د. مُظفر جاسم
2018

الفصل الثاني

الإشعاع الكهرومغناطيسي

The Electromagnetic Radiation

2-1: طبيعة الضوء والاشعاع الكهرومغناطيسي

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 هويكنز 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. وفي حالة مهمة كان 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 الثامن عشر حيث أثبت كل من فوكو Foucault وفيزو Fizeau أن سرعة الضوء في وسط كثيف (الماء) كانت أبطأ مما في الفراغ مما عزز النظرية الموجية التي أصبحت النظرية الوحيدة التي استطاعت بنجاح شرح كل الظواهر البصرية optical phenomena المعروفة آنذاك للضوء. وبالرغم من أن النظرية الموجية للضوء قد تم تعريفها حينئذ لكن طبيعة الموجات بقيت لغزاً. وقد اعتُقِد أولاً أن هذه الموجات كانت مشابهة للموجات المستعرضة في الوسط الصلب المرن، حيث اعتُبِر أن الأثير يمتلك بعض صفات الوسط الصلب المرن، وكان يُعتقد أن الأثير هو الوسط تام المرونة الذي يُفترض أن 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 مما زوّد النظرية الموجية بالأساس الرياضي الدقيق. ثم استطاع هيرتز Hertz عام 1887 توليد موجات كهرومغناطيسية بواسطة تيار متذبذب مما أثبت صحة نظرية ماكسويل.

وقد يظن 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، لكن هنالك 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، ويدعى كل من هذه الجسيمات بكَمِّ الطاقة quantum ، وقد سُميت بالفوتونات photons . ويمتلك الفوتون طاقة تتناسب مع تردد الإشعاع f بحيث:

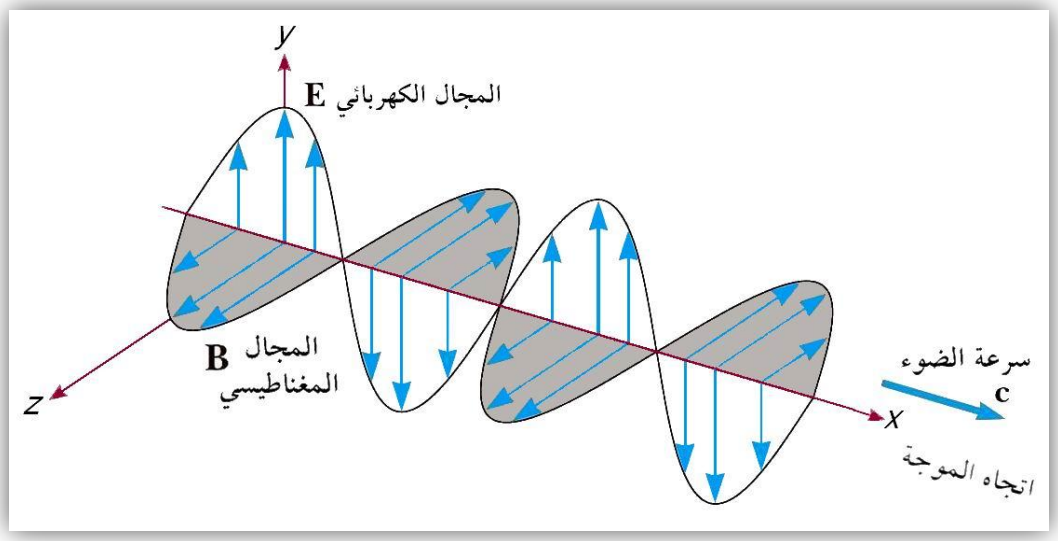
$$E = hf \qquad \dots\dots 2.1$$

و h هو ثابت التناسب والذي يُعرف الآن بثابت بلانك.

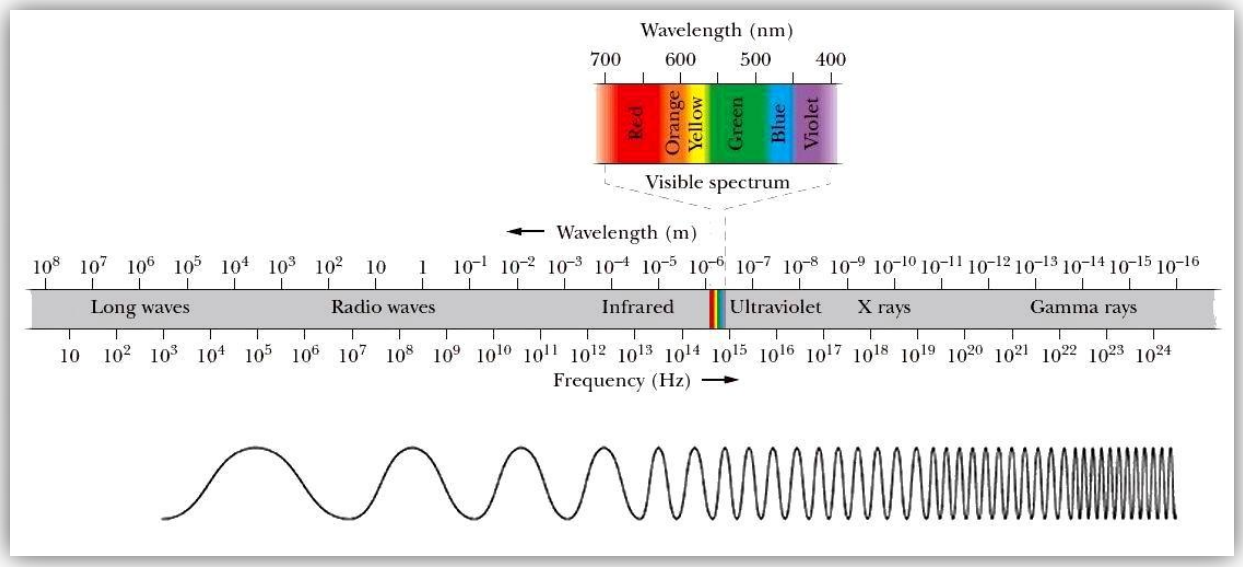
إن أكبر دعم لهذه النظرية جاء من قبل آينشتاين عام 1905 بتفسيره للظاهرة الكهروضوئية، وأعقب هذا نظرية ذرة الهيدروجين لبور Bohr عام 1913 والذي نجح في تفسير أصل الأطياف الخطية للهيدروجين وبدأ بتطوير نظرية بور- رذرفورد للذرة ذات النواة. وكل هذا مع ظواهر أخرى أثبت أن الإشعاع الكهرومغناطيسي يمتلك طبيعة مزدوجة 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 بأن السلوك الجسيمي يسود خلال التفاعل 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 الظاهرة.

