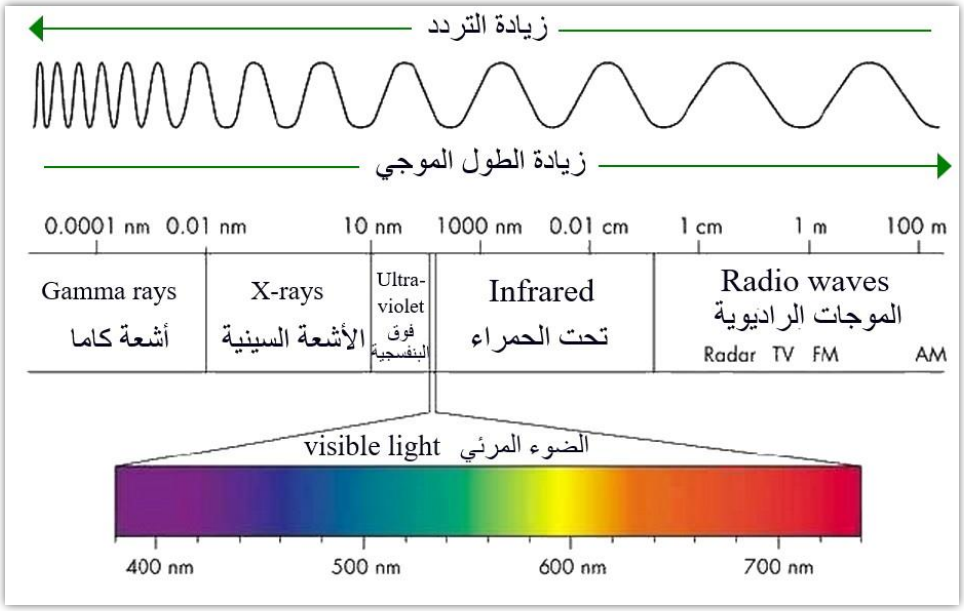
إن أكبر دعم لهذه النظرية جاء من قبل آينشتاين عام 1905 بتفسيره للظاهرة الكهروضوئية، وأعقب هذا نظرية ذرة الهيدروجين لبور Bohr عام 1913، والذي نجح في تفسير أصل الأطياف الخطية للهيدروجين. وكل هذا مع ظواهر أخرى أدّى إلى إثبات أن الإشعاع الكهرومغناطيسي يمتلك طبيعة مزدوجة من الموجات المستعرضة والجسيمات. حيث أن بعض النتائج التجريبية لظواهر مثل إشعاع الجسم الأسود والكهروضوئية وكومبتن وغيرها لا يمكن تفسيرها بصورة مقنعة إلا وفق افتراض أن الإشعاع الكهرومغناطيسي مكون من جسيمات. ومن جانب آخر فإن النتائج الخاصة بالتداخل والحيود لا يمكن تفسيرها إلا بافتراض الطبيعة الموجية للإشعاع الكهرومغناطيسي. ويمكن تلخيص الحالة العامة لطبيعة الإشعاع بأن السلوك الجسيمي يبرز خلال تفاعل الإشعاع مع المادة بينما يسود السلوك الموجي أثناء انتشار الإشعاع. ومن الملاحظ أن الموجة الكهرومغناطيسية تسلك أحد هذين السلوكين فقط في أي تجربة ولا تسلك السلوكين معاً في نفس الوقت.

إن موجة الضوء وباقي موجات الإشعاع الكهرومغناطيسي هي ذات مجال كهربائي مهتز يتعامد مع مجال مغناطيسي مهتز ويتفق معه في الطور، وكلا المجالَين يتعامدان مع اتجاه الانتشار كما في الشكل ٢-١. كما إن الضوء لا يختلف عن باقي الموجات الكهرومغناطيسية من حيث الطبيعة الأساسية، فموجات الراديو وتحت الحمراء والضوء وفوق البنفسجية والسينية وگاما تختلف فيما بينها في التردد والطول الموجي فقط، ولكنها من نفس النوع، فهي جميعاً موجات كهرومغناطيسية تنتقل في الفراغ بنفس السرعة (سرعة الضوء c) وتنطبق نظرية ماكسويل عليها. وما عدا اختلافها بالتردد والطول الموجي فإن القياسات التي تصح لنوع

واحد منها تكون صحيحة لباقي الأنواع. ويعتمد العديد من ميزات تفاعلها مع المادة على ترددداتها، وبالتالي على طاقاتها وفق المعادلة 2.1. وتشكل موجات الضوء – وهي الموجات التي تستجيب لها العين البشرية– حيزاً صغيراً من الترددات، حيث تنحصر ما بين التردد ($4.3 \times 10^{14}\ Hz$) تقريباً للضوء الأحمر (بطول موجي حوالي $700\ nm$) والتردد ($7.5 \times 10^{14}\ Hz$) تقريباً للضوء البنفسجي (بطول موجي $400\ nm$). ويبين الشكل ٢-٢ الطيف الكهرومغناطيسي.



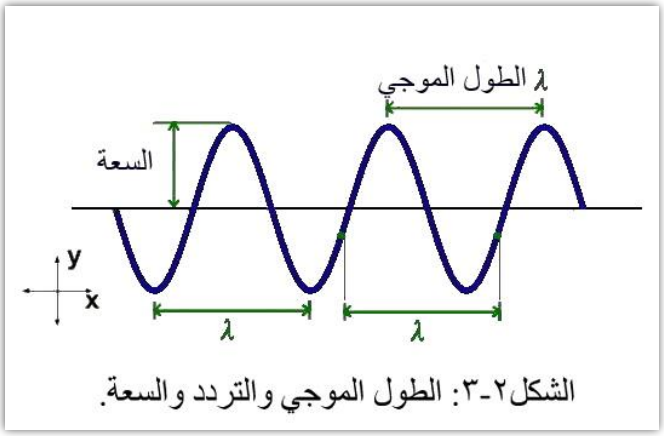
الشكل ٢-١: المجالان الكهربائي والمغناطيسي للموجة الكهرومغناطيسية.



الشكل ٢-٢: طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي.

نحتاج هنا لمعرفة معنى الطول الموجي wavelength والتردد frequency، فالطول الموجي كما في الشكل ٢-٣ هو المسافة التي يتكرر فيها شكل الموجة، أي المسافة بين نقطتين متقابلتين متتاليتين من نفس الطور على الموجة، مثل قمتين متجاورتين، أو قعرين متجاورين أو غيرهما. بينما التردد هو عدد مرات تكرار الموجة لكل وحدة زمنية. وتكون العلاقة بين المدة الزمنية period والتردد هي:

$$f = \frac{1}{T} \qquad \ldots\ldots 2.2$$



الشكل٢-٣: الطول الموجي والتردد والسعة.

والسعة amplitude هي ارتفاع الموجة، أي بُعدُ قمة أو قعر الموجة عن المحور السيني. أما العلاقة بين الطول الموجي والتردد فهي علاقة عكسية يربط بينهما ثابت هو سرعة الضوء في الفراغ c، بحيث:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{or} \quad c = \lambda f \qquad \ldots\ldots 2.3$$

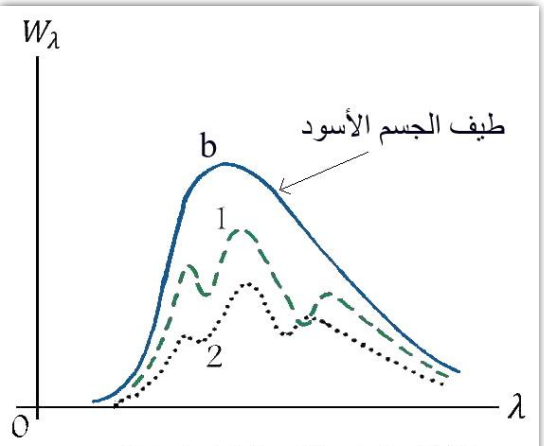
سؤال ١: موجة كهرومغناطيسية طولها $1\ nm$، ما مقدار ترددها وطاقة فوتوناتها؟ وأين موضعها في طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي؟

٢-٢: الإشعاع الحراري 2-2: Thermal Radiation

تشع كل الأجسام – في أي درجة حرارة كانت– طاقةً باستمرار على شكل إشعاع حراري من سطوحها متمثلة بموجات كهرومغناطيسية تنتجها الاهتزازات الحرارية للجزيئات. وتعتمد كمية وصفات هذا الإشعاع على عاملين هما: (أ) درجة حرارة الجسم، (ب) طبيعة وخصائص سطح الجسم.

بالإضافة إلى بعث الإشعاع فإن الجسم يمتص أيضاً الإشعاع الساقط عليه، ويكون السطح الصقيل ضعيف الإشعاع والامتصاص، بينما يكون السطح الخشن أو الأسود باعثاً وماصاً جيداً للإشعاع الحراري. كما إن هذا الإشعاع لا يتطلب وسطاً كي ينتقل بل يمكنه الانتقال عبر الفراغ كما تفعل أشعة الشمس. ويتألف الإشعاع المنبعث من توزيع متصل للأطوال الموجية من مختلف أجزاء الطيف الكهرومغناطيسي. وإذا كان الجسم في درجة حرارة الغرفة فإن الأطوال الموجية للإشعاع الحراري تقع بصورة أساسية في منطقة الأشعة تحت الحمراء، ولهذا لن تراها العين البشرية. وعموماً فإنه في درجات الحرارة الأقل من حوالي $600^{\circ}C$ لا يمكن رؤية الإشعاع الحراري المنبعث من الجسم، وتتركز معظم الطاقة في أطوال موجية أطول بكثير من تلك الموجودة في الضوء المرئي. وعندما يتم تسخين الجسم تزداد كمية الإشعاع الحراري المنبعث وتمتد الطاقة المشعة إلى أطوال موجية أقصر وأقصر. وعند حوالي $(600^{\circ}C - 700^{\circ}C)$ تكون هنالك طاقة كافية في الطيف المرئي بحيث يتوهج الجسم ويصبح أحمر باهتاً، وفي درجات حرارة أعلى يصبح أحمر براقاً ثم يتوهج باللون الأبيض كما في المصابيح المتوهجة.

ولدراسة الموضوع تجريبياً يُمرَّر إشعاع جسم ساخن خلال أجهزة مفرِّقة مثل المطياف ذي الموشور أو المُحزِّز. وعند قياس طاقة الإشعاع المنبعث لسلسلة من الترددات ورسم منحنى بياني بين طول موجة الإشعاع والإنبعاثية أحادية اللون W_λ monochromatic emittance التي تُعرّف بأنها كمية الطاقة المُشَعة في وحدة الزمن من وحدة مساحة السطح الباعث ضمن مدى الطول الموجي $d\lambda$ سوف نحصل على المنحنى المتقطع رقم 1 في الشكل ٢-٤، وعند إعادة التجربة على جسم آخر من مادة مختلفة بنفس درجة الحرارة نحصل على المنحنى المنقط رقم 2. ويتضح من الشكل أن كفاءة إشعاع الجسم الأول أعلى من كفاءة الثاني ولمدى كبير من الطول الموجي وأن الانبعاثية W_λ لسطح واحد محدد تختلف باختلاف الطول الموجي، ويتضح أيضاً أنها تكون أكبر عند درجة حرارة أعلى. وعند دراسة عدد كبير ومختلف من المواد بنفس درجة الحرارة نحصل على عدد كبير من المنحنيات، ولكن ليس لأي منها تلك الإنبعاثية التي يمثلها المنحنى المتصل b الذي يمثل طيف الجسم الأسود.



الشكل ٢-٤: الإنبعاثية أحادية اللون لأجسام مختلفة بثبوت درجة الحرارة.

٢-٣: انبعاث وامتصاص الإشعاع 2-3: Emission and Absorption of Radiation

تمتلك كل الأجسام القابلية على بعث وامتصاص الطاقة الإشعاعية. ويكون لدرجة حرارة الجسم وما يحيطه دور أساسي في تحديد نسب الإنبعاث والإمتصاص، وكما يلي:

١- إذا كان الجسم أسخن من الوسط المحيط به فإن معدل فقدانه للطاقة بالإشعاع يكون أكبر من معدل امتصاصه لها، وبالتالي سيبرد الجسم بسبب فقدان الطاقة.

٢- إن كان الجسم أبرد من محيطه فإن معدل امتصاصه للطاقة الإشعاعية سيكون أكبر من معدل إشعاعه لها، وسترتفع درجة حرارته لأنه يمتص الطاقة من المحيط.

٣- إذا كان الجسم وما يحيطه بنفس درجة الحرارة فإن معدل الإشعاع والانبعاث سيساوي معدل الامتصاص، ولا توجد زيادة أو نقصان صافيين في الطاقة، ولا يحدث تغيير في درجة الحرارة.

