الفصل الأول

مفاهيم أساسية

Fundamental concepts

1-1 مقدمة Introduction

قبل دراستنا لموضوع الليزر، يجب أن تكون على دراية بالمصطلحات الأساسية المستخدمة لوصف الموجات الكهرومغناطيسية:

- الطول الموجي Wavelength (λ)
- التردد Frequency (ν)
- زمن الدورة Period (T)
- سرعة الضوء Velocity of light (c)
- معامل الأنكسار Index of refraction (n)

من المفضل أن يكون هناك فهم بـ:

- بعض المصطلحات من البصريات الهندسية Geometric Optics مثل: الانكسار والانعكاس، والعدسات الرقيقة الخ
- بعض المصطلحات من "الفيزياء الحديثة" Modern Physics مثل الفوتونات، نماذج الذرات، الخ

2-1 الإشعاع الكهرومغناطيسي في الفراغ Electromagnetic Radiation in Vacuum

- الإشعاع الكهرومغناطيسي Electromagnetic Radiation : هو موجة عرضية ينتقل في الفراغ بسرعة ثابتة تسمى سرعة الضوء.

جميع الموجات الكهرومغناطيسية لديها السرعة نفسها في الفراغ وقيمتها تقريبا:

$$c = 300{,}000\ [km/sec] = 3*10^8\ [m/sec] = 186{,}000\ [miles/sec]$$

واحدة من أهم المعايير للموجة هو الطول الموجي.

- الطول الموجي (Lambda) (μ) Wavelength : هي المسافة بين نقطتين الم تجاورة على موجة، والتي لها نفس الطور. وكمثال على ذلك (انظر الشكل (1)) المسافة بين قمتين متجاورتين للموجة.

بطريقة متوازية من الممكن تحديد الموجة من خلال ترددها.

- التردد (Nu) (ν) Frequency : هو عدد مرات تأرجح الموجة في الثانية الواحدة (عدد الفترات من التذبذبات في الثانية الواحدة).

توجد علاقة بين هذين المعاملين هي:

$$c = \lambda * \nu$$

من وجهة نظر الفيزياء، جميع الموجات الكهرومغناطيسية على قدم المساواة (لها نفس الخصائص) باستثناء الطول الموجي (أو التردد).

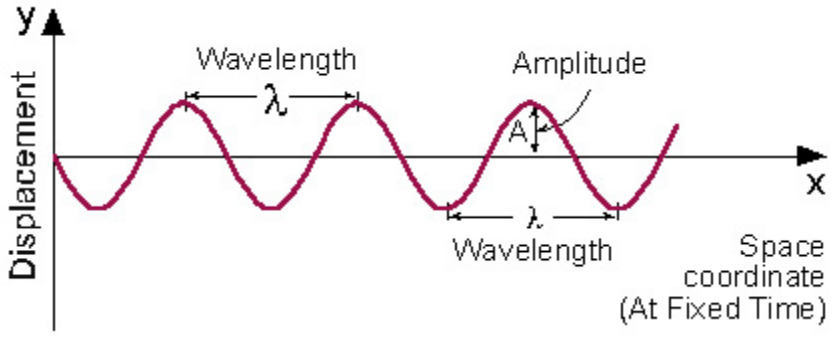
وكمثال على ذلك: سرعة الضوء هي نفسها للضوء المرئي، وموجات الراديو، أو الأشعة السينية.

3-1 وصف الموجة Wave Description

ويمكن وصف الموجة من خلال شكلين أساسيين:

1. الإزاحة بوصفها دالة للفضاء عندما يكون الزمن ثابت.
2. الإزاحة بوصفها دالة للزمن في مكان محدد من الفضاء.

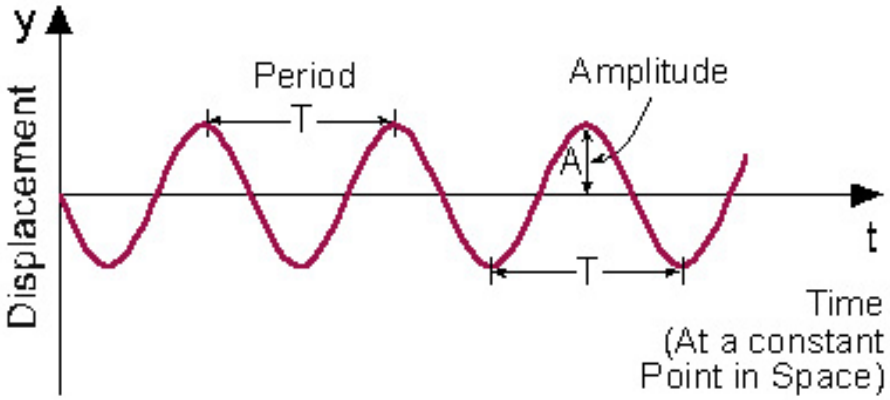
1 -الأزاحة بوصفها دالة للفضاء، وعندما يكون الزمن "مجمد" (ثابت)، كما هو موضح في الشكل (1) في هذا الوصف، الحد الأدنى للمسافة بين نقطتين متجاورتين من نفس الطور هو الطول الموجي (λ). لاحظ أن محور الأفقي (x) هو أحداثي الفضاء.