إن موجات الضوء وباقي الإشعاع الكهرومغناطيسي هي ذات مجال كهربائي مهتز يتعامد مع مجال مغناطيسي مهتز ويتفق معه في الطور، وكلا المجالَين متعامد مع اتجاه الانتشار كما في الشكل 2-1. كما إن الضوء لا يختلف عن باقي الموجات الكهرومغناطيسية من حيث الطبيعة الأساسية، فموجات الراديو والرادار 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 وتنطبق نظرية ماكسويل عليها. وما عدا اختلافها بالتردد فإن القياسات التي تصح لنوع واحد منها يجب أن تكون صحيحة لباقي الأنواع. ويعتمد العديد من ميزات تفاعلها مع المادة على ترددتها وبالتالي على طاقاتها. وتشكل

موجات الضوء، وهي الموجات التي تستجيب لها العين، حيزاً صغيراً من الترددات، حيث تنحصر ما بين التردد $4.3 \times 10^{14} Hz$ تقريباً للضوء الأحمر (حوالي $700nm$) والتردد $7.5 \times 10^{14} Hz$ تقريباً للضوء البنفسجي ($400nm$). ويبين الشكل 2-2 الطيف الكهرومغناطيسي.



الشكل 2-1: المجالان الكهربائي والمغناطيسي في موجة كهرومغناطيسية.



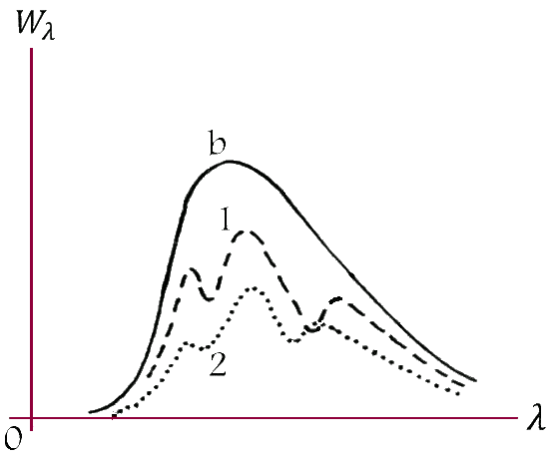
الشكل 2-2: طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي.

2-2: الإشعاع الحراري Thermal Radiation

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

بعث الإشعاع فإن الجسم سيمتص أيضاً الإشعاع الساقط عليه. وسيكون السطح الصقيل ضعيف الإشعاع والامتصاص، بينما يكون السطح الخشن أو الأسود باعثاً وماصاً جيداً للإشعاع. كما إن الإشعاع الحراري لا يتطلب وسطاً كي ينتقل بل يمكنه الانتقال عبر الفراغ كما تفعل أشعة الشمس.

ويتألف الإشعاع المنبعث من توزيع متصل للأطوال الموجية من جميع أجزاء الطيف الكهرومغناطيسي. وإذا كان الجسم في درجة حرارة الغرفة فإن الأطوال الموجية للإشعاع الحراري تقع بصورة أساسية في منطقة الأشعة تحت الحمراء، وبالتالي لن تراها العين البشرية. وإذا ازدادت درجة حرارة السطح فسوف يتوهج بلون أحمر. وعند درجات حرارة عالية بما فيه الكفاية يظهر الجسم متوهجاً باللون الأبيض كما في المصابيح المتوهجة. ولفهم الموضوع أكثر يُمرَّر إشعاع جسم ساخن خلال أجهزة مفرقة مثل المطياف ذي الموشور أو المحزز. وعند قياس طاقة الإشعاع المنبعث لسلسلة من الترددات ورسم منحنى بياني بين الإنبعاثية أحادية اللون W_λ monochromatic emittance وطول موجة الإشعاع نحصل على المنحنى رقم 1 في الشكل 2-3، وعند إعادة التجربة على جسم آخر من مادة مختلفة بنفس درجة الحرارة نحصل على المنحنى المنقط رقم 2. وتُعرف الإنبعاثية أحادية اللون بأنها كمية الطاقة المُشَعة في وحدة الزمن من وحدة مساحة السطح الباعث ضمن مدى الطول الموجي $d\lambda$. ويتضح من الشكل أن كفاءة إشعاع الجسم الأول أعلى من كفاءة الثاني ولمدى كبير من الطول الموجي. وعند دراسة عدد كبير ومختلف من المواد بنفس درجة الحرارة نحصل على عدد كبير من المنحنيات ليس لأي منها تلك الإنبعاثية التي يمثلها المنحنى المتصل b، والذي يمثل طيف الجسم الأسود.



الشكل 2-3: الإنبعاثية أحادية اللون.

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

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

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

2- إن كان الجسم أبرد من المحيط فإن معدل امتصاصه سيكون أكبر من معدل إشعاعه، وسترتفع درجة حرارته لأنه يمتص الطاقة من المحيط.

3- إذا كان الجسم والمحيط بنفس درجة الحرارة فإن معدل الإشعاع والانبعاث سيساوي معدل الامتصاص، ولا توجد زيادة أو نقصان صافي في الطاقة، ولا يحدث تغيير في درجة الحرارة.

ويتضح من الشكل 2-3 أن الانبعاثية W_λ لسطح ما تختلف باختلاف الطول الموجي، كما يتضح أيضاً من الشرح السابق أنها تكون أكبر عند درجة حرارة أعلى. ولفهم الموضوع بصورة أكبر نفترض سقوط حزمة إشعاع أحادي اللون على عدد من الأجسام المعتمة (غير الشفافة) وهي في حالة توازن حراري مع المحيط، وهذه الأجسام لا تسمح للإشعاع بإختراقها، 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:

$$a + r = 1 \qquad \ldots\ldots 2.2$$

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 به: $W_1, W_2, \ldots$.

وعند تحقق شرط التوازن الحراري بين الأجسام ستنتج العلاقة التالية:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{a_1}{a_2} \quad , \quad or \quad \frac{W_1}{a_1} = \frac{W_2}{a_2} \quad , etc \qquad \ldots\ldots 2.3$$

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.

2-4: إشعاع الجسم الاسود Blackbody Radiation

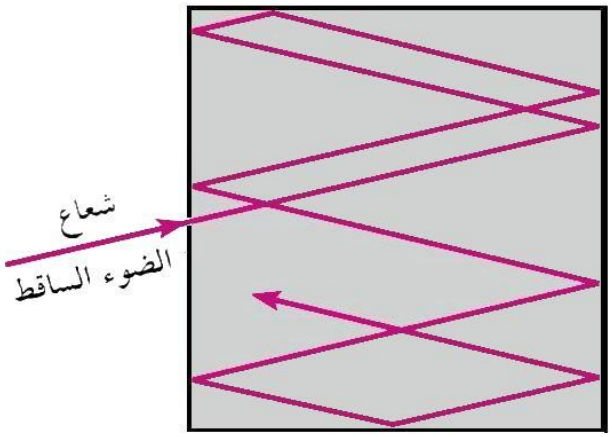
يعرف الجسم الأسود بأنه النظام المثالي الذي يمتص كل الإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط عليه ولا يعكس شيئاً منه، ولهذا يظهر باللون الأسود. ويسمى الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من الجسم