ولفهم الموضوع أكثر نفترض سقوط حزمة إشعاع أحادي اللون[١] على عدد من الأجسام المعتمة (غير الشفافة) وهي في حالة توازن حراري مع الوسط المحيط بها، وهذه الأجسام لا تسمح للإشعاع بإختراقها،

١) ما المقصود بالإشعاع أحادي اللون؟

ولكنها تمتص قسماً منه وتعكس القسم الآخر. ويمكن تعريف معامل الامتصاص a بأنه النسبة بين شدة الاشعاع الممتص من قبل الجسم إلى شدة الإشعاع الساقط عليه، ويُعرف معامل الانعكاس r بأنه النسبة بين شدة الإشعاع المنعكس عن السطح إلى شدة الإشعاع الساقط عليه، وكما يلي:

$$\text{معامل الامتصاص } a = \frac{\text{شدة الاشعاع الممتص}}{\text{شدة الاشعاع الساقط}} \quad ، \quad \text{معامل الانعكاس } r = \frac{\text{شدة الاشعاع المنعكس}}{\text{شدة الاشعاع الساقط}}$$

وتكون العلاقة بين معاملي الامتصاص والانعكاس وفق الصيغة التالية:

$$a + r = 1 \qquad \ldots\ldots 2.4$$

وفي حالة وجود عدة أجسام معتمة تكون الصيغة بالشكل:

$$a_1 + r_1 = 1 \quad , \quad a_2 + r_2 = 1 \quad , \quad \ldots\ldots$$

وسيكون لكل منها انبعاثية خاصة بها: $W_1, W_2, \ldots$.

وعندما تصل الأجسام لنفس درجة الحرارة (أي يتحقق شرط التوازن الحراري بينها) ستنتج العلاقة التالية:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{a_1}{a_2} \quad , \text{ or } \quad \frac{W_1}{a_1} = \frac{W_2}{a_2} \quad , \text{etc} \qquad \ldots\ldots 2.5$$

وقد لاحظنا أن الجسم إذا كان مشعاً جيداً (أي قيمة W عالية) فإنه يكون ماصاً جيداً للإشعاع (أي قيمة a عالية)، والعكس صحيح أيضاً. ولو توصلنا إلى صنع جسم يكون امتصاصه متكاملاً فإنه بالضرورة سيكون إشعاعه متكاملاً أيضاً.

٢-٤: إشعاع الجسم الأسود 2-4: Blackbody Radiation

يعرف الجسم الأسود بأنه النظام المثالي الذي يمتص كل الإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط عليه بغض النظر عن تردده ولا يعكس شيئاً منه، ولهذا يظهر باللون الأسود. ويسمى الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من الجسم الأسود إشعاع الجسم الأسود. ويكون معامل الامتصاص حينئذ مساوياً لـ 1 ومعامل الانعكاس يساوي صفراً. لذا تصبح المعادلة 2.5 بالشكل التالي:

$$\frac{W_1}{a_1} = \frac{W_2}{a_2} = \frac{W_b}{1} = W_b \qquad \ldots\ldots 2.6$$

وتدعى هذه العلاقة بقانون كيرشوف Kirchhoff للإشعاع، والذي ينص على أن النسبة بين القدرة الإشعاعية المنبعثة والقدرة الإشعاعية الممتصة تكون كمية ثابتة لجميع السطوح التي تكون بنفس درجة الحرارة، وتساوي إنبعاثية الجسم الأسود بنفس درجة الحرارة.

وكتقريب جيد للجسم الأسود فإنه يُستخدم جسم مجوّف يوجد في جداره ثقب صغير كما هو مبين في الشكل ٢-٥. وأي إشعاع يسقط على الثقب من الخارج يدخل إلى الحُجرة وينعكس عدة مرات إلى أن

الشكل ٢-٥: تمثيل الجسم الأسود بثقب في جدار جسم مجوّف.

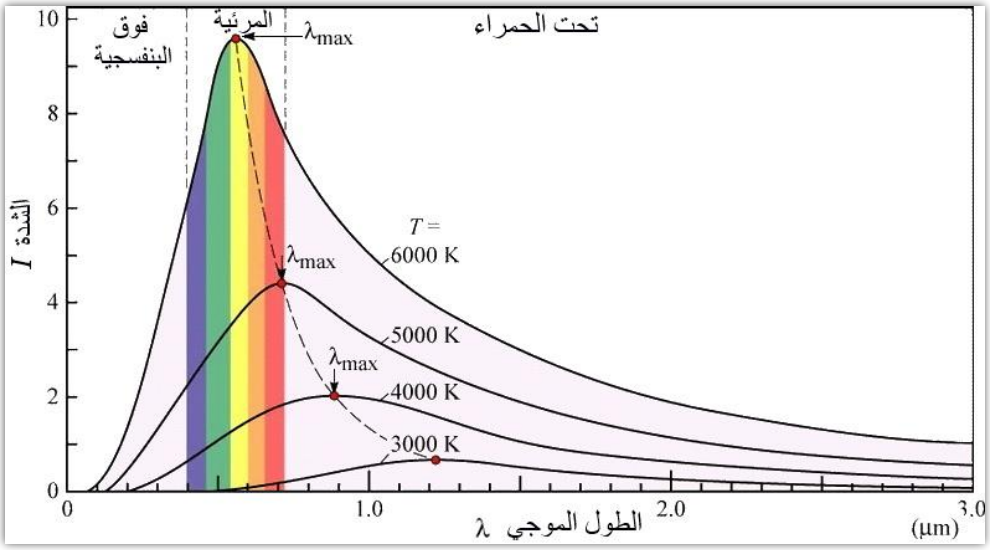
يُمتص من قبل الجدران الداخلية، ويعتبر الثقب هنا ماصاً مثالياً. وتعتمد طبيعة الإشعاع الذي يخرج من الحجرة من خلال الثقب على درجة حرارة جدران الحجرة وليس على المواد التي صُنعت منها الجدران بسبب الانعكاسات الكثيرة (اللا نهائية) التي تحدث للإشعاع داخلها مما يؤدي إلى الامتصاص التام للإشعاع الداخل بغض النظر عن طبيعة جدران الجسم الأسود. وبما أن امتصاصية الجسم الأسود للإشعاع تامة فإن انبعاثية الإشعاع منه ستكون تامة أيضاً. وعند إهمال تأثير المادة المكونة للحجرة يبقى المتغير المهم هو درجة الحرارة فقط.

إن الجسم الأسود عندما يكون ساخناً يشع أكثر مما هو عليه عندما يكون بارداً، فعندما تكون الحجرة المجوفة باردة يبدو الثقب أكثر ظلاماً من أي جزء ويظهر بلون أسود، ولكن عند تسخين الحجرة تسخيناً كافياً فإن الثقب يبدو أكثر إضاءة من باقي الحجرة. وهذا يعني أن الجسم الأسود يكون ماصاً مثالياً للإشعاع عندما تكون درجة حرارته أقل من درجة حرارة الوسط المحيط به، ويكون باعثاً مثالياً عندما تكون درجة حرارته أعلى من درجة حرارة المحيط.

٢-٥: طيف إشعاع الجسم الأسود 2-5: Blackbody Radiation Spectrum

يؤدي الإشعاع الذي يمتصه الجسم إلى زيادة الطاقة الحركية للذرات التي تتذبذب حول مواضع توازنها لأن الإشعاع هو طاقة تضاف إلى طاقة هذه الذرات. وبسبب أن معدّل الطاقة الحركية الانتقالية للذرات هو الذي يحدد مقدار درجة حرارة الجسم فإن الطاقة الممتصة تتسبب في ارتفاع درجة الحرارة. وبما أن الذرات تحتوي على شحنات (إلكترونات) تتحرك بتعجيل بسبب الاهتزازات فإنه وفق النظرية الكهرومغناطيسية لماكسويل سوف تُصدر الذرات إشعاعات كهرومغناطيسية تؤدي إلى نقصان الطاقة الحركية للاهتزازات، وبالتالي إلى تقليل درجة الحرارة. وعندما يساوي معدل الامتصاص معدل الانبعاث تكون درجة الحرارة ثابتة ونقول إن الجسم في حالة توازن حراري مع محيطه. ويمكن أن يكون للجسيمات المتهيجة حرارياً توزيع للطاقات يمثل طيفاً مستمراً للإشعاع المنبعث من الجسم.

ومع نهاية القرن التاسع عشر أصبح من الواضح أن النظرية التقليدية للإشعاع الحراري غير وافية بسبب عدم قدرتها على تفسير التوزيع الملحوظ تجريبياً للأطوال الموجية للإشعاع المنبعث من الجسم الأسود. ويبين الشكل ٢-٦ كيف تتفاوت شدة إشعاع الجسم الأسود مع درجة الحرارة والطول الموجي. ويُلاحظ أن ذروة طيف الجسم الأسود الساخن تحدث عند تردد أعلى من ذروة طيف الجسم الأسود البارد.



الشكل ٢-٦: علاقة شدة إشعاع الجسم الأسود مع الطول الموجي لأربع درجات حرارية.

وتتناسب الطاقة المشَعة في وحدة الزمن لوحدة المساحة من الجسم المُشِع مع المساحة تحت المنحنى. وقد وجد ستيفان تجريبياً أن هذه المساحة تتناسب طردياً مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة المطلقة للجسم الأسود المشع، أي إن القدرة الكلية للإشعاع المنبعث تزداد بزيادة درجة الحرارة. وتمت صياغة ما يُعرف بقانون ستيفان أو ستيفان- بولتزمان Stefan-Boltzmann كما يلي:

$$P = \sigma A \mathcal{E} T^4 \qquad \ldots\ldots 2.7$$

حيث P: القدرة بوحدة الواط التي يشعها سطح الجسم عند كل الأطوال الموجية،

و σ: ثابت ستيفان- بولتزمان $= 5.67 \times 10^{-8}\ W/m^2K^4$ ،

و A: مساحة سطح الجسم بوحدة المتر المربع،

و $\mathcal{E}$: إنبعاثية السطح، وهي نسبة الإشعاع الحراري لسطح الجسم إلى إشعاع السطح الأسود المثالي عند نفس درجة الحرارة، وتتراوح قيمتها بين 0 و 1 حيث تساوي 1 للجسم الأسود.

و T: درجة حرارة السطح بوحدة كلفن K.

ويمكن أيضاً التعبير عن هذا القانون للجسم الأسود بالصيغة:

$$R = \sigma T^4 \qquad \ldots\ldots 2.8$$

حيث R: القدرة التي يشعها جسم أسود إلى وحدة المساحة عند الدرجة T.

مثال ٢-١: صفيحة فولاذية مربعة نحيفة، طول ضلعها $10\ cm$، تم تسخينها إلى $800^{\circ}\mathrm{C}$. فإذا كانت الانبعاثية 0.6، فما هو المعدل الكلي لإشعاع الطاقة من اللوحة؟

الحل: المطلوب هو P في المعادلة 2.7 الذي يمثل معدل انبعاث الطاقة من سطحي الصفيحة. والمساحة السطحية الكلية ستكون $\{2(0.1\ m)^2 = 0.02\ m^2\}$، و $(T = 800^{\circ}\mathrm{C} = 1073\ K)$. ولهذا:

$$P = \sigma A \mathcal{E} T^4 = (5.67 \times 10^{-8}\ W/m^2.K^4\ )(0.02\ m^2)(0.6)(1073\ K)^4 = 902\ W$$

2-5-1: Wien's displacement law ٢-٥-١: قانون إزاحة ڤين

وَجد ڤين Wien أنه عند تغيير درجة حرارة أي جسم أسود فإن المنحنى يحتفظ بشكله العام، ولكن نهايته العظمى تزاح نحو أطوال موجية أقصر مع زيادة درجة الحرارة كما في الشكل ٢-٦، وهذا يعني أن شدة الإشعاع I تكون بأعلى قيمة عند طول موجي معين λ_{max} لدرجة حرارة محدَّدة للإشعاع، وتزاح λ_{max} نحو قيم أدنى بزيادة درجة حرارة الإشعاع. أي إن λ_{max} تتناسب عكسياً مع درجة الحرارة. وهذا السلوك يوصف بالعلاقة التالية التي تُدعى بقانون إزاحة ڤين:

$$\lambda_{max}\ T = 2.898 \times 10^{-3}\ m.K \qquad \ldots\ldots 2.9$$

$$\text{or}\quad \lambda_{max_1} T_1 = \lambda_{max_2} T_2 = \lambda_{max_3} T_3 = \text{constant} = 2.898 \times 10^{-3}\ m.K$$

حيث T: درجة الحرارة المطلقة لسطح الجسم الباعث للإشعاع.

ويمكن استخدام هذه المعادلة لحساب درجة حرارة الجسم الأسود طيفياً بواسطة قياس الطول الموجي λ_{max} عند أعلى شدة للإشعاع. وهذه الطريقة استُخدمت على نطاق واسع لحساب درجات حرارة النجوم. ومما يلاحظ من الشكل ٢-٦ أن المساحة تحت المنحنى (والتي تتناسب طردياً مع الإنبعاثية) تزداد بزيادة درجة الحرارة مما يؤكد صحة قانون ستيفان- بولتزمان.