شكل (1): الأزاحة كدالة للفضاء (في زمن محدد)

- السعة (A) Amplitude هي أعظم أزاحة عن نقطة الأستقرار.

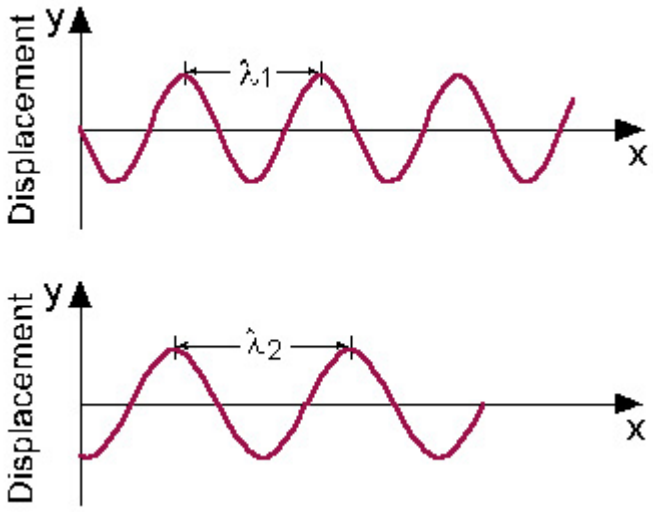
2 -الأزاحة بوصفها كدالة للزمن، في موقع معين في الفضاء، كما هو موضح في الشكل (2). في هذا الوصف، الحد الأدنى للمسافة بين نقطتين المجاورة في نفس الطور هي فترة (T). لاحظ أن المحور الأفقي (x) هو احداثي الزمن (t).



شكل (2): الأزاحة كدالة للزمن (عند نقطة محددة في الفضاء)

4-1 مقارنة الموجات Wavelengths Comparison

يصف الشكل (3) كيف تبدو دفعتين مختلفتين (بأطوال موجية مختلفة) في لحظة زمنية معينة. كل هذه الموجات يمكن وصفها بواسطة طول موجته الفريدة.

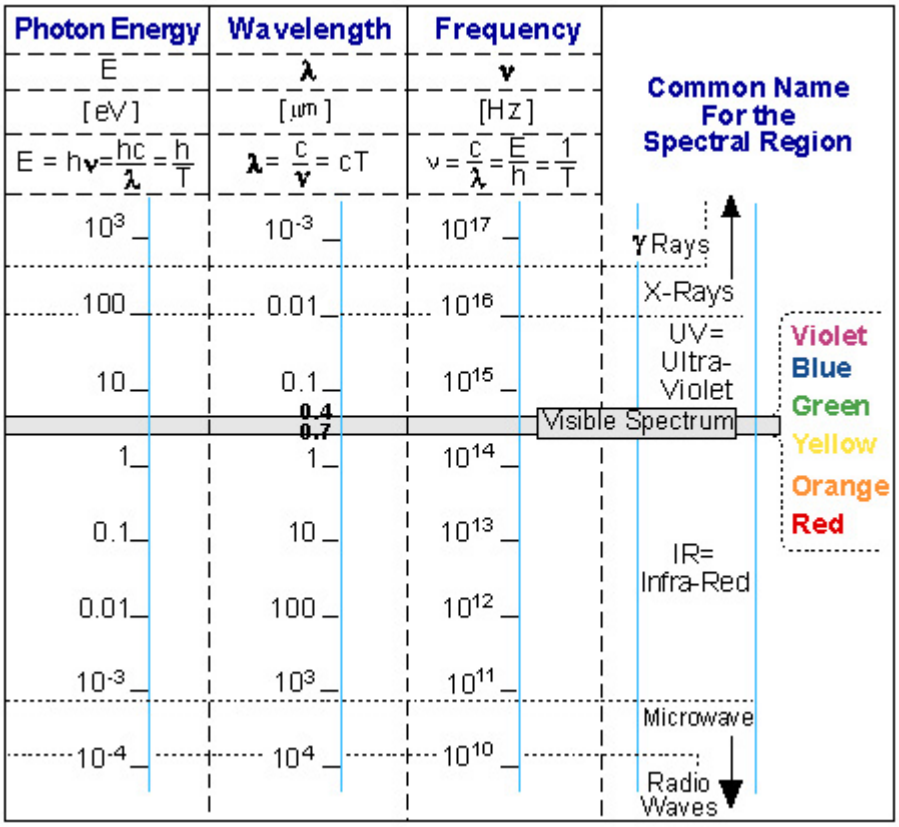


شكل (3): طول موجي قصير (λ_1) مقارن بطول موجي طويل (λ_2)

ويرتبط هذا الطول الموجي لنوع من الإشعاع للموجة للموجات الكهرومغناطيسية.