الأسود إشعاع الجسم الأسود. ويكون معامل الامتصاص حينئذ مساوياً لـ 1 $(a_b = 1)$ ومعامل الانعكاس يساوي صفراً $(r_b = 0)$. لذا تصبح المعادلة 2.3 بالشكل التالي:

$$\frac{W_1}{a_1} = \frac{W_2}{a_2} = \frac{W_b}{1} = W_b \qquad \ldots\ldots 2.4$$

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 يُستخدم جسم مجوف في جداره ثقب صغير كما هو مبين في الشكل 2-4. وأي إشعاع يسقط على الثقب من الخارج يدخل إلى الحجرة وينعكس عدة مرات إلى أن 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 داخله مما يؤدي إلى الامتصاص التام للإشعاع الداخل بغض النظر عن طبيعة جدران الجسم الأسود. وعند إهمال تأثير المادة المكونة للحجرة (أو الجسم الأسود) يبقى المتغير المهم هو درجة الحرارة فقط.



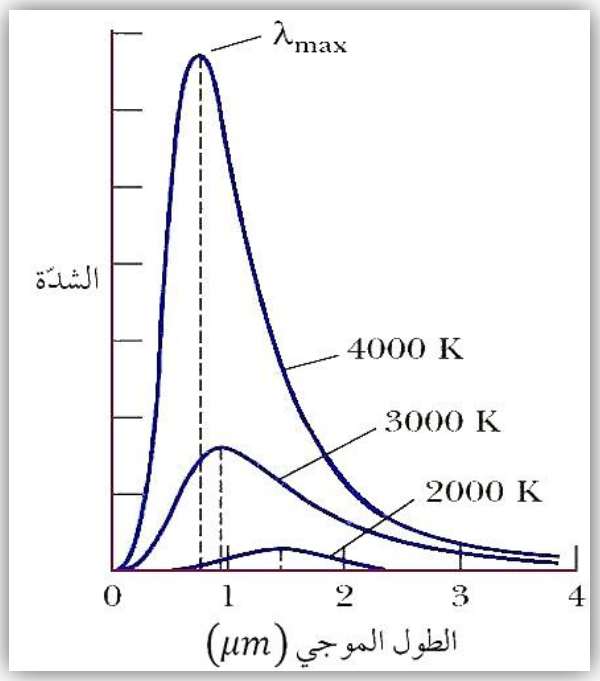
الشكل 2-4: ثقب في جدار جسم مجوف.

إن الجسم الأسود يشع أكثر عندما يكون ساخناً 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 المحيط، ويكون باعثاً مثالياً عندما تكون درجة حرارته أعلى من درجة حرارة المحيط.

2-5: طيف إشعاع الجسم الاسود Blackbody Radiation Spectrum

ينشأ الإشعاع الحراري – من وجهة نظر الفيزياء التقليدية – من جسيمات مشحونة معجلة في الذرات الواقعة بالقرب من سطح الجسم، وتلك الجسيمات المشحونة تبعث الإشعاع مثل ما تفعل الهوائيات

الصغيرة. 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 كافية. وكانت المشكلة الأساسية في فهم التوزيع الملحوظ للأطوال الموجية في الإشعاع المنبعث من الجسم الأسود. ويبين الشكل 2-5 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 2-5: علاقة شدة إشعاع الجسم الأسود مع الطول الموجي لثلاث درجات حرارية.

وتتناسب الطاقة المشَعة في وحدة الزمن لوحدة المساحة من الجسم المشع 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

$$P = \sigma A \mathcal{E} T^4 \quad \ldots\ldots 2.5$$

حيث P: القدرة بالواط المشَعة عند كل الأطوال الموجية من سطح الجسم،

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

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:

$$R = \sigma T^4 \quad \ldots\ldots 2.6$$

حيث R: نسبة القدرة المشَعة بواسطة جسم أسود إلى وحدة المساحة عند الدرجة T.

كما وجد فين Wien أنه عند تغيير درجة حرارة أي جسم أسود فإن المنحنى يحتفظ بشكله العام، ولكن نهايته العظمى تزاح نحو أطوال موجية أقصر مع ازدياد درجة الحرارة، لاحظ الشكل 2-5، 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 Wien's displacement law :

$$\lambda_{max}\, T = 2.898 \times 10^{-3}\ m.K \qquad \ldots\ldots 2.7$$

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

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 2-5 أن المساحة تحت المنحنى (والتي تتناسب طردياً مع الإنبعاثية) تزداد بزيادة درجة الحرارة مما يؤكد قانون ستيفان- بولتزمان.

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

6-2: قانون ريلي- جينز Rayleigh–Jeans Law

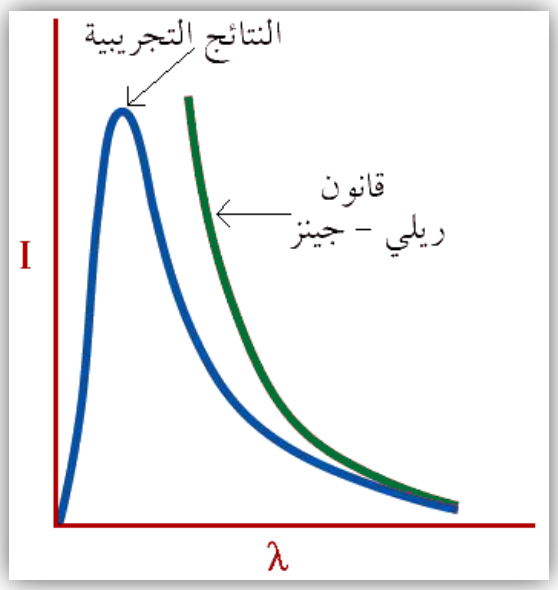
إن النظرية الناجحة لإشعاع الجسم الأسود يجب أن تتوقع شكل المنحنيات في الشكل 2-5، وكذلك صيغة درجة الحرارة T^4 المذكورة في قانون ستيفان وأيضاً زحزحة الذروة عند تغير درجة الحرارة التي وصفها قانون إزاحة ڤين. وقد فشلت المحاولات المبكرة لاستخدام الأفكار التقليدية لشرح أشكال المنحنيات المذكورة. ولدراسة إحدى هذه المحاولات سنُعَرف $I(\lambda,T)d\lambda$ على أنها الشدة أو القدرة لوحدة المساحة المنبعثة خلال مدى الطول الموجي $d\lambda$، أي:

$$\frac{\text{القدرة}}{\left(\text{وحدة المساحة للباعث}\right)\left(\text{وحدة الطول الموجي}\right)} = \frac{\text{الشدة}}{\text{وحدة الطول الموجي}} = I(\lambda,T)$$