إن قانون فين منسجم مع تصرف الجسم الذي يكون بدرجة حرارة الغرفة، فالجسم لا يتوهج لأن ذروة المنحنى λ_{max} تكون في منطقة الأشعة تحت الحمراء للطيف الكهرومغناطيسي، وعند درجة حرارة أعلى يتوهج بلون أحمر لأن الذروة تكون في منطقة تحت الحمراء القريبة من المنطقة المرئية مع بعض الإشعاع عند منطقة اللون الأحمر الموجودة نهاية الطيف المرئي. وعند درجات حرارية أعلى يتوهج الجسم بلون أبيض لأن الذروة تكون ضمن الطيف المرئي بحيث تنبعث جميع الألوان.

مثال ٢-٢: كتقريب جيد، يمكن اعتبار سطح الشمس كجسم أسود بدرجة حرارة سطحية $5800\ K$. (أ) ما هو الطول الموجي الذي تبعث عنده الشمس أعلى شدة؟ (ب) ما هي القدرة المشَعة الكلية لوحدة المساحة السطحية؟ (ج) هل تبقى القدرة في الفرع "ب" نفسها عند وصول الأشعة الشمسية للأرض وكيف؟

الحل: (أ)

$$\lambda_{max} = \frac{2.898 \times 10^{-3}\ m.K}{T} = \frac{2.898 \times 10^{-3}\ m.K}{5800\ K} = 5 \times 10^{-7}\ m = 500\ nm$$

(ب)
$$R = \sigma T^4 = (5.67 \times 10^{-8}\ W/m^2.K^4\ )(5800\ K)^4 = 6.42 \times 10^7\ W/m^2$$

(ج) هذه القدرة الهائلة ($R = 6.42 \times 10^7\ W/m^2 = 64.2\ MW/m^2$) التي حصلنا عليها في الفرع "ب" هي الشدة عند سطح الشمس، التي هي كرة نصف قطرها ($6.96 \times 10^8\ m$). وعندما تصل هذه الطاقة المشَعة إلى الأرض التي تبعد حوالي ($1.5 \times 10^{11}\ m$) فإن الشدة تقل بمقدار المعامل

$$\left(\frac{6.96 \times 10^8\ m}{1.5 \times 10^{11}\ m}\right)^2 = 2.15 \times 10^{-5}$$

لتصبح حوالي $1.4\ kW/m^2$.

2-6: Rayleigh–Jeans Formula ٢-٦: صيغة ريلي- جينز

إن النظرية الناجحة لإشعاع الجسم الأسود يجب أن تتوقع شكل المنحنيات في الشكل ٢-٦ وكذلك صيغة درجة الحرارة T^4 المذكورة في قانون ستيفان وأيضاً زحزحة الذروة عند تغير درجة الحرارة التي وصفها قانون إزاحة ڤين. وقد فشلت المحاولات المبكرة لاستخدام الأفكار التقليدية لشرح أشكال المنحنيات المذكورة. ولدراسة إحدى هذه المحاولات سنُعَرِّف الكمية $I(\lambda)d\lambda$ على أنها شدة الإشعاع، أي القدرة لوحدة المساحة المنبعثة خلال مدى الطول الموجي $d\lambda$. وقد استندت نتيجة الحسابات على نظرية تقليدية لإشعاع الجسم الأسود تُدعى صيغة ريلي- جينز التي تتخذ الشكل:

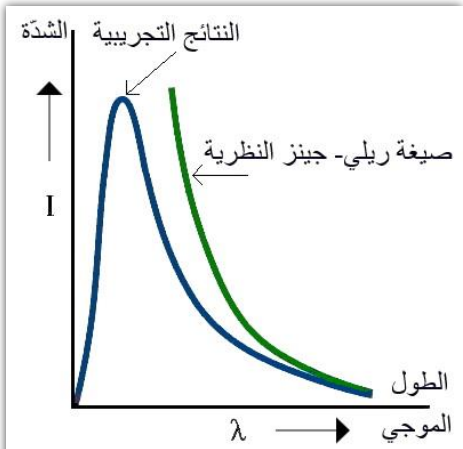
$$I(\lambda) = \frac{2\pi c k_B T}{\lambda^4} \qquad \ldots\ldots 2.10$$

حيث k_B: ثابت بولتزمان، وقيمته هي ($1.38 \times 10^{-23}\ J/K$). وكما مرّ فإنه تم تمثيل الجسم الأسود كما في الشكل ٢-٥ على أنه الثقب المؤدي إلى جسم مجوف ويدخل الإشعاع من خلاله إلى الحجرة، ويتفاعل هذا الإشعاع مع إلكترونات وذرات وجزيئات مواد الجدران مما يؤدي إلى اهتزاز الإلكترونات. وبالتالي فإن الشعاع الداخل سينعكس ذهاباً وإياباً عن الجدران الداخلية ويُنتِج أنماط تذبذب في المجال الكهرومغناطيسي بسبب الشحنات المعجلة في جدران الحجرة، وستنبعث موجات كهرومغناطيسية بمختلف الأطوال الموجية وتتولد موجات واقفة[١] standing wave لكل تردد. وسيخرج جزء صغير من هذا الإشعاع من الثقب ليتم تحليل طيفه. ولما كانت المنظومة في حالة توازن حراري فالإشعاع الذي تمتصه الجدران الداخلية للحجرة يجب أن يساوي الإشعاع الذي تبعثه المتذبذبات الذرية المتواجدة في جدران التجويف. وقد فُرض وفق النظرية التقليدية المستخدمة في اشتقاق المعادلة 2.10 أن معدل الطاقة لكل طول موجة من أنماط الموجات الواقفة يتناسب طردياً مع $k_B T$.

---

١) الموجة الواقفة: وتسمى أيضاً الموجة المستقرة، وهي موجة تتذبذب في موضع محدد ولا تنتقل عبر الفضاء. وفيها نقاط معينة ثابتة تسمى العُقد nodes، وتكون سعة هذه الموجة عند باقي النقاط متغيرة مع الوقت، ولكن طورها يبقى ثابتاً. وتنتج عن تداخل وتراكب موجتين متماثلتين تسيران في اتجاهين متعاكسين، ولكل منهما نفس السعة والتردد.

ويُبين الشكل ٢-٧ مخططاً تجريبياً لطيف إشعاع الجسم الأسود والتوقع النظري لصيغة ريلي- جينز التي تبدو في اتفاق معقول مع البيانات التجريبية عند الأطوال الموجية الطويلة، ولكن الخلاف يبدو واضحاً في الموجات القصيرة، فعندما تقترب λ من الصفر فإن الشدة $I(\lambda)$ المعطاة بالمعادلة 2.10 تقترب من اللانهاية. وبالتالي فإنه وفق النظرية التقليدية (التي قامت على أساسها حسابات ريلي- جينز) يجب أن تصبح الطاقة المنبعثة من أي جسم أسود لا نهائية عند الأطوال الموجية القصيرة. وهذا غير مقبول، ويمثل فشلاً ذريعاً لصيغة ريلي - جينز، لأن البيانات التجريبية تبين أنه عند اقتراب λ من الصفر فإن $I(\lambda)$ تقترب أيضاً من الصفر. والصحيح هو أن أية حسابات نظرية يجب أن توافق النتائج العملية.



الشكل ٢-٧: النتائج التجريبية وصيغة ريلي-جينز لطيف إشعاع الجسم الأسود.

٢-٧: قانون بلانك للإشعاع 2-7: Planck's Law of Radiation

في عام 1900 طوّر ماكس بلانك نظرية لإشعاع الجسم الأسود تؤدي إلى معادلة للشدة $I(\lambda, T)$ تكون متفقة مع النتائج التجريبية في جميع الأطوال الموجية. وقدّم افتراضات كما يلي:

١- إن إشعاع تجويف الحجرة جاء نتيجة اهتزازات (تذبذبات) ذرية في الجدران الداخلية.

٢- لا تأخذ طاقة المتذبذب الذري أي قيمة كانت، بل تأخذ قيماً غير متصلة مع بعض، أي مكمَّمة quantized بخلاف ما كان شائعاً في ذلك الوقت بأن الطاقة تأخذ قيماً متصلة. والتكميم يعني أن قيم الطاقة تمثل مضاعفات لقيمة صغيرة جداً مقدارها hf بحيث:

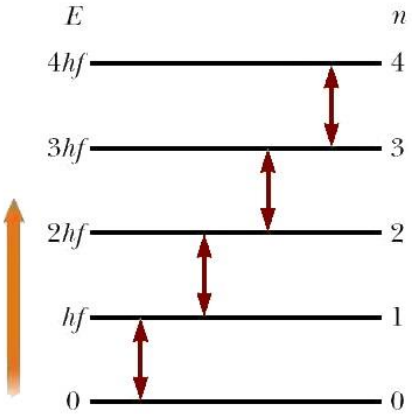
$$E_n = nhf \qquad \ldots\ldots 2.11$$

حيث n: عدد كمي quantum number موجب صحيح، و f: تردد المتذبذب، و h: ثابت اقترحه بلانك يُعرف الآن بثابت بلانك، ومقداره تقريباً ($6.626 \times 10^{-34}\ J.s$). وكل قيمة طاقة منفصلة تكون متطابقة مع حالة كمية مختلفة مُمثَلة بالعدد الكمي n. وعندما يكون المتذبذب في الحالة الكمية ($n = 1$) تكون طاقته hf، وعندما يكون في الحالة الكمية ($n = 2$) تكون طاقته $2hf$. وهكذا.

٣- إن المتذبذبات تبعث أو تمتص الطاقة عند إجراء انتقال من حالة كمية إلى أخرى. ووفق هذا فإن المتذبذب يبعث أو يمتص الطاقة عندما تتغير حالته الكمية فقط. وإذا بقي في حالة كمية واحدة فلا يتم امتصاص الطاقة ولا انبعاثها. ويُبعث أو يُمتص فرق الطاقة بكامله خلال الانتقال بشكل كم واحد من الإشعاع (فوتون) بين الحالتين الابتدائية والنهائية. وإذا كان الانتقال من حالة ما إلى حالة مجاورة أدنى،

مثلاً من الحالة ($n = 3$) إلى الحالة ($n = 2$)، فإن المعادلة 2.11 تبين أن كمية الطاقة المنبعثة من المتذبذب والتي تُحمل من قبل كمٍّ الإشعاع هي:

$$E = hf \qquad \ldots\ldots 2.12$$



الشكل ٢-٨: مستويات الطاقة المسموح بها لمتذبذب بتردد f.

ويوضح الشكل ٢-٨ مستويات الطاقة المكممة والانتقالات المسموح بها التي اقترحها بلانك. وقد توصل بلانك لصيغة نظرية لتوزيع الطول الموجي متفقة بشكل جيد مع المنحنيات التجريبية في الشكل ٢-٦ وتصح لكل الأطوال الموجية، وهي:

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda k_B T} - 1)} \qquad \ldots\ldots 2.13$$

ومن الطريف أنه عندما قدم بلانك نظريته فإن معظم العلماء (بما في ذلك بلانك نفسه) لم يعتبروا مفهوم الكم كمفهوم واقعي، بل كانوا يعتقدون أنه كان خدعة رياضية حدثت للتنبؤ بالنتائج الصحيحة. وبالتالي واصل بلانك وآخرون البحث عن تفسير أكثر واقعية لإشعاع الجسم الأسود. ومع ذلك فإن التطورات اللاحقة أظهرت أن النظرية المستندة على مفهوم الكم (بدلاً من المفاهيم التقليدية) كان لا بد من استخدامها ليس لتفسير إشعاع الجسم الأسود فحسب ولكن أيضاً لتفسير عدد من الظواهر الأخرى على المستوى الذري.

مثال ٢-٣: جد القدرة المشعَة لوحدة المساحة من سطح الشمس في مدى الطول الموجي (600 إلى 605 nm).

الحل: يتعلق هذا السؤال بالقدرة المنبعثة من جسم أسود على مدى ضيق من الأطوال الموجية، وبالتالي يتضمن الانبعاث الطيفي $I(\lambda)$ المعطى في قانون بلانك للإشعاع (المعادلة 2.13). وهذا يتطلب إيجاد المساحة أسفل منحنى $I(\lambda)$ بين 600 و 605 nm. وسنقوم بتقريب لهذه المنطقة على أنها حاصل ضرب ارتفاع المنحنى عند متوسط الطول الموجي ($\lambda = 602.5\ nm$) والعرض ($\Delta\lambda = 5\ nm$). وعندنا من المثال ٢-٢: ($T = 5800\ K$).