5-1 الطيف الكهرومغناطيسي The electromagnetic spectrum

يصف الشكل (4) الطيف الكهرومغناطيسي كل جزء من الطيف له اسم شائع، ومجموعه من أطوال الموجات والترددات والطاقات. الحدود بين الحزم ليست حادة و واضحة، ولكنها تعرف وفقا لتطبيقات الإشعاع في ذلك الجزء من الطيف.



الشكل (4): الطيف الكهرومغناطيسي

أهم الأفكار مستخلصة من الشكل (4) هي:

1. الموجات الكهرومغناطيسية تمتد عبر العديد من الرتب من حيث المقدار في الطول الموجي (أو التردد).

2. تردد الإشعاع الكهرومغناطيسي يتناسب عكسيا مع طول الموجة.

3. الطيف المرئي هو جزء صغير جدا من الطيف الكهرومغناطيسي.

4. زيادة طاقة الفوتون تكون مع انخفاض أو قصر الطول الموجي ، و تلك الفوتونات هي الأكثر نشاطا.

أمثلة للموجات الكهرومغناطيسية هي:

1. الموجات الراديوية التي لها طول موجي من رتبة الأمتار، لذلك هي بحاجة لهوائيات كبيرة (أبعاد هوائي تكون من نفس الترتيب من حيث مقدار الموجة).

2. الميكروويف والتي لها طول موجة برتبة (سم). كمثال: في فرن الميكروويف، لا يمكن أن تنتقل هذه الموجات من خلال شبكة الحماية المعدنية في الباب، في حين أن الطيف المرئي و الذي لهـ طول موجي أقصر بكثير يسمح لهـ بالمرور الى داخل فرن الميكروويف من خلال شبكة الحماية.

3. الأشعة السينية التي تستخدم في الطب لالتقاط الصور لهنية العظام داخل الجسم.

4. أشعة غاما التي هي حيوية جدا، بحيث تسبب التأين، وتصنف على أنها من الإشعاعات المؤينة.

ملاحظة: عمل جيمس كلارك ماكسويل (1831–1879) على التحليل النظري للموجات الكهرومغناطيسية ، ولخصها في معادلات تحمل اسمه (والتي هي خارج أهتمامنا), و الجوانب الكمية للإشعاع الكهرومغناطيسي هي نتيجة لعمل آينشتاين في بداية القرن 20.

6-1 الإشعاع الكهرومغناطيسي في المادة Electromagnetic Radiation in Matter

سرعة الضوء في المواد عندما يمر الإشعاع الكهرومغناطيسي من خلال المادة ذو معامل انكسار n ، تكون سرعته (v) أقل من سرعة الضوء في الفراغ (c) , و حسب المعادلة:

$$v = c / n$$

يتم استخدام هذه المعادلة كتعريف لمعامل الانكسار (n):

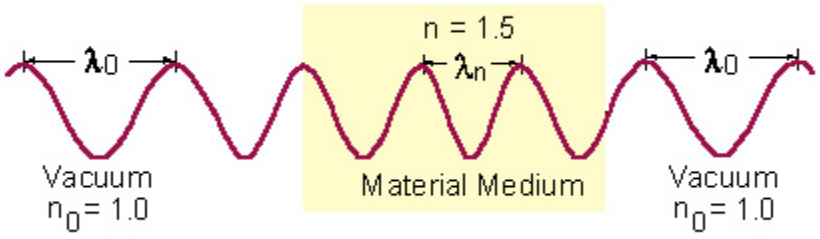
$$n = \text{(سرعة الضوء في الفراغ)} / \text{(سرعة الضوء في المادة)} = c/v$$

وعادة ما يعتبر معامل الانكسار في الغازات بما في ذلك الهواء، مساوي معامل الانكسار في الفراغ $n_0=1$.

قيم معامل الانكسار لمعظم المواد الشفافة في الطيف المرئي ما بين 1.4–1.8، في حين أن للمواد شفافة في الطيف تحت الحمراء (IR) هي أعلى، وهي 2.0– 4.0 .