وقد استندت نتيجة الحسابات على نظرية تقليدية لإشعاع الجسم الأسود تُدعى قانون ريلي- جينز Rayleigh–Jeans والذي يصاغ بالشكل:

$$I(\lambda,T) = \frac{2\pi c k_B T}{\lambda^4} \qquad \ldots\ldots 2.8$$

حيث k_B : ثابت بولتزمان، وقيمته ($k_B = 1.38 \times 10^{-23} J/K = 8.62 \times 10^{-5} eV/K$). وكما مرّ فإنه تم تمثيل الجسم الأسود على أنه الثقب المؤدي إلى جسم مجوف (الشكل 2-4) يدخل 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 ويُنتج أنماط تذبذب في المجال الكهرومغناطيسي بسبب الشحنات المعجلة في جدران الحجرة وستنبعث موجات كهرومغناطيسية في جميع الأطوال الموجية وتتكون موجات واقفة standing wave[1] لكل تردد. وسيخرج جزء صغير من هذا الإشعاع من الثقب ليتم تحليل طيفه. ولما كانت المنظومة في حالة توازن حراري فالإشعاع الممتص من الجدران الداخلية للحجرة يجب أن يساوي الإشعاع الذي تبعثه المتذبذبات الذرية على جدران التجويف. وقد فرض وفق النظرية التقليدية المستخدمة في اشتقاق المعادلة 2.8 أن معدل الطاقة لكل طول موجة من أنماط الموجات الواقفة يتناسب مع $k_B T$.



الشكل 2-6: النتائج التجريبية ومنحنى قانون ريلي- جينز لتوزيع إشعاع الجسم الأسود.

ورُسم في الشكل 2-6 مخطط تجريبي لطيف إشعاع الجسم الأسود والتوقع النظري لقانون ريلي- جينز. ويبدو قانون ريلي- جينز في الأطوال الموجية الطويلة في اتفاق معقول مع البيانات التجريبية، ولكن الخلاف يبدو واضحاً في الموجات القصيرة، فعندما تقترب λ من الصفر فإن الشدة $I(\lambda, T)$ المعطاة بالمعادلة 2.8 تقترب من اللانهاية. وبالتالي فإنه وفق النظرية التقليدية (التي قامت على أسسها حسابات ريلي- جينز) يجب أن تصبح الطاقة المنبعثة من أي جسم أسود لانهائية عند الأطوال الموجية القصيرة. وعلى النقيض من هذا التنبؤ، تظهر البيانات التجريبية التي تم رسمها في الشكل 2-6 أنه عند اقتراب λ من الصفر فإن $I(\lambda, T)$ تقترب أيضاً من الصفر. وذلك يمثل فشلاً ذريعاً لصيغة ريلي - جينز.

[1] هي الموجة التي تكون إحدى نقاطها ذات موضع ثابت غير متحرك، وتكون سعة هذه الموجة عند باقي النقاط متغيرة مع الوقت، ولكن طورها يبقى ثابتاً.

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

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

1- إن إشعاع تجويف الحجرة جاء من تذبذبات ذرية في الجدران الداخلية.

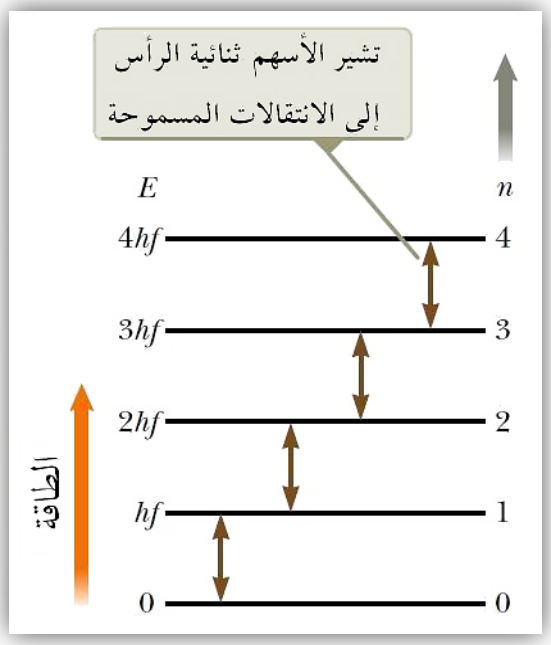
2- لا تأخذ طاقة المتذبذب أي قيمة كانت من الصفر إلى ما لا نهاية، بل تأخذ قيماً منفصلة محدَّدة فقط هي مضاعفات لقيم صغيرة جداً hf:

$$E_n = nhf \qquad \ldots\ldots 2.9$$

حيث n: عدد كمي quantum number موجب صحيح، و f: تردد المتذبذب، و h: هو ثابت اقترحه بلانك يُعرف الآن بثابت بلانك. وبالتالي تكون طاقة المتذبذب متقطعة ومنفصلة أي مكممة quantized وليست متصلة كما كان شائعاً في ذلك الوقت، وكل قيمة طاقة منفصلة تكون متطابقة مع حالة كمية مختلفة ممثَلة بالعدد الكمي n. وعندما يكون المتذبذب في الحالة الكمية $n = 1$ تكون طاقته hf، وعندما يكون في الحالة الكمية $n = 2$ تكون طاقته هي $2hf$. وهكذا.

3- تبعث المتذبذبات أو تمتص الطاقة عند إجراء انتقال من حالة كمية إلى أخرى. وينبعث أو يُمتص فرق الطاقة بكامله ككم واحد من الإشعاع بين الحالتين الابتدائية والنهائية خلال الانتقال. وإذا كان الانتقال من حالة ما إلى حالة مجاورة أدنى (مثلاً من الحالة $n = 3$ إلى الحالة $n = 2$) فإن المعادلة 2.9 تبين أن كمية الطاقة المنبعثة من المتذبذب والتي تُحمل من قبل كم الإشعاع هي:

$$E = hf \qquad \ldots\ldots 2.10$$



الشكل 2-7:
مستويات الطاقة المسموحة لمتذبذب بتردد f.

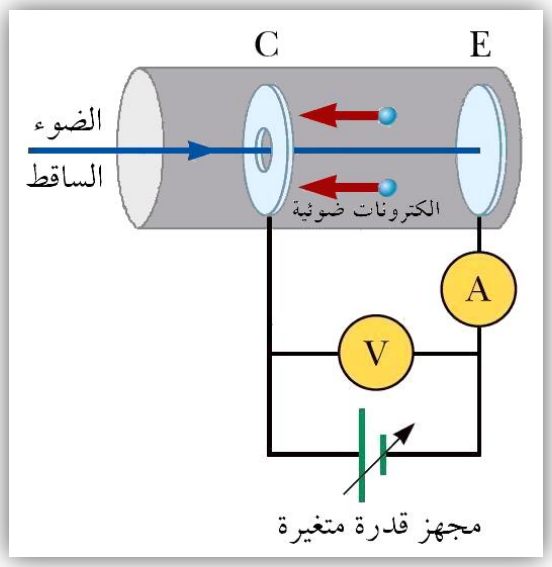
ووفق الفقرة 3 أعلاه، يبعث المتذبذب أو يمتص الطاقة عندما تتغير حالاته الكمية فقط. وإذا بقي في حالة كمية واحدة فلا يتم امتصاص الطاقة ولا انبعاثها. ويوضح الشكل 2-7 مستويات الطاقة المكممة والانتقالات المسموح بها التي اقترحها بلانك. وقد توصل بلانك لصيغة نظرية لتوزيع الطول الموجي متفقة بشكل جيد مع المنحنيات التجريبية في الشكل 2-5 ولكل الأطوال الموجية:

$$I(\lambda,T)=\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5(e^{(hc/\lambda k_BT)}-1)} \qquad \dots\dots 2.11$$

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.