وللحصول على ارتفاع منحنى $I(\lambda)$ عند ($\lambda = 602.5\ nm = 6.025 \times 10^{-7}\ m$) نجد أولاً الكمية $hc/\lambda k_B T$ ونعوض النتيجة في المعادلة 2.13:

$$\frac{hc}{\lambda k_B T} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^8\ m/s)}{(6.025 \times 10^{-7}\ m)(1.38 \times 10^{-23}\ J/K)(5800\ K)} = 4.122$$

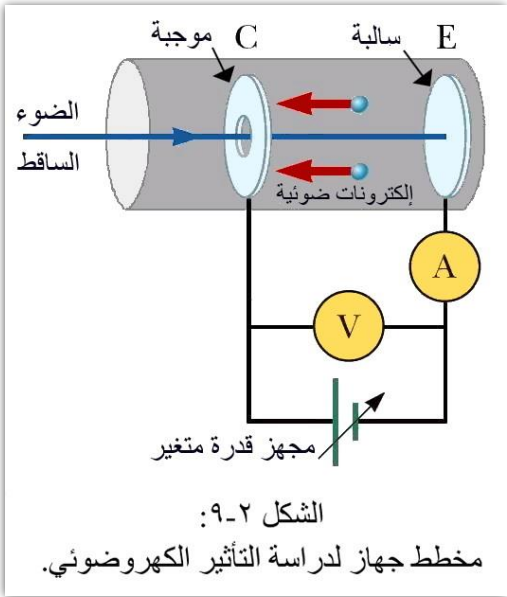
$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda k_B T} - 1)} = \frac{2\pi(6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^8\ m/s)^2}{(6.025 \times 10^{-7}\ m)^5(e^{4.122} - 1)}$$
$$= 7.77 \times 10^{13}\ W/m^3$$

ستكون الشدة في المدى $5\ nm$ (من 600 إلى $605\ nm$) ما يقارب:

$$I(\lambda)\Delta\lambda = (7.77 \times 10^{13}\ W/m^3)(5 \times 10^{-9}\ m)$$
$$= 3.88\ \times 10^5\ W/m^2 = 0.388\ MW/m^2$$

في الجزء "ب" من مثال ٢-٢ وجدنا القدرة المشَعة من الشمس لوحدة المساحة في جميع الأطوال الموجية فكانت $64.2\ MW/m^2$. وهنا وجدنا أن القدرة المشَعة لوحدة المساحة في مدى الطول الموجي من 600 إلى $605\ nm$ هي [$I(\lambda)\Delta\lambda = 0.388\ MW/m^2$]، أي حوالي 0.6% من القدرة في جميع الأطوال الموجية.

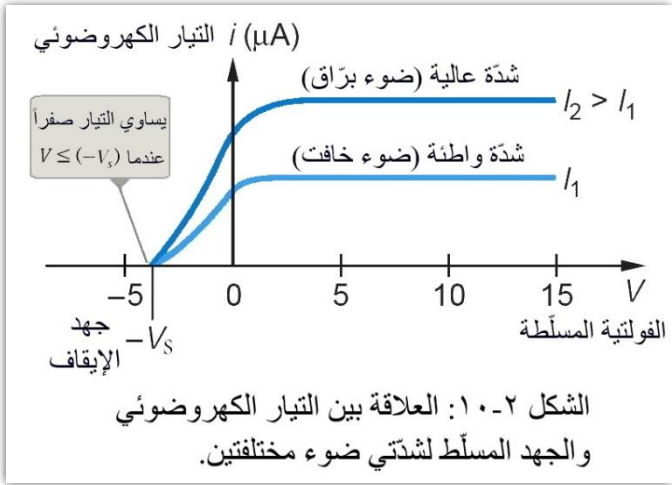
٢-٨: الظاهرة الكهروضوئية 2-8: Photoelectric Effect



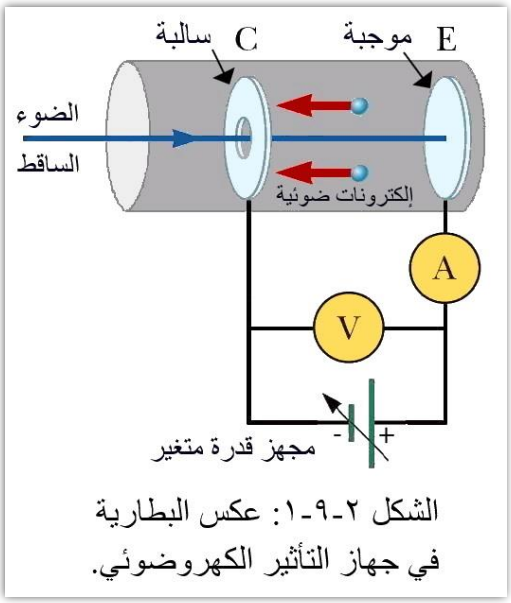
الشكل ٢-٩:
مخطط جهاز لدراسة التأثير الكهروضوئي.

كان إشعاع الجسم الأسود أول ظاهرة شُرحت وفق النموذج الكمي. وفي أواخر القرن التاسع عشر ظهر من بعض التجارب أن الضوء الساقط بتردد عالٍ بما يكفي على سطوح معدنية محدَّدة يسبب انبعاث إلكتروناً منها. وتُعرف هذه الظاهرة بالتأثير الكهروضوئي، وتُدعى الإلكترونات المنبعثة بالإلكترونات الضوئية. ويمثل الشكل ٢-٩ مخطط جهاز لدراسة التأثير الكهروضوئي، وفيه أنبوب مفرَّغ من الهواء مصنوع من الزجاج أو الكوارتز يحوي صفيحة معدنية نظيفة E (تمثل القطب الباعث) متصلة بالطرف السالب للبطارية، ويحتوي أيضاً على صفيحة معدنية أخرى C (تمثل القطب الجامع) متصلة بالطرف الموجب للبطارية. وعندما يوضع الأنبوب في الظلام يقرأ الأميتر صفراً مما يدل على عدم وجود تيار في الدائرة الكهربائية. وعندما تضاء الصفيحة E بضوء ذي تردد مناسب فإن تياراً يسري في الدائرة ويقرأه الأميتر، وهذا يدل على تدفق الشحنات عبر الفجوة بين الصفيحتين E و C. وهذا التيار ينشأ بسبب الإلكترونات الضوئية المنبعثة من الصفيحة E والمتجمعة على الصفيحة C.

ويبين الشكل ٢-١٠ مخططاً للتيار الكهروضوئي i مقابل فرق الجهد V المسلط بين الصفيحتين E و C لشدَّتي ضوء مختلفتين. حيث عند زيادة شدة الضوء من I_1 إلى I_2 يزداد التيار الكهروضوئي بنفس النسبة لكل قيم V، لأن زيادة الشدة عند تردد معين تعني زيادة عدد الفوتونات الساقطة على القطب الباعث E. لذا سوف تزداد احتمالية التصادم بين الفوتونات والإلكترونات، أي سيزداد عدد الإلكترونات التي تكتسب طاقة الفوتونات، وهذا يؤدي لزيادة إنبعاث الإلكترونات لكل ثانية، أي يزداد التيار. لكن هذه الزيادة في التيار لا تستمر، بل يصل التيار لقيمة قصوى لا يزداد بعدها لكل قيم V المتزايدة، ويُدعى حينئذ بتيار الإشباع، وتتجمع جميع الإلكترونات المنبعثة من القطب الباعث عند القطب الجامع.



الشكل ٢-١٠: العلاقة بين التيار الكهروضوئي والجهد المسلّط لشدّتي ضوء مختلفتين.



الشكل ٢-٩-١: عكس البطارية في جهاز التأثير الكهروضوئي.

وعند عكس البطارية في الدائرة لجعل الصفيحة E موجبة والصفيحة C سالبة كما في الشكل ٢-٩-١، فإن التيار سينخفض بشكل حاد ويصل إلى الصفر عند الجهد V_s (لاحظ الشكل ٢-١٠) لأنه بعد سقوط الإشعاع على الصفيحة E فإن الإلكترونات الضوئية المنبعثة منها سوف يتم صدّها من قبل الصفيحة C السالبة حالياً. وفي هذه الحالة فإن تلك الإلكترونات الضوئية التي تمتلك طاقة حركية أكبر من $e|V|$ ستصل هي فقط إلى الصفيحة C، حيث e: قيمة شحنة الإلكترون. وعندما يكون فرق الجهد V مساوياً لـ $(-V_s)$ أو أكثر سلبية منه فإن الإلكترونات الضوئية لا تصل إلى الصفيحة C ويكون التيار صفراً. ويُدعى V_s جهد الإيقاف stopping potential للتردد المُعَين.

ويُلاحظ من الشكل ٢-١٠ أن جهد الإيقاف لا يعتمد على شدة الإشعاع لأنه بالرغم من تغيير شدة الضوء الساقط فقد بقيت قيمة V_s نفسها، لأن زيادة الشدة تعني زيادة عدد الفوتونات الساقطة بلا تغيير في طاقتها. وبالتالي لن تتغير طاقة الإلكترونات الضوئية المنبعثة ولا قيمة جهد الإيقاف لأنها تعتمد على طاقة الإلكترونات الضوئية. وبعد وصول الفولتية العكسية إلى القيمة V_s ووصول التيار الكهروضوئي إلى الصفر

فإن أقصى طاقة حركية $E_{k_{max}}$ تمتلكها الإلكترونات عند مغادرة السطح المعدني E والتي تتوقف مباشرة قبل الوصول إلى الصفيحة C يمكن حسابها من المعادلة:

$$E_{k_{max}} = eV_s = \frac{1}{2}mv_{max}^2 \qquad \ldots\ldots 2.14$$

أما الإلكترونات التي تترك السطح الباعث بطاقات حركية أقل من الطاقة القصوى بسبب الطاقة المفقودة خلال اجتياز المعدن فإنها تتوقف بتأثير فروق جهد أقل من V_s. وهذا يفسر تناقص التيار عندما تصبح الفولتية سالبة. ولأن $(E_{k_{max}} = eV_s)$ فإن $E_{k_{max}}$ للإلكترونات الضوئية لا تعتمد على شدة الضوء أيضاً لكلا المنحنيين الّذَين يهبطان إلى الصفر عند نفس الجهد السلبي كما في الشكل ٢-١٠.

٢-٨-١: العلاقة بين جهد الإيقاف وتردد الضوء الساقط

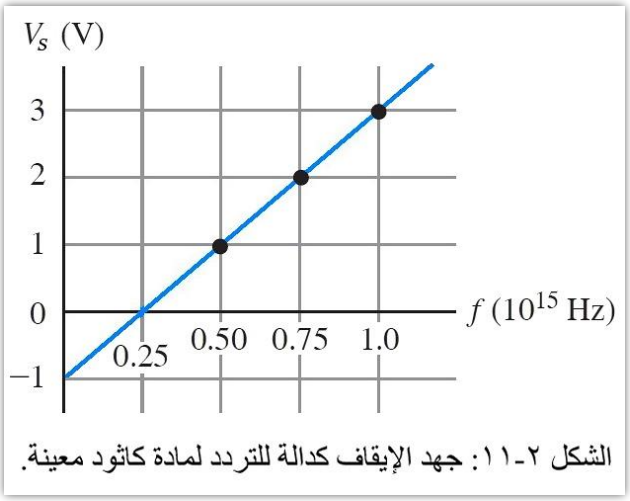
درس ميليكان سنة 1916 اعتماد جهد الإيقاف على تردد الضوء بتجارب يمكن تمثيل نتائجها بالشكل ٢-١١، حيث رُسمت eV_s أو $E_{k_{max}}$ مقابل تردد الضوء الساقط على السطح. والناتج هو خط مستقيم يُعطى بالعلاقة:

$$E_{k_{max}} = eV_s = h(f - f_c) = hf - hf_c \qquad \ldots\ldots 2.15$$

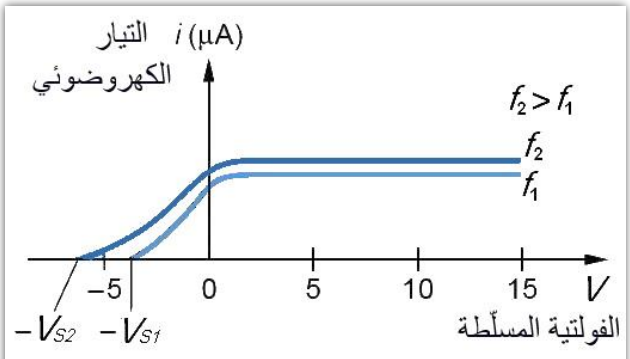
حيث h: ميل الخط المائل ويساوي ثابت بلانك، و f_c: أقل تردد للضوء الساقط يمكن أن يسبب انبعاث إلكترون من السطح، ويُعرف بتردد العتبة threshold frequency أو تردد القطع cutoff frequency، ويعتمد على طبيعة السطح.

وعند إعادة التجربة لترددات مختلفة للضوء الساقط على سطح كاثودي محدد وُجد بأن جهد الإيقاف V_s يزداد خطياً مع التردد f. أي عند تسليط ضوء بتردد أكبر - بغض النظر عن شدته- سوف تزداد سلبية جهد الإيقاف، أي إننا نحتاج لتسليط جهد أكبر عند عكس البطارية لإيقاف الإلكترونات المتحررة من الصفيحة E.