1-6-1 الطول الموجي في المادة Wavelength in Matter

أن سرعة الضوء في المادة هي أبطأ مما هي عليه في فراغ. ويرتبط هذا بالبطأ في السرعة مع انخفاض الطول الموجي λ, من خلال العلاقة ($\lambda = \lambda_0 / n$) , حيث λ_0 هو الطول الموجي في الفراغ , في حين لا يزال هو نفس تردد للموجة (انظر الشكل (5)).



شكل (5): تغير الطول الموجي في المادة

2-6-1 انكسار شعاع الضوء - قانون سنيل Refraction of Light Beam – Snell Law

أن الحد من سرعة الضوء في الوسط، والحد من طول موجته، يرافقه انكسار في شعاع الضوء. أثناء عبور الحدود بين اثنين من المواد المختلفة، فأن الضوء يتغير اتجاه انتشار هوفقا لمعادلة لسنيل التالية:

$$n_1 \cdot \mathrm{Sin}(\Theta_1) = n_2 \cdot \mathrm{Sin}(\Theta_2)$$

مثال 1:

سرعة الضوء الأحمر (λ_0 = 0.6 [μm]) في وسط معين تساوي $1.5*10^8$[m/s]. ما هو الطول الموجي لذلك الضوء في هذا الوسط؟

الحل:

أولا أيجاد معامل الانكسار حيث:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot \frac{m}{s}}{1.5 \cdot 10^8 \cdot \frac{m}{s}} = 2.0$$

باستخدام n ، لحساب الطول الموجي في المادة:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{0.6 \cdot \mu m}{2.0} = 0.3 \cdot \mu m$$

أي أن الطول الموجي للضوء الأحمر في مادة ذات معامل الانكسار من 2.0، هو 0.3 [μm]

7-1 أنموذج بور للذرة Bohr model of the atom

فعل ال ليزر هو العملية التي تحدث في المادة حيث تتكون المادة من ذرات، ونحن بحاجة إلى فهم بسيط عن بنية الذرة و حالات الطاقة.

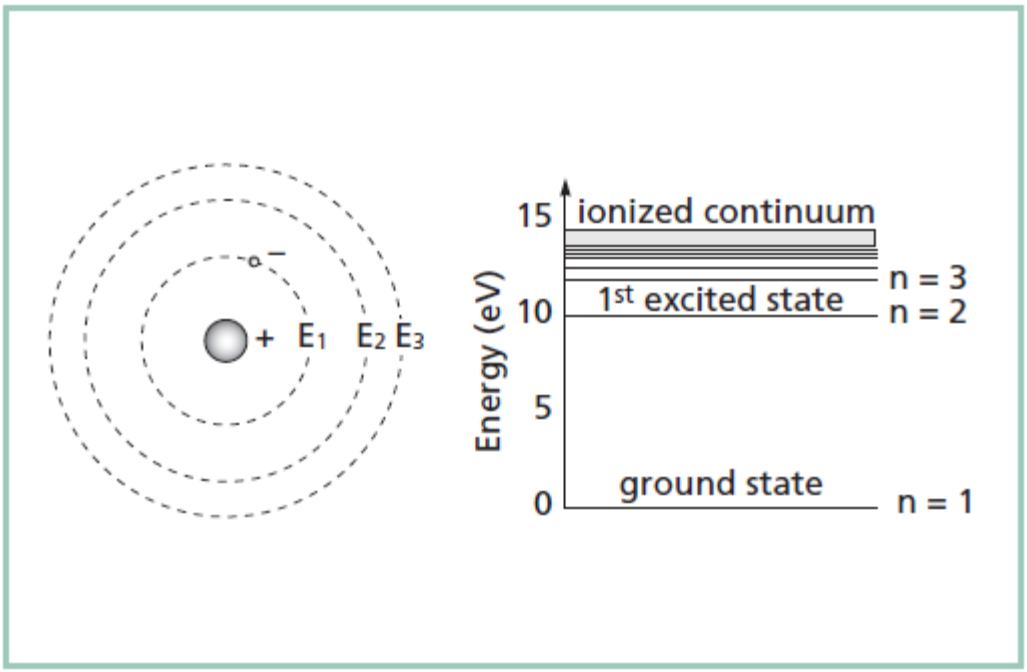
سنبدأ مع الأنموذج شبه الكلاسيكية، كما اقترح في عام 1913 من قبل نيلز بور Niels Bohr ، ويسمى: أنموذج بور للذرة , و وفقا لهذا النموذج تتكون كل ذرة من نواة ضخمة جدا ذات شحنة كهربائية موجبة (Ze) , و حولها الإلكترونات تتحرك في مسارات محددة.