2-8: الظاهرة الكهروضوئية Photoelectric Effect

كان إشعاع الجسم الأسود أول ظاهرة شُرحت وفق النموذج الكمي. وفي أواخر القرن 19 ظهر من بعض التجارب أن الضوء الساقط بتردد عالٍ بما يكفي على سطوح معدنية محدَّدة يسبب انبعاث إلكترونات منها. وتُعرف هذه الظاهرة بالتأثير الكهروضوئي، والإلكترونات المنبعثة تُدعى بالإلكترونات الضوئية.

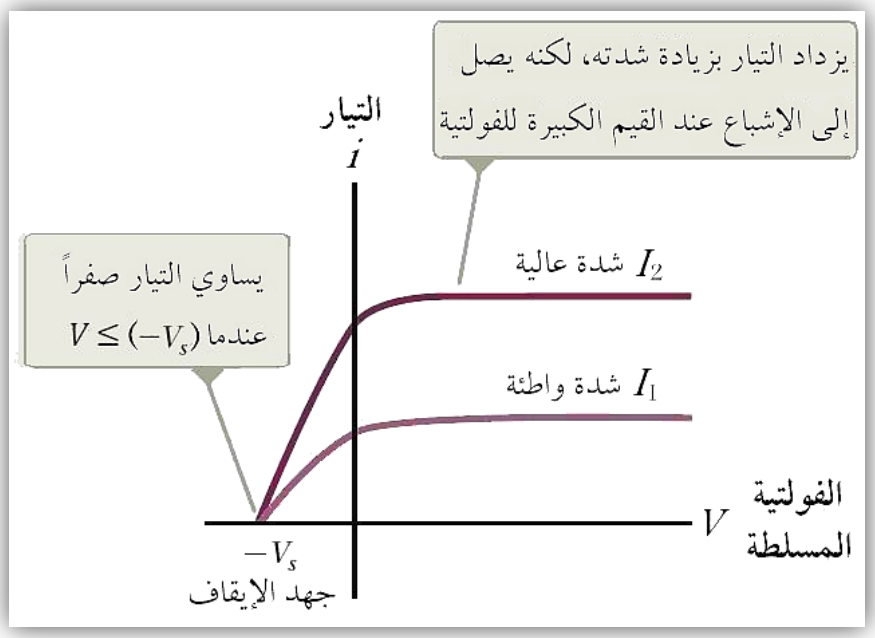


الشكل 2-8:
مخطط جهاز لدراسة التأثير الكهروضوئي

ويمثل الشكل 2-8 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، مما 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 2-9 مخططاً للتيار الكهروضوئي مقابل فرق الجهد V المسلط بين الصفيحتين E و C لشِدَّتي ضوء مختلفتين. حيث بزيادة شدة الضوء من I_1 إلى I_2 يزداد التيار الكهروضوئي بنفس النسبة لكل

قيم V لأن زيادة الشدة تعني زيادة عدد الفوتونات الساقطة على القطب الباعث E مما يزيد من احتمالية التصادم بين الفوتونات والإلكترونات، وبالتالي سيزداد إنبعاث الإلكترونات، أي يزداد التيار i. لكن هذه الزيادة في التيار لا تستمر بل يصل التيار لقيمة قصوى لا يزداد بعدها لكل قيم V المتزايدة، وتتجمع جميع الإلكترونات المنبعثة من القطب الباعث عند القطب الجامع.



الشكل 2-9: اختلاف التيار الكهروضوئي والجهد المسلط بين شدتي ضوء.

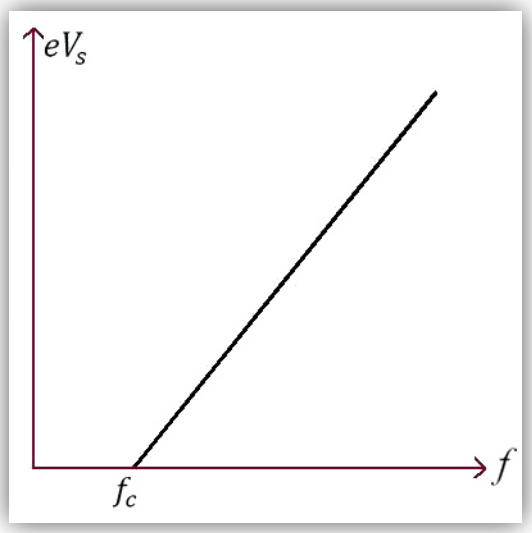
وعندما تكون V سالبة، أي عندما يتم عكس البطارية في الدائرة لجعل الصفيحة E موجبة والصفيحة C سالبة، فإن التيار سينخفض بشكل حاد ويصل إلى الصفر عند الجهد V_s لأن العديد من الإلكترونات الضوئية المنبعثة من E سيتم صدها من قبل الصفيحة C السالبة حالياً. وفي هذه الحالة فإن تلك الإلكترونات الضوئية التي تمتلك طاقة حركية أكبر من $e|V|$ ستصل هي فقط إلى الصفيحة C، حيث e: قيمة الشحنة على الإلكترون. وعندما يكون فرق الجهد V مساوياً لـ $(-V_s)$ أو أكثر سلبية منه فلا تصل الإلكترونات الضوئية إلى الصفيحة C ويكون التيار صفراً. ويُدعى V_s جهد الإيقاف stopping potential للتردد المعَين. ويُلاحظ من الشكل 2-9 أن جهد الإيقاف لا يعتمد على شدة الإشعاع لأنه بالرغم من تغيير شدة الضوء الساقط بقيت قيمة V_s نفسها، لأن زيادة الشدة تعني زيادة عدد الفوتونات الساقطة بينما تبقى الطاقة ثابتة. كما إن الطاقة الحركية للإلكترونات المنبعثة من السطح لا تتجاوز قيمة قصوى معينة $E_{k_{max}}$ يمكن حسابها من المعادلة:

$$E_{k_{max}} = eV_s = \frac{1}{2}mv_{max}^2 \qquad \ldots\ldots 2.12$$

أما الإلكترونات التي تترك السطح الباعث بطاقات حركية أقل من الطاقة القصوى فتتوقف بتأثير فروق جهد أقل من V_s. وهذا يفسر تناقص التيار عندما يصبح فرق الجهد بين الصفيحتين سالباً. ولأن $(E_{k_{max}} = eV_s)$ فإن $E_{k_{max}}$ للإلكترونات الضوئية لا تعتمد على شدة الضوء أيضاً ولكلا المنحنيين الّذَين يهبطان إلى الصفر عند نفس الجهد السلبي كما في الشكل 2-9.