وفي الشكل ٢-١٢ تم تثبيت شدة الضوء الساقط، ولوحظ أن جهد الإيقاف للتردد الأكبر f_2



الشكل ٢-١١: جهد الإيقاف كدالة للتردد لمادة كاثود معينة.



الشكل ٢-١٢: علاقة اختلاف جهد الإيقاف مع تردد الإشعاع الساقط بشدة ثابتة على سطح محدّد.

هو أكبر قيمة (أي أكثر سلبية) مما للتردد الأصغر f_1، وهذا ما يشير له تفسير آينشتاين للظاهرة الكهروضوئية. وعند استخدام ترددات أقل من تردد القطع سوف لا تحدث الظاهرة الكهروضوئية ولا تنبعث إلكترونات ضوئية من المعدن مهما زادت شدة الضوء الساقط، ويكون جهد الإيقاف في هذه الحالة صفراً لأنه لا توجد إلكترونات ضوئية منبعثة حتى نحتاج لجهد يوقفها. ولكن عند زيادة تردد الضوء لقيم أكبر من f_c سيزداد جهد الإيقاف خطياً مع التردد. ويعتبر تردد القطع من خصائص المادة الباعثة للإلكترونات، ويُسمى الطول الموجي المقابل له بطول موجة القطع λ_c.

٢-٩: تفسير آينشتاين للظاهرة الكهروضوئية

2-9: Einstein's Interpretation of Photoelectric Effect

لتفسير الظاهرة الكهروضوئية استخدم آينشتاين مفهوم "كم الطاقة" أو "الفوتون" الذي قدمه بلانك لتفسير توزيع الطاقة خلال الأطوال الموجية المختلفة في إشعاع الجسم الأسود. وكان تفسير آينشتاين هو أن طاقة الفوتون الواحد hf الواصل للسطح في الشكل ٢-٩ تُمتص كلها بواسطة إلكترون منفرد في المعدن. ولا تحتاج جميع الإلكترونات لنفس الطاقة كي تترك سطح المعدن، ولا يمكن للإلكترون الهروب من السطح إلا إذا كانت الطاقة التي يكتسبها أكبر من دالة الشغل work function W_o، وبالتالي لن يتم إخراج الإلكترونات الضوئية إلا إذا كانت $(hf > W_o)$ أو $(f > W_o/h)$. وتشرح فرضية آينشتاين أيضاً سبب عدم وجود تأخير بين الإضاءة وانبعاث الإلكترونات الضوئية. فبمجرد أن تضرب فوتونات ذات طاقة كافية السطح، يمكن للإلكترونات امتصاصها والخروج من المعدن.

كما ويشرح افتراض آينشتاين لماذا يعتمد جهد الإيقاف لسطح معين على تردد الضوء فقط. وإذا علمنا أن W_o هي الحد الأدنى من الطاقة اللازمة لإزالة الإلكترون من السطح، فقد طبّق أينشتاين مبدأ حفظ الطاقة ليجد أن الطاقة الحركية العظمى $\left(E_{k_{max}} = \frac{1}{2}mv_{max}^2\right)$ للإلكترون المنبعث هي الطاقة hf المكتسبة من فوتون مطروحاً منه دالة الشغل W_o:

$$E_{k_{max}} = \frac{1}{2}mv_{max}^2 = hf - W_o \qquad \ldots\ldots 2.16$$

وتُسمى هذه المعادلة بالمعادلة الكهروضوئية لآينشتاين Einstein's photoelectric equation. وقد تم التحقق من هذه العلاقة الخطية بالتجربة بعد عدة سنوات من هذه النظرية، ورُسمت في الشكل ٢-١٣ الذي يمثل ميلُ كل خط فيه ثابتَ بلانك h. وتَقطع هذه الخطوط المحور الأفقي بنقاط تمثل تردد القطع الذي لا تنبعث الإلكترونات الضوئية عندما يكون تردد الإشعاع الساقط أقل منه.

بتعويض $\left(E_{k_{max}} = eV_s\right)$ من المعادلة 2.15 نجد:

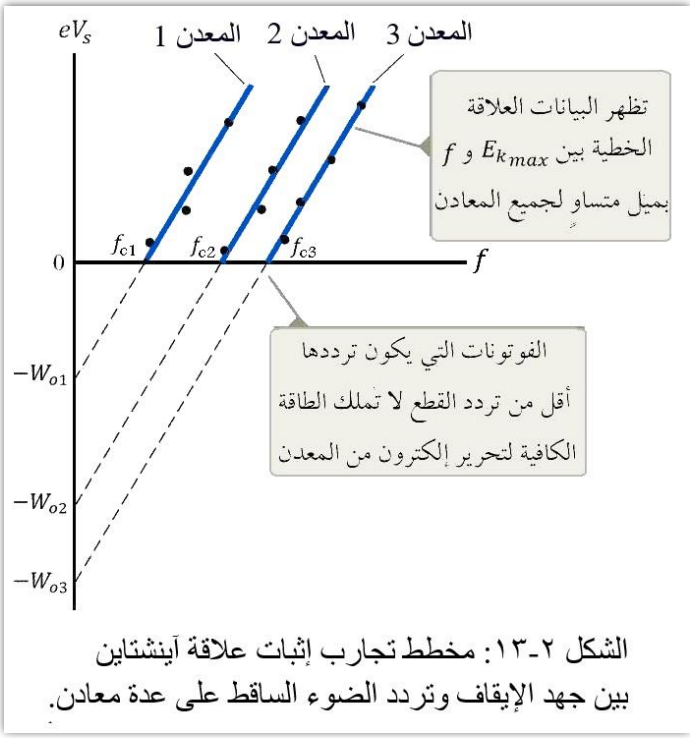
$$eV_s = hf - W_o \qquad \ldots\ldots 2.17$$

وتبين هذه المعادلة إن جهد الإيقاف V_s يزداد بزيادة التردد f كما مرّ في الشكل ٢-١١.

تحقيقاً للمعادلة 2.17 ومن الشكل ٢-١١ الذي يمثل علاقة خط مستقيم بين جهد الإيقاف V_s والتردد f أمكن حساب دالة الشغل للمادة وقيمة الكمية h/e. وبعد معرفة قيمة شحنة الإلكترون $(-e)$ بواسطة ميليكان أمكن حساب ثابت بلانك h أيضاً من هذه القياسات.

وبطرح المعادلة 2.15 من المعادلة 2.16 ينتج:

$$0 = hf_c - W_o \quad \rightarrow \quad hf_c = W_o \qquad \ldots\ldots 2.18$$



الشكل ٢-١٣: مخطط تجارب إثبات علاقة آينشتاين بين جهد الإيقاف وتردد الضوء الساقط على عدة معادن.

وعليه يمكن حساب دالة الشغل من معرفة تردد القطع للمعدن. ومنه يُستنتج طول موجة القطع λ_c:

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{c}{W_o/h} = \frac{hc}{W_o} \qquad \ldots 2.19$$

ومن الجدير بالذكر أن الظاهرة الكهروضوئية لا تقتصر على تأثير الضوء في السطوح المعدنية، فهي قد تحصل في الغازات والسوائل أيضاً. كما إنها ليست مقتصرة على الضوء فقط وإنما تشمل مدى واسعاً من الأمواج الكهرومغناطيسية ابتداءً بالقصيرة جداً: أشعة گاما والأشعة السينية وامتداداً إلى فوق البنفسجية والمرئية وتحت الحمراء.

مثال ٢-٤: أثناء إجراء تجربة التأثير الكهروضوئي بضوء ذي تردد معين، وُجد أن فرق جهد عكسي مقداره $1.25\ V$ مطلوب لتقليل التيار إلى الصفر. جد (أ) الطاقة الحركية العظمى و (ب) السرعة القصوى للإلكترونات الضوئية المنبعثة.

الحل: (أ) من المعادلة 2.15:

$$E_{k_{max}} = eV_s = 1.25\ eV = (1.6 \times 10^{-19}\ C)(1.25\ V) = 2 \times 10^{-19}\ J$$

(ب)

$$E_{k_{max}} = \frac{1}{2} m v_{max}^2$$

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2E_{k_{max}}}{m}} = \sqrt{\frac{2(2 \times 10^{-19}\ J)}{9.11 \times 10^{-31}\ kg}} = 6.626 \times 10^5\ m/s$$

تبلغ قيمة v_{max} هنا حوالي 0.2% من سرعة الضوء، لذلك يحق لنا استعمال التعبير غير النسبي للطاقة الحركية. (التبرير الآخر المكافئ لهذا الاستعمال هو أن الطاقة الحركية للإلكترون $1.25\ eV$ أقل بكثير من طاقته السكونية $0.511\ MeV$).

سؤال ٢: تصبح أغشية السيليكون موصلات كهربائية أفضل عندما تضاء بفوتونات تبلغ طاقاتها $1.14\ eV$ أو أكبر، وهو تأثير يسمى الموصلية الضوئية photoconductivity. أيٌّ من الأطوال الموجية التالية للإشعاع الكهرومغناطيسي يمكن أن يسبب الموصلية الضوئية في أغشية السيليكون؟ ولماذا؟

(أ) إشعاع فوق البنفسجي ذو $(\lambda = 300\ nm)$، (ب) إشعاع أحمر ذو $(\lambda = 600\ nm)$، (ج) إشعاع تحت الأحمر ذو $(\lambda = 1200\ nm)$، (د) كلا الجوابين "أ" و "ب"، (هـ) كل الأجوبة "أ" و "ب" و "ج".

٢-١٠: تطبيقات الظاهرة الكهروضوئية 2-10: Applications of Photoelectric Effect

للظاهرة الكهروضوئية عدة تطبيقات عملية كان من أولها الكاشف في مقياس ضوء الكاميرا the detector in a camera's light meter، حيث ينعكس الضوء من الجسم المراد تصويره ليضرب سطحاً كهروضوئياً في المقياس مما يؤدي إلى أن تنبعث من السطح إلكترونات ضوئية تمر بعد ذلك عبر مقياس للتيار الكهربائي.

وكان من التطبيقات المبكرة أيضاً الأنبوب الضوئي phototube الذي يعمل كمفتاح في الدائرة الكهربائية ويُنتج تياراً في الدائرة عندما يسقط ضوء بتردد كافٍ على صفيحة معدنية في الأنبوب الضوئي، ولكنه لا يولد أي تيار في الظلام. وقد استُخدم في أجهزة التحذير من السرقة.

وحالياً يُستخدم التأثير الكهروضوئي في أنابيب المضاعف الضوئي photomultiplier tubes. ويبين الشكل ٢-١٤ تركيب هكذا جهاز، حيث يدخل جسيم إلى البلورة الوميضية ويَنتج فوتون بسبب الاصطدام، ويسقط هذا الفوتون على كاثود ضوئي[١] photocathode ويحرر إلكتروناً بواسطة التأثير الكهروضوئي. وسوف يتعجل هذا الإلكترون بسبب فرق الجهد بين الكاثود الضوئي والداينود dynode[٢] الأول الذي يزيد جهده بمقدار $200\ V$ عن جهد الكاثود الضوئي، ثم يضرب هذا الإلكترون عالي الطاقة داينود آخر ويحرر إلكترونات أكثر، والتي بدورها ستتعجل باتجاه قطب أعلى فولتية بـ $200\ V$ أيضاً.

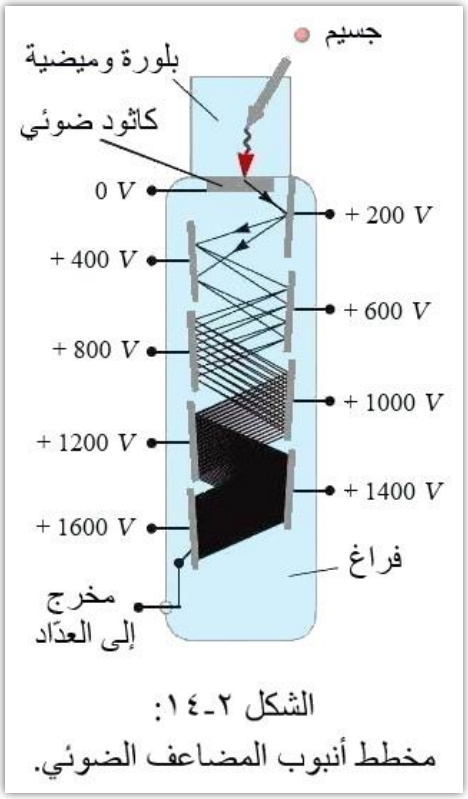
---

١) الكاثود الضوئي هو قطب كهربائي مشحون بشحنة سالبة في أجهزة الكشف الضوئي كالمضاعف الضوئي والأنبوب الضوئي، ويكون مغطى بطبقة حساسة للضوء.