Z = عدد البروتونات في النواة Number of protons in the nucleus,

e = الشحنة الأساسية للألكترونات : Elementary charge of the electrons

$$e = 1.6 * 10^{-19} \text{ [Coulomb]}$$

ويوضح الشكل (6) صورة مبسطة للذرة، و أنموذج بور:



شكل (6): صورة بور للذرة

لكل إلكترون " مدار مسموح" حول النواة، و يرتبط بمستوى طاقة معين.

مستوى الطاقة للـ "المدار" هو يبعد مسافة عن النواة. لذا فأن لكل ذرة لا يوجد سوى بعض "المدارات المسموح بها"، أي أن بعض مستويات الطاقة المنفصلة موجودة فقط ، و يرمز لها: E1، E2، E3، الخ

8-1 حالات الطاقة (المستويات) Energy States (Levels)

يطلق على أدنى مستوى للطاقة بالحالة الأرضية Ground State ، وهي حالة الطاقة المفضلة بشكل طبيعي. طالما لا يتم إضافة أي طاقة للذرة فأن الإلكترون سيبقى في الحالة الأرضية.

عندما تصل الطاقة للذرة (الطاقة الكهربائية، والطاقة الضوئية، أو أي شكل من أشكال الطاقة)، سيتم نقل هذه الطاقة إلى الإلكترون ات، وترفعها إلى مستوى أعلى من الطاقة (في الأنموذج بعيدا عن النواة) ثم تكون الذرة في الحالة المتهيجة (المثارة).

كل إلكترون لا يمكن أن يكون إلا في أحد الحالات الطاقة المحددة (مستويات) التي هي فريدة من نوعها لكل ذرة معينة, فللإلكترون لا يمكن أن يكون بين هذه المستويات "حالات الطاقة المسموح

بها"، و لكن يمكنه "القفز" من مستوى طاقة إلى آخر، في حين يبقى أو تنبعث منه كميات محددة من الطاقة أثناء هذه الانتقالات . هذه الكميات المحددة من الطاقة تساوي الفرق بين طاقة المستويات داخل الذرة.

و تسمى كل كمية طاقة بـ "الكم" "Quantum" للطاقة (و اسم "نظرية الكم" يأتي من هذه الكميات المحددة من الطاقة).

1-8-1 نقل الطاقة من و إلى الذرة Energy Transfer to and From the Atom

نقل الطاقة من و إلى ذرة يمكن القيام به بطريقتين مختلفتين:

1. التصادم مع الذرات الأخرى، و نقل الطاقة الحركية نتيجة الاصطدام. فيتم نقل هذه الطاقة الحركية إلى طاقة داخلية للذرة.
2. امتصاص وانبعاث الإشعاع الكهرومغناطيسي.

و بما أننا مهتمون الآن في عمل الليزر، علينا أن نركز على الطريقة الثانية لنقل الطاقة من وإلى ذرة فهي الأكثر شيوعا (في حين يتم استخدام طريقة الإثارة الأولى في بعض أجهزة الليزر، مثل الهليوم–نيون).

2-8-1 الفوتونات و مخططات الطاقة Photons and the Energy Diagrams

الإشعاع الكهرومغناطيسي له، بالإضافة إلى الطبيعة موجتها، بعض جوانب " سلوك الجسيمات ". في بعض الحالات الإشعاع الكهرومغناطيسي يتصرف باعتباره مجموعة من وحدات منفصلة من الطاقة التي لديها الزخم. وتسمى هذه الوحدات المنفصلة (كمات) (Quanta) من الإشعاع الكهرومغناطيسي "الفوتونات" "Photons".

العلاقة بين كمية الطاقة (E) التي يحملها الفوتون، و ترددها (ν)، يتم تحديدها من قبل الصيغة (الأولى التي قدمها أينشتاين):

$$E = h\nu$$

(h) هو ثابت التناسب في هذه الصيغة و يسمى بثابت بلانك Planck's constant

$$h = 6.626*10\text{-}34 \text{ [Joule-sec]}$$

أحيانا يستخدم التردد الزاوي (ω) بدلا من التردد (ν)، بحيث يتم استخدام h(bar) ثابتة تصحيح:

$$\hbar = h/2\pi = 1.054*10^{-34} \text{ [Joule-sec]}$$

و بذلك تكتب الطاقة على شكل:

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

و تبين هذه الصيغة أن تردد الإشعاع (ν)، يحدد الطاقة الفريدة لكل فوتون في هذا الإشعاع.
هذه الصيغة يمكن التعبير عنها في شكل مختلف، وذلك باستخدام العلاقة بين التردد (ν) والطول الموجي: $c = \lambda*\nu$ للحصول على:

$$E = h * c/\lambda$$

وتبين هذه الصيغة أن طاقة كل فوتون تتناسب عكسيا مع طول موجته. وهذا يعني أن كل فوتون من الطول الموجي الأقصر (مثل الضوء البنفسجي) يحمل طاقة أعلى من الفوتون بطول موجي أكبر (مثل الضوء الأحمر).
h و c هي ثوابت عامة، و لذلك إما الطول الموجي أو التردد يكون كافي لوصف الفوتون بالكامل.