تمت دراسة اعتماد جهد الإيقاف على تردد الضوء من قبل ميليكان عام 1916، ويمكن تمثيل نتائج تجارب ميليكان بالشكل 2-10، حيث رُسمت eV_s أو $E_{k_{max}}$ مقابل تردد الضوء الساقط على السطح. والمنحنى هو خط مستقيم يُعطى بالعلاقة:

$$E_{k_{max}} = eV_s = h(f - f_c) = hf - hf_c \quad \ldots\ldots 2.13$$



الشكل 2-10: العلاقة بين جهد الإيقاف وتردد الإشعاع الساقط.

حيث h: ميل الخط المائل وهو ثابت بلانك، و f_c: أقل تردد يمكن أن يسبب انبعاث إلكترون من السطح، ويُعْرف بتردد العتبة threshold frequency أو تردد القطع cutoff frequency ويعتمد على طبيعة السطح. وعند إعادة التجربة لترددات مختلفة للضوء الساقط 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، وعند استخدام ترددات أقل من تردد القطع سوف لا تحدث الظاهرة الكهروضوئية ولا تنبعث إلكترونات ضوئية من المعدن مهما كانت قيمة شدة الضوء الساقط، ويكون جهد الإيقاف في هذه الحالة صفراً، ولكن عند زيادة التردد 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.

2-9: تفسير آينشتاين للظاهرة الكهروضوئية

لا يمكن تفسير الاعتماد المباشر لطاقة الإلكترونات الضوئية على تردد الضوء الساقط من خلال النظرية الموجية الكهرومغناطيسية للضوء، لأنه وفق هذه النظرية التقليدية يجب أن تكون هناك علاقة بين شدة الضوء الساقط وطاقة الإلكترونات الضوئية. ولتفسير 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 hf تُعطى بأكملها إلى أحد إلكترونات المعدن. وعندما يتحرر إلكترون من سطح المعدن فإنه سيمتلك طاقة حركية مقدارها:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = hf - W = E - W \qquad \ldots\ldots 2.14$$

حيث W: الشغل اللازم لتحرير إلكترون من المعدن. وستكون المعادلة 2.13 مماثلة للمعادلة 2.14 للإلكترونات التي تتحرر بطاقات حركية قصوى. ولا تحتاج جميع الإلكترونات لنفس الطاقة كي تترك سطح المعدن، فلو كانت W_o تمثل قيمة أقل طاقة يحتاجها الإلكترون لكي يتحرر من المعدن، والتي تُسمى دالة الشغل work function فالطاقة الحركية العظمى للإلكترون المنبعث هي:

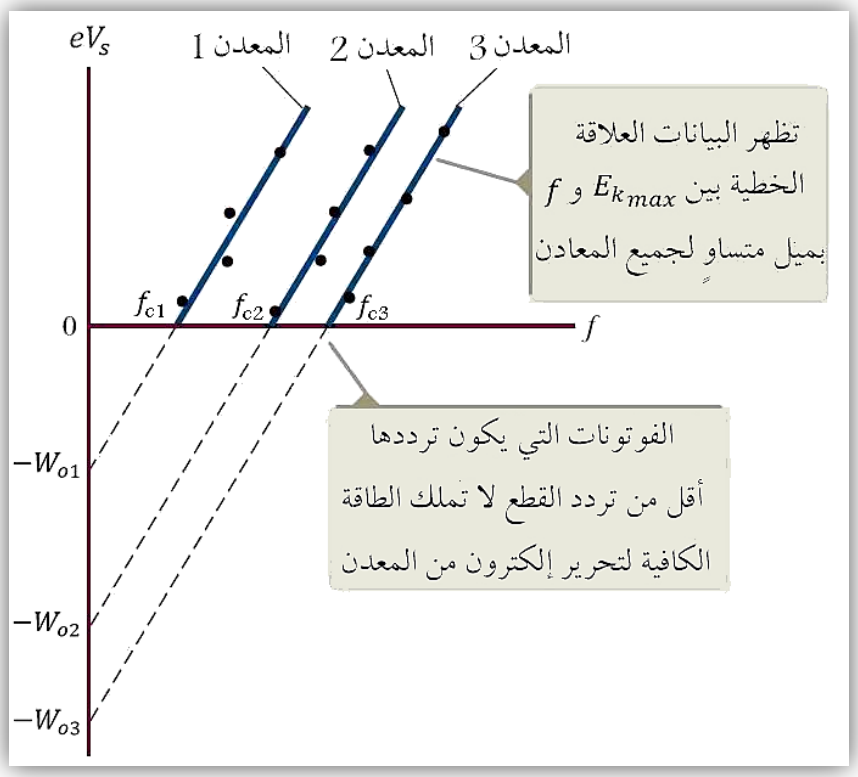
$$E_{k_{max}} = E - W_o = hf - W_o \qquad \ldots\ldots 2.15$$

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 2-11. وميل الخطوط في هذا الرسم هو ثابت بلانك h. وتقطع هذه الخطوط المحور الأفقي بنقاط تمثل جهد القطع الذي لا تنبعث الإلكترونات الضوئية أسفل منه في الرسم. وبطرح المعادلة 2.13 من المعادلة 2.15 ينتج:

$$0 = hf_c - W_o \quad \rightarrow \quad hf_c = W_o \qquad \ldots\ldots 2.16$$

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

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{c}{W_o/h} = \frac{hc}{W_o} \qquad \ldots\ldots 2.17$$



الشكل 2-11: مخطط تجارب إثبات علاقة آينشتاين بين جهد إيقاف الإلكترونات الضوئية وتردد الضوء الساقط على عدة معادن.