٢) الداينود هو قطب كهربائي في أنبوب مفرغ يعمل كمضاعف إلكتروني من خلال الانبعاثات الثانوية.

وتُكرَّر هذه العملية عبر سلسلة من الداينودات بفولتيات أعلى حتى تتولد نبضة إلكترونية مكونة من ملايين الإلكترونات تضرب الداينود الأخير. والنتيجة أن دخول فوتون واحد سيسبب انتاج ملايين الإلكترونات.

ويُستعمل أنبوب المضاعف الضوئي في أجهزة الكشف النووية للكشف عن الفوتونات الناتجة عن تفاعل الجسيمات المشحونة النشطة أو أشعة گاما مع معادن معينة. كما يُستخدم أيضاً في علم الفلك في تقنية تُسمى المضوائية الكهروضوئية photoelectric photometry يتم فيها السماح للضوء القادم من نجم منفرد والمتجمع على الأرض بواسطة مرقاب أن يسقط على أنبوب المضاعف الضوئي لمدة من الزمن. ويقيس الأنبوب إجمالي الطاقة المنقولة بواسطة الضوء خلال هذه الفترة الزمنية، ويمكن بعد ذلك تحويل الطاقة لغرض معرفة لمعان النجم.



الشكل ٢-١٤:
مخطط أنبوب المضاعف الضوئي.

أسئلــة

١- ما هي طبيعة الضوء؟ وما هي الدقائق التي يتكون منها؟

٢- لماذا عزّز فوكو وفيزو النظريةَ الموجية في القرن التاسع عشر عندما أثبتا بأن سرعة الضوء في وسط كثيف هي أبطأ مما في الفراغ؟

٣- هل كان يعتقد ماكسويل في نظريته للكهرومغناطيسية أن الضوء ينتشر خلال الأثير؟ وكيف؟ وهل فسرت نظريته كل الظواهر المتعلقة بالإشعاع الكهرومغناطيسي؟ ولماذا؟

٤- لماذا لم يستطع علماء الفيزياء في القرن التاسع عشر تفسير بعض الظواهر الطبيعية كالانبعاث والامتصاص في الأطياف الذرية وإشعاع الجسم الأسود والظاهرة الكهروضوئية؟

٥- متى يبرز السلوك الجسيمي للإشعاع الكهرومغناطيسي ومتى يبرز السلوك الموجي؟ وهل يمكن أن يسلك الإشعاعُ السلوكين معاً في نفس الوقت؟

٦- ما هو الإشعاع الحراري؟ ولماذا تزداد كمية الإشعاع الحراري المنبعث من الجسم عند تسخينه؟ ولماذا تمتد الطاقة المشعة حينئذ إلى أطوال موجية أقصر؟

٧- على ماذا تعتمد كمية وصفات الإشعاع الحراري؟ وهل يمكن أن ينتقل في الفراغ؟

٨- ما هو طول موجة الإشعاع؟ وما هو ترددها وعلاقته بالمدة الزمنية period؟ وما العلاقة بين الطول الموجي والتردد؟

٩- ما دام الإشعاع الحراري إشعاعاً كهرومغناطيسياً تشعه كل الأجسام من سطوحها باستمرار في كل الدرجات الحرارية فلماذا لا نرى تغير ألوان الأجسام في درجة حرارة الغرفة؟

١٠- إذا توصلنا إلى صنع جسم يكون امتصاصه متكاملاً فإنه بالضرورة سيكون إشعاعه متكاملاً أيضاً. لماذا؟

١١- لماذا يكون لون الجسم الأسودِ أسودَ؟ وما هي قيمة معاملي الامتصاص والانعكاس له؟

١٢- لماذا لا تعتمد طبيعة الإشعاع الذي يخرج من تجويف الجسم الذي يمثل الجسم الأسود على المواد التي صُنعت منها الجدران رغم أن كمية وصفات الإشعاع الحراري عموماً تعتمد على درجة حرارة الجسم وطبيعة السطح؟

١٣- إذا كان الجسم وما يحيطه بنفس درجة الحرارة فهل هذا يعني أن الجسم قد توقف عن بعث وامتصاص الحرارة؟ أم ماذا؟

١٤- بيّن بالرسم أن ذروة طيف الجسم الأسود الساخن تحدث عند طول موجة أصغر مما لذروة طيف الجسم الأسود البارد.

١٥- بين بالرسم خطأ صيغة ريلي- جينز، ثم اذكر الخطأ في حسابات هذه الصيغة وسببه؟

١٦- ما هو قانون كيرشوف للإشعاع رياضياً وفيزيائياً؟

١٧- ما هي الإنبعاثية أحادية اللون؟ وما علاقتها بدرجة حرارة الجسم؟

١٨- في الظاهرة الكهروضوئية، لماذا لا يعتمد جهد الإيقاف على شدة الضوء الساقط؟

١٩- في الظاهرة الكهروضوئية، لماذا يزداد التيار الكهروضوئي بزيادة شدة الضوء الساقط؟

٢٠- في الظاهرة الكهروضوئية، هل تنطلق الإلكترونات من المعدن بسرعة واحدة أم بسرع مختلفة في كلا حالتي ما إذا كان الضوء الساقط ذا طول موجي واحد أو متعدد الأطوال الموجية؟ ولماذا؟

٢١- في الشكل ٢-١٠ يُلاحظ أن التيار يصل إلى ما يُسمى بتيار الإشباع. عرّفه وعلِّل هذا الإشباع.

٢٢- هل يقتصر حصول الظاهرة الكهروضوئية على تأثير الضوء في السطوح المعدنية أم يشمل السوائل والغازات؟ وهل يمكن أن تحدث إذا كان الشعاع الساقط غير الضوء من الإشعاع الكهرومغناطيسي؟

٢٣- عندما يتم عكس قطبية البطارية في الظاهرة الكهروضوئية، لماذا ينخفض التيار بشكل حاد ويصل إلى الصفر عندما تصل الفولتية إلى ما يُعرف بجُهد الإيقاف؟

٢٤- ما هي الإلكترونات الضوئية؟

٢٥- لماذا لا تحدث الظاهرة الكهروضوئية عند استخدام ترددات أقل من تردد القطع ولا تنبعث إلكترونات ضوئية من المعدن مهما كانت قيمة شدة الضوء الساقط؟ ولماذا يكون جهد الإيقاف في هذه الحالة صفراً؟

٢٦- عند عكس البطارية وتسليط ضوء بتردد أكبر في الظاهرة الكهروضوئية، لماذا نزيد جهد الإيقاف لصدّ الإلكترونات المتحررة من الصفيحة الباعثة E؟

٢٧- ما مدى صحة العبارة التالية: إذا بقي إلكترون في حالة كمية واحدة فلا يتم امتصاص الطاقة ولا انبعاثها من قبل الذرة؟ ولماذا؟

٢٨- ما هي دالة الشغل؟ وما علاقتها رياضياً بتردد القطع؟

٢٩- وفق أي مبدأ يعمل أنبوب المضاعف الضوئي؟ وما النتيجة النهائية لدخول فوتون إلى الجهاز؟

٣٠- إذا سقط ضوء ذو شدة عالية في الظاهرة الكهروضوئية ولكن بتردد أقل من تردد العتبة فسوف:
(أ) لا تحدث الظاهرة الكهروضوئية ولا تنبعث إلكترونات ضوئية من المعدن، (ب) تحدث الظاهرة ولا تنبعث إلكترونات ضوئية، (ج) لا تحدث الظاهرة وتنبعث إلكترونات ضوئية، (د) تحدث الظاهرة وتنبعث إلكترونات ضوئية.

٣١- العلاقة بين جهد الإيقاف وشدة الإشعاع الساقط في الظاهرة الكهروضوئية هي:
(أ) علاقة طردية خطية، (ب) علاقة طردية أسية، (ج) علاقة عكسية، (د) لا علاقة بينهما.

٣٢- أي إشعاع مما يلي له احتمالية أكبر بتسبيب حروق شمسية بسبب نقل طاقة أكثر لجزيئات منفردة في خلايا الجلد؟ وكيف؟ (أ) الأشعة تحت الحمراء، (ب) الضوء المرئي، (ج) الإشعاع فوق البنفسجي، (د) الموجات المايكروية، (هـ) كل الاختيارات السابقة لها احتمالية متساوية.

٣٣- هنالك بعض الظواهر لا يمكن تفسيرها إلا وفق الطبيعة الجسيمية للإشعاع الكهرومغناطيسي مثل ..... و ..... و .....

مسائل محلولة

(١) جد الطول الموجي لأعلى شدة لإشعاع الجسم الأسود المنبعث من جسم الإنسان عندما تكون درجة حرارة الجلد $35°\ C$. ثم بيّن لأي منطقة من الطيف ينتمي هذا الإشعاع.

الحل: يمكن إيجاد الطول الموجي لأعلى شدة من خلال قانون إزاحة ڤين:

$$\lambda_{max} = \frac{2.898 \times 10^{-3}\ m.K}{T} = \frac{2.898 \times 10^{-3}\ m.K}{308\ K} = 9.41 \times 10^{-6}\ m = 9.41\ \mu m$$

ويقع هذا الإشعاع في منطقة الأشعة تحت الحمراء من الطيف ويكون غير مرئي للعين البشرية.

(٢) يبلغ نصف قطر الشمس $696000\ km$ وإجمالي قدرتها المشَعة $(3.85 \times 10^{26}\ W)$.
(أ) بافتراض أن سطح الشمس يبعث الإشعاع كجسم أسود، احسب درجة حرارة سطحها.
(ب) جد الطول الموجي لأعلى شدة لإشعاع الشمس.

الحل: (أ) إذا كانت الشمس تبعث الإشعاع كجسم أسود فإن إنبعاثية السطح $(\mathcal{E} = 1)$.

$$P = \sigma A \mathcal{E} T^4$$

$$T = \left(\frac{P}{\mathcal{E}\sigma A}\right)^{1/4} = \left[\frac{3.85 \times 10^{26}\ W}{1(5.67 \times 10^{-8}\ W/m^2.K^4)[4\pi(6.96 \times 10^8\ m)^2]}\right]^{1/4} = 5779\ K$$

(ب) من قانون إزاحة ڤين:

$$\lambda_{max} = \frac{2.898 \times 10^{-3}\ m.K}{T} = \frac{2.898 \times 10^{-3}\ m.K}{5779\ K} = 5.01 \times 10^{-7}\ m = 501\ nm$$

(٣) جسم أسود مساحته $20\ cm^2$ ودرجة حرارته $5000\ K$، (أ) كم يشع من القدرة؟ (ب) بأي طول موجي سيشع شدته العظمى؟ (ج) جد القدرة الطيفية لمدى الطول الموجي في الفرع "ب".

الحل: (أ) من قانون ستيفان:

$$P = \mathcal{E}\sigma A T^4$$
$$= 1(5.67 \times 10^{-8}\ W/m^2.K^4)(20 \times 10^{-4}\ m^2)(5000\ K)^4 = 7.087 \times 10^4\ W$$

(ب) من قانون إزاحة ڤين:

$$\lambda_{max}\ T = \lambda_{max}\ (5000\ K) = 2.898 \times 10^{-3}\ m.K$$

$$\lambda_{max} = \frac{2.898 \times 10^{-3}\ m.K}{5000\ K} = 5.8 \times 10^{-7}\ m = 580\ nm$$

(ج) مرّ علينا في تعريف $I(\lambda, T)$ أنها القدرة لوحدة المساحة المنبعثة خلال مدى الطول الموجي. ولهذا فإنه وفق قانون بلانك ستكون القدرة الطيفية P كما يلي:

$$I(\lambda, T) = \frac{P(\lambda, T)}{A} \quad \rightarrow \quad P(\lambda, T) = I(\lambda, T)A = \frac{2\pi hc^2 A}{\lambda^5(e^{(hc/\lambda k_B T)} - 1)}$$

$$2\pi hc^2 A = 2\pi(6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^8\ m/s)^2(20 \times 10^{-4}\ m^2)$$
$$= 7.49 \times 10^{-19}\ J.m^4/s$$

$$\frac{hc}{\lambda k_B T} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^8\ m/s)}{(580 \times 10^{-9}\ m)(1.38 \times 10^{-23}\ J/K)(5000\ K)} = 4.967$$

$$P = \frac{7.49 \times 10^{-19}\ J.m^4/s}{(580 \times 10^{-9}\ m)^5(e^{4.967} - 1)} = 8 \times 10^{10}\ W/m$$

(٤) ضوء طول موجته 5893 Å يسقط على سطح من البوتاسيوم. فإذا علمت أن جهد الإيقاف للإلكترونات المنبعثة $(V_s = 0.36\ V)$ فاحسب:
(أ) الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية، (ب) دالة الشغل، (ج) تردد العتبة.