9-1 اشعاع الجسم الاسود Black Body Radiation

تصدر جميع الأجسام الساخنة (الصلبة والسائلة والغازية) اشعاعا يظهر على حساب اثارة الذرات والجزيئات أثناء الحركة الحرارية العشوائية لجسيمات الجسم فالاشعاع الذي تسببه حرارة الجسم فقط يسمى باشعاع الحراري.

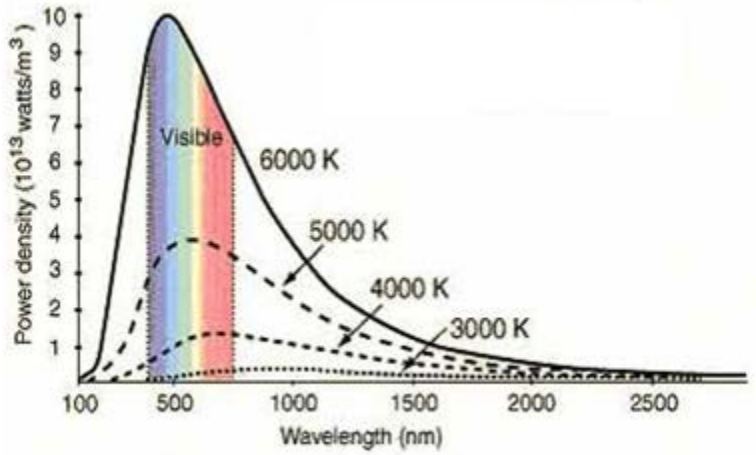
- تتحدد خواص الاشعاع الحراري للأجسام المختلفة بدرجة حرارتها وتعتمد على طبيعة هذه الأجسام بمعنى أن إشعاع الأجسام المختلفة والتي لها نفس درجة الحرارة يكون مختلفا.

- يتحدد اشعاع الجسم في درجة حرارة معينة بقابلية الجسم الإشعاعية وتقاس هذه القابلية بطاقة الإشعاع التي تصدر عن وحدة المساحة من سطح الجسم في الثانية
- جميع الأجسام لها قابلية لإمتصاص الاشعاع الساقط عليها حيث تتحول طاقة الاشعاع أثناء الامتصاص الى طاقة داخلية للجسم ومن المعروف عمليا أن بعض الأجسام تمتص الاشعاع بشدة بينما البعض الآخر يمتص الاشعاع بمقدار أقل و من هنا يتميز كل جسم بقابلية امتصاصية وتبين هذه القابلية الجزء الذي يمتصه الجسم من الإشعاع الساقط عليه
- تعتمد القابلية الامتصاصية للجسم على طبيعة الجسم وحالة سطحه وطول موجة الاشعاع الساقط عليه
- الجسم مطلق السواد هو الجسم الذي يمتص كل الاشعاع الساقط عليه حيث تساوي القابلية الامتصاصية لهذا الجسم واحد بينما تكون للأجسام الأخرى أقل من واحد.

1-9-1 تفسير الفيزياء التقليدية لظاهرة اشعاع الجسم الاسود

تنبأت الفيزياء التقليدية بناءاً على القوانين والنظريات ان الجسم الاسود عندما ترتفع درجة حرارته سيشع كمية لانهائية من الطاقة على شكل موجات كهرومغناطيسية فوق بنفسجية وهذا ما عرف باسم " نكبة الاشعة فوق البنفسجية "

من نتائج التجارب المخبرية لظاهرة اشعاع الجسم الاسود ان الجسم الاسود كلما ارتفعت درجة حرارته سيشع كمية اكبر من الاشعاعات الكهرومغناطيسية بحيث تنزاح القيمة القصوى للطول الموجي الذي يكون عنده اكبر كمية من الاشعاع نحو اليسار في المنحنى اي يقل الطول الموجي , كما هو مبين في الشكل (7).