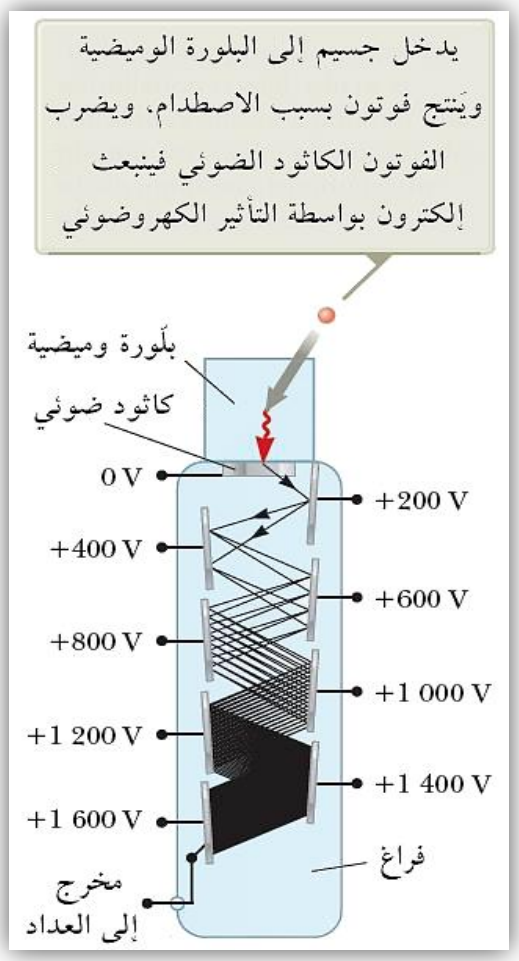
ومن الجدير بالذكر أن الظاهرة الكهروضوئية لا تقتصر على تأثير الضوء في السطوح المعدنية، فهي قد تحصل في الغازات والسوائل أيضاً. كما إنها ليست مقتصرة على الضوء فقط وإنما تشمل مدى واسعاً من الأمواج الكهرومغناطيسية ابتداءً بالقصيرة جداً أشعة گاما والأشعة السينية إلى المناطق فوق البنفسجية والمرئية وتحت الحمراء.

10-2: تطبيقات الظاهرة الكهروضوئية Applications of Photoelectric Effect

للظاهرة الضوئية 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 the phototube الذي يعمل كمفتاح في الدائرة الكهربائية ويُنتج تياراً في الدائرة عندما يسقط ضوء بترددٍ كافٍ على صفيحة معدنية في الأنبوب الضوئي، ولكنه لا يولد أي تيار في الظلام. وقد استُخدم في أجهزة التحذير من السرقة.

واليوم يتم استخدام التأثير الكهروضوئي في أنابيب المضاعف الضوئي the photomultiplier tubes، ويبين الشكل 2-12 تركيب هكذا جهاز. وفيه يسقط فوتون على كاثود ضوئي photocathode[1] ويحرر إلكتروناً بواسطة التأثير الكهروضوئي. وسوف يتعجل هذا الإلكترون عبر فرق الجهد بين الكاثود الضوئي والدينود dynode[2] الأول الذي يزيد جهده بمقدار $200\ V$ بالنسبة للكاثود الضوئي في الشكل 2-12. وسوف يضرب إلكترون عالي الطاقة



الشكل 2-12: تضاعف الإلكترونات في أنبوب المضاعف الضوئي

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

[2] الدينود هو قطب كهربائي في أنبوب مفرغ يعمل كمضاعف إلكتروني من خلال الانبعاثات الثانوية.

الداينود ويحرر إلكترونات أكثر، والتي بدورها ستتعجل باتجاه قطب أعلى فولتية بـ $200\ V$ أيضاً. وتُكرر هذه العملية عبر سلسلة من الداينودات بفولتيات أعلى حتى تتولد نبضة إلكترونية مكونة من ملايين الإلكترونات وتضرب الداينود الأخير. والنتيجة أن دخول فوتون واحد سينتج بسببه ملايين الإلكترونات.

ويستخدم 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 المتجمع بواسطة مرقاب والقادم من نجم منفرد أن يسقط على أنبوب المضاعف الضوئي لمدة من الزمن. ويقيس الأنبوب إجمالي الطاقة المنقولة بواسطة الضوء خلال هذه الفترة الزمنية، والذي يمكن بعد ذلك تحويلها لمعرفة لمعان النجم.

أسئلة

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

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

3- إذا كان الجسم يشع حرارة حتى في درجة حرارة الغرفة فلماذا لا نلاحظ تغير لونه حينئذ؟

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

5- بين بالرسم خطأ قانون ريلي- جينز.

6- ما هو الخطأ في حسابات ريلي- جينز؟

7- ما هو الإشعاع الحراري؟

8- ما هو قانون كيرشوف للإشعاع رياضياً وفيزيائياً؟

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

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

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

12- ما هي العلاقة التي تربط بين معاملي الامتصاص والانعكاس؟ وما قيمة كل منهما للجسم الأسود؟

13- في الظاهرة الكهروضوئية، لماذا لا يعتمد جهد الإيقاف على شدة الإشعاع؟

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

15- هل يمكن تفسير الظاهرة الكهروضوئية وفق النظرية الموجية للضوء؟

16- 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؟

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

18- ما هي الإلكترونات الضوئية؟

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

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

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

22- 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.

23- 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.

24- كان نيوتن يعتقد أن الضوء ذو طبيعة .....

25- الرأي المستقر الآن هو أن للضوء طبيعتين هما .....

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

مسائل محلولة

(1) جد ذروة الطول الموجي لإشعاع الجسم الأسود المنبعث من جسم الإنسان عندما تكون درجة حرارة الجلد $35°C$.

الحل: يمكن إيجاد ذروة الطول الموجي من خلال قانون إزاحة ڤين $(\lambda_{max}\, T = 2.898 \times 10^{-3}\, m.K)$:

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

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

(2) 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 ذروة الطول الموجي للشمس.

الحل: (أ) من قانون ستيفان: $(P = \sigma A \mathcal{E} T^4)$. وإذا كانت الشمس تبعث الإشعاع كجسم أسود فإن إنبعاثية السطح $(\mathcal{E} = 1)$.

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

(ب) من قانون إزاحة ڤين:

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

(3) 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:

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

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

(ج) مرّ علينا في تعريف $I(\lambda,T)$ أنها القدرة لوحدة المساحة المنبعثة خلال مدى الطول الموجي، ولهذا فإن قانون بلانك يُكتب بالشكل التالي:

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

$$2\pi hc^2A=2\pi(6.626\times10^{-34}J.s)(3\times10^8m/s)^2(20\times10^{-4}m^2)$$
$$=7.49\times10^{-19}J.m^4/s$$

$$\frac{hc}{\lambda k_BT}=\frac{(6.626\times10^{-34}J.s)(3\times10^8m/s)}{(580\times10^{-9}m)(1.38\times10^{-23}J/K)(5000\,K)}=4.967$$

$$\therefore P=\frac{7.49\times10^{-19}J.m^4/s}{(580\times10^{-9}m)^5(e^{4.967}-1)}=8\times10^{10}\,W/m$$

(4) ضوء طول موجته 5893Å 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) $\because E_{k_{max}}=hf-W_o \;\Rightarrow\; W_o=hf-E_{k_{max}}=h\frac{c}{\lambda}-E_{k_{max}}$

$$\therefore W_o=\frac{(6.626\times10^{-34}J.s)(3\times10^8m/s)}{(5893\times10^{-10}m)(1.6\times10^{-19}J/eV)}-0.36\,eV=2.1\,eV-0.36\,eV$$
$$=1.74\,eV$$

(ج) $hf_c=W_o \;\Rightarrow\; f_c=\frac{W_o}{h}=\frac{1.74\,eV\times1.6\times10^{-19}J/eV}{6.626\times10^{-34}J.s}=4.2\times10^{14}Hz$