الحل: (أ)
$$E_{k_{max}} = eV_s = 0.36\ eV$$

(ب)
$$E_{k_{max}} = hf - W_o$$

$$W_o = hf - E_{k_{max}} = h\frac{c}{\lambda} - E_{k_{max}}$$

$$= \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^8\ m/s)}{(5893 \times 10^{-10}\ m)(1.6 \times 10^{-19}\ J/eV)} - 0.36\ eV$$

$$= 2.1\ eV - 0.36\ eV = 1.74\ eV$$

(ج)
$$hf_c = W_o$$

$$f_c = \frac{W_o}{h} = \frac{1.74\ eV \times 1.6 \times 10^{-19}\ J/eV}{6.626 \times 10^{-34}\ J.s} = 4.2 \times 10^{14}\ Hz$$

(٥) كم تبلغ النسبة المئوية في زيادة نسبة القدرة التي يشعها الجسم الأسود إذا تضاعفت درجة حرارته؟

الحل: باستخدام قانون بولتزمان للجسم الأسود:
$$R(T_1) = \sigma T^4$$

وعند زيادة درجة الحرارة إلى الضعف:
$$R(T_2) = \sigma(2T)^4 = 16\sigma T^4$$

لذا فمقدار الزيادة يكون:
$$R(T_2) - R(T_1) = 16\ \sigma T^4 - \sigma T^4 = 15\sigma T^4$$

والنسبة المئوية لمقدار الزيادة تساوي:
$$\frac{R(T_2) - R(T_1)}{R(T_1)} \times 100\% = \frac{15\sigma T^4}{\sigma T^4} \times 100\% = 1500\%$$

أي إن القدرة قد تضاعفت خمس عشرة مرة عند مضاعفة درجة الحرارة مرة واحدة فقط.

(٦) سقط ضوء طول موجته 5000 Å على مادة لها دالة شغل مقدارها 1.9 eV. جد الطاقة العظمى للإلكترونات الضوئية ثم جد جهد الإيقاف.

الحل:
$$E_{k_{max}} = hf - W_o$$

$$E = hf = h\frac{c}{\lambda} = (6.626 \times 10^{-34}\ J.s)\frac{3 \times 10^8\ m/s}{5000 \times 10^{-10}\ m} = 3.97 \times 10^{-19}\ J$$

$$= \frac{3.97 \times 10^{-19}\ J}{1.6 \times 10^{-19}\ J/eV} = 2.48\ eV$$

$$E_{k_{max}} = hf - W_o = 2.48 - 1.9 = 0.58\ eV$$

$$E_{k_{max}} = eV_s \quad \rightarrow \quad V_s = \frac{E_{k_{max}}}{e} = \frac{0.58\ eV}{e} = 0.58\ V$$

(٧) إذا كان طول موجة القطع للانبعاث الكهروضوئي من أحد المعادن يساوي 6525 Å فجد جهد الإيقاف عندما يضاء المعدن: (أ) بضوء طول موجته 4000 Å، (ب) بضوء تردده ضعف تردد الضوء المذكور في الفرع "أ" وشدته ثلاثة أمثال شدة ذلك الضوء، (ج) عند استخدام معدن آخر يمتلك ضعف دالة الشغل للمعدن الأول في الحالتين "أ" و "ب".

الحل: (أ)

$$E_{k_{max}} = hf - hf_c$$

$$hf_c = h\frac{c}{\lambda_c} = (6.626 \times 10^{-34}\ J.s)\frac{3 \times 10^8\ m/s}{6525 \times 10^{-10}\ m} = 3.046 \times 10^{-19}\ J$$

$$hf = h\frac{c}{\lambda} = (6.626 \times 10^{-34}\ J.s)\frac{3 \times 10^8\ m/s}{4000 \times 10^{-10}\ m} = 4.969 \times 10^{-19}\ J$$

$$E_{k_{max}} = 4.969 \times 10^{-19} - 3.046 \times 10^{-19} = 1.923 \times 10^{-19}\ J$$

$$= \frac{1.923 \times 10^{-19}\ J}{1.6 \times 10^{-19}\ J/eV} = 1.202\ eV$$

$$E_{k_{max}} = eV_s \quad \rightarrow \quad V_s = \frac{E_{k_{max}}}{e} = \frac{1.202\ eV}{e} = 1.202\ V$$

(ب) لا يعتمد تردد القطع f_c على الشدة، ولهذا فإن مضاعفة الشدة عدة مرات لا يغير من قيمة تردد القطع ولا من جهد الإيقاف. وفي حالة إضاءة السطح بضوء تردده ضعف التردد المستخدم في الفرع "أ" سينتج:

$$E_{k_{max}} = h(2f) - hf_c = 2 \times 4.969 \times 10^{-19} - 3.046 \times 10^{-19} = 6.892 \times 10^{-19}\ J$$

$$= \frac{6.892 \times 10^{-19}\ J}{1.6 \times 10^{-19}\ J/eV} = 4.307\ eV = eV_s \quad \rightarrow \quad V_s = 4.307\ V$$

(ج) للفرع "أ":

$$W_o = 2hf_c = 2 \times 3.046 \times 10^{-19}\ J = 6.092 \times 10^{-19}\ J$$

وهذه القيمة أكبر من قيمة طاقة الفوتون الساقط hf، أي: $(6.092 \times 10^{-19}\ J > 4.969 \times 10^{-19}\ J)$،
ولهذا لا يوجد انبعاث كهروضوئي حسب العلاقة: $E_{k_{max}} = hf - W_o$

أما في الفرع "ب" فتكون طاقة الفوتون الساقط:

$$2hf = 2 \times 4.969 \times 10^{-19}\ J = 9.938 \times 10^{-19}\ J$$

$$E_{k_{max}} = hf - W_o = 9.938 \times 10^{-19} - 6.092 \times 10^{-19} = 3.846 \times 10^{-19}\ J$$

$$= \frac{3.846 \times 10^{-19}\ J}{1.6 \times 10^{-19}\ J/eV} = 2.403\ eV = eV_s \quad \rightarrow \quad V_s = 2.403\ V$$

(٨) يمتلك عنصر الموليبدنوم Molybdenum دالة شغل مقدارها $4.2\ eV$. (أ) جد طول موجة القطع وتردد القطع للتأثير الكهروضوئي. (ب) ما مقدار جهد الإيقاف إذا كان للإشعاع الساقط طول موجي مقداره $180\ nm$؟

الحل : (أ)

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{c}{W_o/h} = \frac{hc}{W_o} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^8\ m/s)}{(4.2\ eV)(1.6 \times 10^{-19}\ J/eV)} = 296\ nm$$

ويقابله تردد قطع مقداره :

$$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3 \times 10^8\ m/s}{296 \times 10^{-9}\ m} = 1.014 \times 10^{15}\ Hz$$

$$\text{or}\quad f_c = \frac{W_o}{h} = \frac{(4.2\ eV)(1.6\times10^{-19}\ J/eV)}{6.626\times10^{-34}\ J.s} = 1.014\times10^{15}\ Hz$$

$$eV_s = hf - W_o = h\frac{c}{\lambda} - W_o \qquad \text{(ب)}$$

$$V_s = \frac{hc}{e\lambda} - \frac{W_o}{e} = \frac{(6.626\times10^{-34}\ J.s)(3\times10^{8}\ m/s)}{(1.6\times10^{-19}\ J/V)(180\times10^{-9}\ m)} - \frac{4.2\ eV}{e} = 2.7\ V$$

(٩) تمتلك عناصر الليثيوم والبريليوم والزئبق دوال شغل مقاديرها $2.3\ eV$ و $3.9\ eV$ و $4.5\ eV$ على التوالي. وقد سقط على كل منها ضوء طول موجته $400\ nm$. (أ) أي هذه المعادن سيُظهر تأثيراً كهروضوئياً؟ ثم بيّن السبب. (ب) جد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية لكل حالة.

الحل: (أ) طاقة الفوتون الساقط بطول موجي $400\ nm$ تساوي:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626\times10^{-34}\ J.s)(3\times10^{8}\ m/s)}{400\times10^{-9}\ m}$$

$$= 4.969\times10^{-19}\ J\left(\frac{1eV}{1.6\times10^{-19}\ J}\right) = 3.11\ eV$$

بمقارنة هذه الطاقة $3.11\ eV$ مع دوال الشغل للمعادن يتبين أن الليثيوم فقط سيُظهر تأثيراً كهروضوئياً لأن دالة الشغل له تقل عن طاقة الفوتون الساقط.

(ب) لِلّيثيوم : $E_{k_{max}} = E - W_o = 3.11\ eV - 2.3\ eV = 0.81\ eV$

أما باقي المعادن فلم تُظهر تأثيراً كهروضوئياً كما تبيّن من الفرع السابق، ولهذا فلا توجد إلكترونات ضوئية كي نحسب طاقتها الحركية العظمى.

(١٠) حُرّرت إلكترونات من سطح معدن بسرعات تصل إلى $(4.6\times10^{5}\ m/s)$ عند استخدام ضوء طول موجته $625\ nm$. (أ) جد دالة الشغل للسطح. (ب) جد تردد القطع لهذا السطح.

الحل: (أ) تُحسب دالة الشغل من المعادلة الكهروضوئية لآينشتاين: $E_{k_{max}} = E - W_o$

ولهذا نحتاج حساب الطاقة الحركية العظمى للإلكترون،

$$E_{k_{max}} = \frac{1}{2}mv_{max}^2 = \frac{1}{2}(9.11\times10^{-31}\ kg)(4.6\times10^{5}\ m/s)^2$$

$$= 9.64\times10^{-20}\ J\left(\frac{1eV}{1.6\times10^{-19}\ J}\right) = 0.602\ eV$$

(لماذا استخدمنا هنا الصيغة التقليدية وليست النسبية لحساب الطاقة الحركية للإلكترونات؟)

$$W_o = E - E_{k_{max}} = hf - E_{k_{max}} = \frac{hc}{\lambda} - E_{k_{max}}$$

$$W_o = \frac{(6.626\times10^{-34}\ J.s)(3\times10^{8}\ m/s)}{(625\times10^{-9}\ m)} - 9.64\times10^{-20}\ J$$

$$= 3.18\times10^{-19}\ J - 9.64\times10^{-20}\ J = 2.22\times10^{-19}\ J\left(\frac{1\ eV}{1.6\times10^{-19}\ J}\right) = 1.38\ eV$$

(ب) عند تردد القطع ستساوي طاقة الفوتونات دالة الشغل:

$$hf_c = W_o \quad \rightarrow \quad f_c = \frac{W_o}{h} = \frac{2.22 \times 10^{-19}\ J}{6.626 \times 10^{-34}\ J.s} = 3.35 \times 10^{14}\ Hz$$

(١١) سقط إشعاع فوق بنفسجي بطول موجي $150\ nm$ على سطح نظيف من عينة من البلاتين، والذي له دالة شغل تساوي $6.35\ eV$. (أ) ما هي طاقة فوتون الإشعاع الساقط؟ (ب) كيف تعرف أن هذه الفوتونات ستحرر إلكترونات من البلاتين؟ (ج) ما هي الطاقة الحركية القصوى للإلكترونات الضوئية المتحررة؟ (د) ما هو جهد الإيقاف المطلوب لإيقاف تيار الإلكترونات الضوئية؟

الحل: (أ) طاقة الفوتون الساقط تساوي:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^{8}\ m/s)}{150 \times 10^{-9}\ m} = 1.32 \times 10^{-18}\ J = 8.28\ eV$$

(ب) هذه الفوتونات ستحرر إلكترونات لأن طاقة الفوتون $8.28\ eV$ أكبر من دالة الشغل $6.35\ eV$.

(ج) $$E_{k_{max}} = E - W_o = 8.28\ eV - 6.35\ eV = 1.93\ eV$$

(د) $$E_{k_{max}} = eV_s \quad \rightarrow \quad V_s = \frac{E_{k_{max}}}{e} = \frac{1.93\ eV}{e} = 1.93\ V$$

(١٢) لجهاز إرسال راديو FM قدرة خارجة تبلغ $150\ kW$، ويعمل على تردد قدره $99.7\ MHz$. احسب عدد الفوتونات التي سيبعثها جهاز الإرسال في الثانية الواحدة.

الحل: كل فوتون يمتلك طاقة مقدارها:

$$E = hf = (6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(99.7 \times 10^{6}/s) = 6.61 \times 10^{-26}\ J$$

وهذا يعني أن عدد الفوتونات في الثانية سيكون:

$$\frac{150 \times 10^{3}\ J/s}{6.61 \times 10^{-26}\ J} = 2.27 \times 10^{30}\ photons/s$$

(١٣) (أ) احسب الطاقة بوحدة eV لفوتون تردده: (١) $620\ THz$، (٢) $3.1\ GHz$، (٣) $46\ MHz$.

(ب) احسب الأطوال الموجية المرافقة لهذه الترددات.

(ج) صنِّف هذه الأطوال والترددات ضمن الطيف الكهرومغناطيسي.