شكل (7): توزيع كثافة أشعاع الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة

2-9-1 تفسير بلانك لظاهرة اشعاع الجسم الاسود

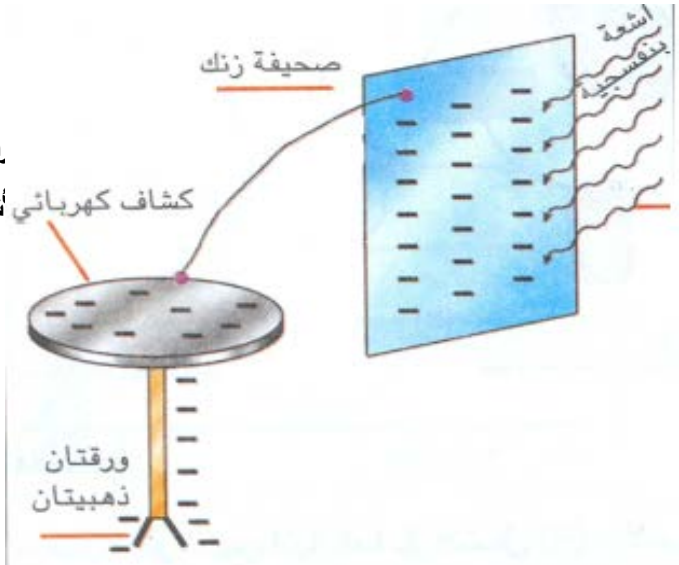
اشعاع الجسم الاسود من الاشعة الكهرومغناطيسية يكون على هيئة كمات من الطاقة المنفصلة وليست متصلة كما كانت تقول الفيزياء الكلاسيكية و ان طاقة هذه الكمات تعتمد طرديا على تردد الاشعاع.

أن تفاعل أشعاع الضوء الساقط مع المادة ينتج ظاهرة تسمى " الظاهرة الكهروضوئية" و يكون نتاجها أنبعاث " الإلكترونات الضوئية ".

- **الظاهرة الكهروضوئية: هي ظاهرة تحرر إلكترونات من سطح فلز نتيجة سقوط ضوء مناسب عليه.**
- **الإلكترونات الضوئية : هي الإلكترونات المتحررة من سطح فلز نتيجة إضاءته بإشعاع مناسب .**

سؤال :

سقطت أشعة فوق ب ص كشاف كهربائي ، فقل انفراج ور شعة عادت ورقتا الكشاف للانفراج ثانيةً ،



الجواب :

تسببت الأشعة فوق البنفسجية بتحرر إلكترونات من سطح صفيحة الزنك مما أدى إلى أن تحررت جميع الشحنة السالبة على الصفيحة فتعادلت صفيحة الزنك وانطبقت ورقتا الكشاف ، ومع استمرار سقوط الأشعة تحررت إلكترونات إضافية من الصفيحة مما أدى إلى شحن الصفيحة بشحنة موجبة فانفرجت ورقتا الكشاف من جديد .

1-9-3 شدة التيار وشدة الضوء

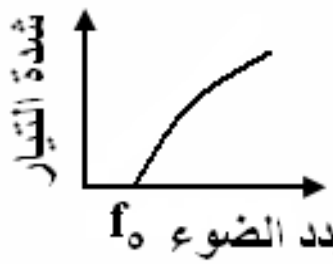
وجد بأن شدة التيار الكهروضوئي تتناسب طردياً مع شدة الضوء الساقط كما في الشكل (8).

شكل (8): علاقة شدة التيار بشدة الضوء الساقط في الظاهرة الكهروضوئية

ويمكن للنظرية الموجية للإشعاع تفسير هذه النتيجة باعتبار أن شدة الضوء هي مقياس طاقة الإشعاع ، فالشدة العالية طاقة عالية وبذلك تحرر عدد أكبر من الإلكترونات فتزداد شدة التيار .

1-9-4 شدة التيار والتردد

من التجارب العملية وجد بأن شدة التيار الكهروضوئي تكون صفراً عندما يكون تردد الضوء أقل من قيمة معينة مهما كانت شدة الضوء عالية وقد سمَّي هذا التردد بـ تردد العتبة أو تردد القطع بعدها تزداد شدة التيار بزيادة التردد بعلاقة غير خطية ، كما في الشكل (9) .



شكل (9): علاقة شدة التيار بتردد الضوء الساقط في الظاهرة الكهروضوئية

سؤال: لماذا طاقة حركة الإلكترونات الضوئية غير متساوية ؟

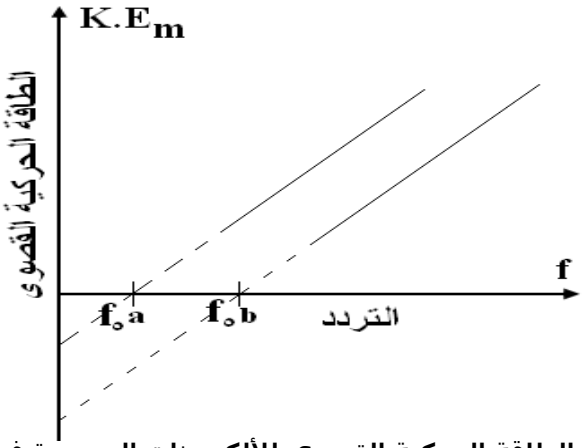
الجواب : لأن بعضا من هذه الالكترنات انتزع من السطح والبعض الاخر انتزع من داخل الفلز واثناء خروجه من الفلز يفقد جزءاً من طاقته الحركية لذلك تكون الالكترونات مختلفة في الطاقة الحركية.