(5) 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:

$$\frac{R(T_2)-R(T_1)}{R(T_1)}\times100\%=\frac{15\,\sigma T^4}{\sigma T^4}\times100\%=1500\%$$

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

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

الحل :
$$E = hf = h\frac{c}{\lambda} = 6.626\times10^{-34}J.s\,\frac{3\times10^{8}m/s}{5000\times10^{-10}m} = 3.97\times10^{-19}J$$
$$= \frac{3.97\times10^{-19}J}{1.6\times10^{-19}J/eV} = 2.48\ eV$$

$$E_{k_{max}} = hf - W_o = 2.48 - 1.9 = 0.58\ eV$$
$$E_{k_{max}} = eV_s \quad \Rightarrow \quad V_s = \frac{E_{k_{max}}}{e} = \frac{0.58\ eV}{e} = 0.58\ V$$

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

الحل : (أ)
$$E_{k_{max}} = eV_s = hf - hf_c$$
$$hf_c = h\frac{c}{\lambda_c} = 6.626\times10^{-34}J.s\,\frac{3\times10^{8}m/s}{6525\times10^{-10}m} = 3.046\times10^{-19}J$$
$$hf = h\frac{c}{\lambda} = 6.626\times10^{-34}J.s\,\frac{3\times10^{8}m/s}{4000\times10^{-10}m} = 4.969\times10^{-19}J$$

$$\therefore E_{k_{max}} = 4.969\times10^{-19} - 3.046\times10^{-19} = 1.923\times10^{-19}J$$
$$= \frac{1.923\times10^{-19}J}{1.6\times10^{-19}J/eV} = 1.202\ eV = eV_s \quad \Rightarrow \quad V_s = 1.202\ V$$

(ب) لا يعتمد تردد القطع f_c على الشدة، وفي حالة إضاءة السطح بضوء تردده ضعف التردد المستخدم في الفرع "أ" سينتج:
$$E_{k_{max}} = h(2f) - hf_c = 2\times4.969\times10^{-19} - 3.046\times10^{-19} = 6.892\times10^{-19}J$$
$$= \frac{6.892\times10^{-19}J}{1.6\times10^{-19}J/eV} = 4.307\ eV = eV_s \quad \Rightarrow \quad V_s = 4.307\ V$$

(ج) عند استخدام معدن آخر يمتلك ضعف دالة الشغل، فسينتج للفرع "أ":
$$W_o = 2hf_c = 2\times3.046\times10^{-19}J = 6.092\times10^{-19}J$$

وهذه القيمة أكبر من قيمة طاقة الفوتون الساقط hf، أي: $(6.092\times10^{-19}J > 4.969\times10^{-19}J)$، ولهذا لا يوجد انبعاث كهروضوئي، أما في الفرع "ب" فتكون طاقة الفوتون الساقط:
$$2hf = 2\times4.969\times10^{-19}J = 9.938\times10^{-19}J$$
$$E_{k_{max}} = 9.938\times10^{-19} - 6.092\times10^{-19} = 3.846\times10^{-19}J$$

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

(8) يمتلك عنصر الموليبدينوم 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) يُعطى طول موجة القطع بالمعادلة 2.17:

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

ويقابله تردد قطع مقداره:

$$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3 \times 10^8 m/s}{296 \times 10^{-9} m} = 1.01 \times 10^{15} Hz$$

(ب) يمكن إيجاد جهد الإيقاف من المعادلتين 2.13 و 2.16:

$$eV_s = hf - W_o = h\frac{c}{\lambda} - W_o$$

$$\therefore V_s = \frac{hc}{e\lambda} - \frac{W_o}{e} = \frac{(6.626 \times 10^{-34} J.s)(3 \times 10^8 m/s)}{(1.6 \times 10^{-19} J/V)(180 \times 10^{-9} m)} - \frac{4.2\ eV}{e} = 2.7\ V$$

(9) 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 من هذه المعادن سيُظهر تأثيراً كهروضوئياً حينئذ؟ ثم بيِّن السبب.

(ب) جد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الضوئية لكل حالة.

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

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \times 10^{-34} J.s)(3 \times 10^8 m/s)}{400 \times 10^{-9} m} = 4.969 \times 10^{-19} J$$

$$= 4.969 \times 10^{-19} J \times \frac{1eV}{1.6 \times 10^{-19} J} = 3.11\ eV$$

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) لليثيوم،

$$E_{k_{max}} = E - W_o = 3.11\ eV - 2.3\ eV = 0.81\ eV$$

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

(10) حُرِّرت إلكترونات من سطح معدن بسرعات تصل إلى $(4.6 \times 10^5\ m/s)$ عند استخدام ضوء بطول موجة $625\ nm$. (أ) جد دالة الشغل للسطح. (ب) جد تردد القطع لهذا السطح.

الحل: الطاقة الحركية العظمى للإلكترون تُحسب من المعادلة 2.12:

$$E_{k_{max}} = \frac{1}{2}mv_{max}^2 = \frac{1}{2}(9.11 \times 10^{-31}\ kg)(4.6 \times 10^5\ m/s)^2$$

$$= 9.64 \times 10^{-20} J = 0.602\ eV$$

(أ) دالة الشغل:

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

$$W_o = \frac{(6.626 \times 10^{-34} J.s)(3 \times 10^8 m/s)}{(625 \times 10^{-9} m)} - 9.64 \times 10^{-20} J$$

$$= 3.18 \times 10^{-19} J - 9.64 \times 10^{-20} J = 2.22 \times 10^{-19} J$$

$$= 2.22 \times 10^{-19} J \times \frac{1eV}{1.6 \times 10^{-19} J} = 1.38\ eV$$

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

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

(11) 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 الفوتون للإشعاع 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) $$E_{k_{max}} = eV_s \quad \Rightarrow \quad V_s = \frac{E_{k_{max}}}{e} = \frac{1.93\ eV}{e} = 1.93\ V$$

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

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:

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

فهرست الفصل الثاني

الموضوع	الصفحة
2-1: طبيعة الضوء والاشعاع الكهرومغناطيسي	1
2-2: الإشعاع الحراري	3
2-3: انبعاث وامتصاص الإشعاع	4
2-4: إشعاع الجسم الاسود	5
2-5: طيف إشعاع الجسم الاسود	6
2-6: قانون ريلي- جينز	8
2-7: قانون بلانك للإشعاع	10
2-8: الظاهرة الكهروضوئية	11
2-9: تفسير آينشتاين للظاهرة الكهروضوئية	13
2-10: تطبيقات الظاهرة الكهروضوئية	15
أسئلة	16
مسائل محلولة	18

مصادر الفصل الثاني

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

2- Concepts of Modern Physics, Arthur Beiser, Sixth Edition.

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

4- Introduction to Atomic and Nuclear Physics, Semat and Albright, Fifth Edition.

5- Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, Serway and Jewett, 9th ed. 2014.