الحل: (أ) الطاقة،

(١) $$E = hf = (6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(620 \times 10^{12}\ s^{-1})\left(\frac{1\ eV}{1.6 \times 10^{-19}\ J}\right) = 2.57\ eV$$

(٢) $$E = hf = (6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3.1 \times 10^{9}\ s^{-1})\left(\frac{1\ eV}{1.6 \times 10^{-19}\ J}\right) = 1.28 \times 10^{-5}\ eV$$

(٣) $$E = hf = (6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(46 \times 10^{6}\ s^{-1})\left(\frac{1\ eV}{1.6 \times 10^{-19}\ J}\right) = 1.9 \times 10^{-7}\ eV$$

(ب) الأطوال الموجية،

(١) $$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^{8}\ m/s}{620 \times 10^{12}\ s^{-1}} = 4.84 \times 10^{-7}\ m = 484\ nm$$

(٢) $$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^{8}\ m/s}{3.1 \times 10^{9}\ s^{-1}} = 9.68 \times 10^{-2}\ m = 9.68\ cm$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8\ m/s}{46 \times 10^6\ s^{-1}} = 6.52\ m \qquad (٣)$$

(ج) التصنيف ضمن الطيف الكهرومغناطيسي،
(١) الضوء المرئي (الأزرق)، (٢) الموجات الراديوية، (٣) الموجات الراديوية.

(١٤) إذا كان لفوتون موجة كهرومغناطيسية ساقطة على الذرة طاقة تكفي لتأيين الذرة، وكانت هذه الطاقة أكبر من $10\ eV$، وضِّح ما هي المنطقة أو المناطق من الطيف الكهرومغناطيسي التي تلائم هذه الطاقة للإشعاع المؤيّن وما لا تلائمها.

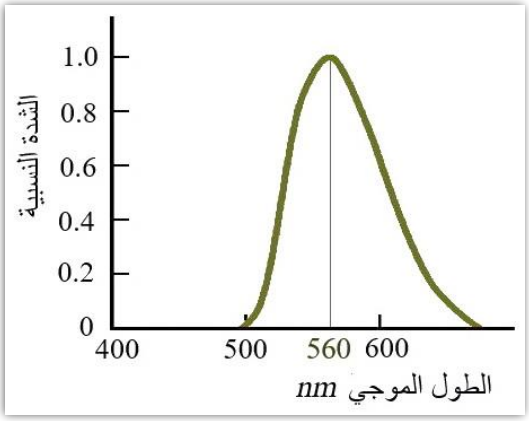
الحل :

$$f = \frac{E}{h} = \frac{(10\ eV)(1.6 \times 10^{-19}\ J/eV)}{6.626 \times 10^{-34}\ J.s} = 2.41 \times 10^{15}\ Hz$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8\ m/s}{2.41 \times 10^{15}\ s^{-1}} = 1.24 \times 10^{-7}\ m = 124\ nm$$

ما دامت طاقة فوتون الإشعاع المؤيّن أكبر من $10\ eV$ فإنه يقع ضمن طيف الأشعة فوق البنفسجية أو السينية أو أشعة گاما بطول موجي أقصر من $124\ nm$ وتردد أكبر من $(2.41 \times 10^{15}\ Hz)$.

(١٥) يبين الشكل المجاور طيف الضوء المنبعث من الحشرة المضيئة "اليراعة firefly".
(أ) احسب درجة حرارة الجسم الأسود الذي تكون ذروة إشعاعه بنفس الطول الموجي في الشكل المجاور.
(ب) بناءً على هذه النتيجة بيِّن ما إذا كان إشعاع اليراعة هو اشعاع جسم أسود.



الحل: (أ) يتبين من الشكل أن إشعاع الذروة يحدث عند طول موجي يقارب $560\ nm$. ولو طبقنا هذا على الجسم الأسود فسوف ينتج من قانون إزاحة ڤين أن درجة حرارته هي:

$$T = \frac{2.898 \times 10^{-3}\ m.K}{\lambda_{max}} = \frac{2.898 \times 10^{-3}\ m.K}{560 \times 10^{-9}\ m} = 5175\ K$$

(ب) من الواضح أن اليراعة ليست بهذه الدرجة الحرارية العالية، ولذا فإن إشعاعها ليس إشعاع جسم أسود.

(١٦) درجة حرارة سلك تسخين كهربائي هي $150^o\ C$. في أي طول موجي يصل الإشعاع المنبعث من سلك التسخين إلى ذروته؟

الحل :

$$T = 150 + 273 = 423^o\ \mathrm{K}$$

طول موجة ذروة الإشعاع هي:

$$\lambda_{max} = \frac{2.898 \times 10^{-3}\ m.K}{T} = \frac{2.898 \times 10^{-3}\ m.K}{423\ K} = 6.85 \times 10^{-6}\ m = 6.85\ \mu m$$

ويقع هذا في المنطقة تحت الحمراء من الطيف الكهرومغناطيسي.

(١٧) سقط ضوء طول موجته $550\ nm$ على كل من البوتاسيوم والموليبدنوم والبلاتين والصوديوم. وتمتلك هذه العناصر دوال شغل مقاديرها على التوالي $1.74\ eV$ و $4.2\ eV$ و $6.35\ eV$ و $2.46\ eV$.
(أ) أي من هذه العناصر سيُظهر تأثيراً كهروضوئياً؟ وما السبب؟

(ب) جد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية لكل حالة.
(ج) ما هو جهد الإيقاف المطلوب لإيقاف تيار الإلكترونات الضوئية؟

الحل: (أ) طاقة الفوتون الساقط بطول موجي $550\ nm$ تساوي:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^{8}\ m/s)}{550 \times 10^{-9}\ m} = 3.614 \times 10^{-19}\ J$$

$$= 3.614 \times 10^{-19}\ J \times \frac{1\ eV}{1.6 \times 10^{-19}\ J} = 2.258\ eV$$

وبمقارنة هذه الطاقة $2.258\ eV$ مع دوال الشغل للعناصر يتبين أن البوتاسيوم فقط سيُظهر تأثيراً كهروضوئياً لأن دالة الشغل له تقل عن طاقة الفوتون الساقط.

(ب) للبوتاسيوم، $E_{k_{max}} = E - W_o = 2.258\ eV - 1.74\ eV = 0.518\ eV$

أما باقي المعادن فلم تُظهر تأثيراً كهروضوئياً، ولهذا لا توجد إلكترونات ضوئية كي نحسب طاقتها الحركية العظمى.

(ج) $E_{k_{max}} = eV_s \quad \rightarrow \quad V_s = \frac{E_{k_{max}}}{e} = \frac{0.518\ eV}{e} = 0.518\ V$

(١٨) سقط إشعاع طوله الموجي $300\ nm$ على سطح من الصوديوم له دالة شغل مقدارها $2.46\ eV$، (أ) جد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية المنبعثة، (ب) جد طول موجة القطع للصوديوم.

الحل: (أ) طاقة الفوتون الساقط E هي:

$$E = hf = h\frac{c}{\lambda} = (6.626 \times 10^{-34}\ J.s)\frac{3 \times 10^{8}\ m/s}{300 \times 10^{-9}\ m} = 6.626 \times 10^{-19}\ J$$

$$= \frac{6.626 \times 10^{-19}\ J}{1.6 \times 10^{-19}\ J/eV} = 4.14\ eV$$

والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية المنبعثة ستكون:

$$E_{k_{max}} = E - W_o = 4.14 - 2.46 = 1.68\ eV$$

(ب) $\lambda_c = \frac{hc}{W_o} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^{8}\ m/s)}{(2.46\ eV)(1.6 \times 10^{-19}\ J/eV)} = 505\ nm$

(١٩) سقطت حزمة إشعاع أحادي اللون على هدف من الباريوم له دالة شغل مقدارها $2.5\ eV$. فإذا كان اللازم تسليط جهد مقداره $1\ V$ لصدِّ كل الإلكترونات المنبعثة، فما هو طول موجة حزمة الإشعاع؟
(أ) $355\ nm$ (ب) $497\ nm$ (ج) $744\ pm$ (د) $1.42\ \mu m$ (هـ) لا شيء من هذه الإجابات.

الحل :

$$E_{k_{max}} = eV_s = e(1\ V) = 1\ eV$$

$$E_{k_{max}} = hf - W_o$$

$$hf = \frac{hc}{\lambda} = E_{k_{max}} + W_o$$

$$\lambda = \frac{hc}{E_{k_{max}} + W_o} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^{8}\ m/s)}{1\ eV + 2.5\ eV}\left(\frac{1\ eV}{1.6 \times 10^{-19}\ J}\right) = 355\ nm$$

(٢٠) استُعمل ضوء أخضر $(\lambda = 546.1\ nm)$ من مصباح زئبق في تجربة الظاهرة الكهروضوئية لحساب دالة الشغل لسطح معدني معيَّن، وكان هنالك جهد إيقاف مقداره $0.376\ V$ قد قلّل تيار الإلكترونات الضوئية إلى الصفر. (أ) استناداً إلى هذا القياس، ما هي دالة الشغل لهذا المعدن؟ (ب) ما هو جهد الإيقاف الذي سيُلاحَظ عند استخدام الضوء الأصفر من أنبوب تفريغ هيليوم $(\lambda = 587.5\ nm)$؟

الحل : (أ)

$$E_{k_{max}} = eV_s = 0.376\ eV$$

$$W_o = hf - E_{k_{max}} = h\frac{c}{\lambda} - E_{k_{max}}$$

$$= \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^8\ m/s)}{546.1 \times 10^{-9}\ m}\left(\frac{1\ eV}{1.6 \times 10^{-19}\ J}\right) - 0.376\ eV$$

$$= 2.27\ eV - 0.376\ eV = 1.89\ eV$$

(ب) طاقة فوتون الضوء الأصفر الذي له طول موجي $(\lambda = 587.5\ nm)$ هي:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^8\ m/s)}{587.5 \times 10^{-9}\ m}\left(\frac{1\ eV}{1.6 \times 10^{-19}\ J}\right) = 2.11\ eV$$

ولهذا فإن الطاقة العظمى التي يمكن أن تكسبها الإلكترونات المتحررة هي:

$$E_{k_{max}} = hf - W_o = 2.11 - 1.89 = 0.22\ eV$$

وسيكون جهد الإيقاف:

$$V_s = \frac{E_{k_{max}}}{e} = \frac{0.22\ eV}{e} = 0.22\ V$$

(٢١) تبلغ دالة الشغل للخارصين $4.31\ eV$. (أ) جد طول موجة القطع للخارصين. (ب) ما هو أقل تردد للضوء الساقط على الخارصين الذي يحرر إلكترونات ضوئية من سطحه؟ (ج) إذا سقطت فوتونات بطاقة $5.5\ eV$ على الخارصين فما هي أقصى طاقة حركية للإلكترونات الضوئية المنطلقة؟

الحل : (أ)

$$\lambda_c = \frac{hc}{W_o} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^8\ m/s)}{(4.31\ eV)(1.6 \times 10^{-19}\ J/eV)} = 288\ nm$$

(ب) أقل تردد هو تردد القطع :

$$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3 \times 10^8\ m/s}{288 \times 10^{-9}\ m} = 1.04 \times 10^{15}\ Hz$$

(ج)

$$E_{k_{max}} = E - W_o = 5.5 - 4.31 = 1.19\ eV$$

فهرست الفصل الثاني

الموضوع	الصفحة
٢-١: طبيعة الضوء والاشعاع الكهرومغناطيسي	١
٢-٢: الإشعاع الحراري	٤
٢-٣: انبعاث وامتصاص الإشعاع	٥
٢-٤: إشعاع الجسم الاسود	٦
٢-٥: طيف إشعاع الجسم الاسود	٧
٢-٥-١: قانون إزاحة ڤين	٩
٢-٦: صيغة ريلي- جينز	١٠
٢-٧: قانون بلانك للإشعاع	١١
٢-٨: الظاهرة الكهروضوئية	١٣
٢-٨-١: العلاقة بين جهد الإيقاف وتردد الضوء الساقط	١٥
٢-٩: تفسير آينشتاين للظاهرة الكهروضوئية	١٦
٢-١٠: تطبيقات الظاهرة الكهروضوئية	١٨
أسئلة	٢٠
مسائل محلولة	٢٢

مصادر الفصل الثاني

١- الفيزياء الذرية، د. طالب ناهي الخفاجي و د. عباس حمادي و د. هرمز موشي، 1980.

2- Concepts of Modern Physics, Arthur Beiser, 6th Edition, 2003.

3- Fundamentals of physics- Halliday, Resnick, Walker—10th Edition. 2014

4- Introduction to Atomic and Nuclear Physics, Semat and Albright, 5th Edition, 1972.

5- Modern Physics, Paul A. Tipler and Ralph A. Llewellyn, 6th Edition, 2012.

6- Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, Serway and Jewett, 9th Edition. 2014.

7- University Physics with Modern Physics, Young & Freedman, 15th Edition, 2020.