وكما هو معلوم ، فإن الإلكترونات تحتاج إلى طاقة لكي تتحرر من الارتباط بالفلز ، وهذه الطاقة تختلف من إلكترون لآخر بسبب اختلاف موقعه واختلاف طاقته في الفلز ، إلا أن هناك حد أدنى للطاقة اللازمة لتحرير إلكترونات من سطح فلز ما يختلف باختلاف الفلز تسمى بـ " دالة الشغل الكهروضوئي للفلز .

دالة الشغل الكهروضوئي لفلز : هي أقل طاقة تكفي لتحرير إلكترون من سطح هذا الفلز .

5-9-1 طاقة الحركة القصوى وتردد الإشعاع

من خلال النتائج التجريبية للظاهرة الكهروضوئية وجد بأن طاقة الحركة القصوى للإلكترونات المتحررة تتغير مع تردد الإشعاع كما في الشكل (10) .



شكل (10): علاقة الطاقة الحركية القصوى للألكترونات المتحررة في الظاهرة الكهروضوئية بتردد الضوء الساقط

يتضح لنا من خلال الرسم البياني أن الإلكترونات لا تحرر إلا إذا كان تردد الضوء الساقط أكبر من قيمة معينة ($f_\circ$) تختلف من فلز لآخر تسمى تردد العتبة أو تردد البدء . كذلك يتضح لنا أن طاقة الحركة القصوى للإلكترونات الضوئية تتناسب طردياً مع الفرق بين تردد الضوء الساقط وتردد العتبة للفلز .

6-9-1 نظرية بلانك

افترض بلانك أن الطاقة الإشعاعية تنبعث من مصدرها على شكل نبضات (مقادير محددة من الطاقة) تسمى كمات أو فوتونات وليس على شكل سيل مستمر (متصل) من الطاقة ، حيث تعتمد طاقة الكم الواحدة أو الفوتون الواحد على التردد وليس على الشدة ، أي : $E \alpha f$
وهذا يعني أن الطاقة الإشعاعية تساوي ثابت مضروباً في التردد ، سمي هذا الثابت بثابت بلانك الذي عرفناه سابقا.

مثال 2 :

إشعاع تردده ($\nu = 5 \times 10^{14} Hz$) ، باعتبار أن ثابت بلانك ($h = 6.6 \times 10^{-34} J.S$) احسب طاقة الفوتون لهذا الإشعاع .

الحل :

$E =$

مثال 3 :

إشعاع طول موجته ($\lambda = 6000\ A^{\circ}$) ، باعتبار أن ثابت بلانك ($h = 6.6 \times 10^{-34} J.S$) ، وأن سرعة الضوء ($c = 3 \times 10^{8}\ m/s$) ، احسب طاقة الفوتون لهذا الإشعاع . ($1\ A^{\circ} = 10^{-10} m$)

الحل :

$$E = hf = 6.6 \times 10^{-34} \times 5 \times 10^{14} = 3.3 \times 10^{-19} J$$

7-9-1 تفسير آينتشتين للظاهرة الكهروضوئية

اعتمد آينتشتين على نظرية بلانك في تفسيره للظاهرة الكهروضوئية ، حيث قال بأن :

1- الطاقة الضوئية تنبعث من مصادرها على شكل كمات (فوتونات) طاقتها تتناسب مع ترددها تتصرف كجسيم عند اصطدامها بالإلكترون .

2- إذا سقطت الفوتونات على سطح فلز فإن بعض هذه الفوتونات يختفي كليا بوساطة الإلكترونات ، بحيث يمتص الإلكترون فوتوناً واحداً في عملية التصادم فيأخذ الإلكترون طاقة كافية لتحريره والباقي يتحول إلى طاقة حركية لذلك يمكننا كتابة :

$$K.E_m = E - E_\circ = hf - E_\circ$$

E : طاقة الفوتون الساقط

E_o : دالة الشغل للفلز

تسمى هذه المعادلة بمعادلة آينشتين الكهروضوئية .

سؤال :

أذا سقط إشعاع طول موجته $(4500A^\circ)$ على سطح كاثود خلية كهروضوئية دالة الشغل له $(1.5\ eV)$ ، حيث أن ثابت بلانك $(h = 6.6\times10^{-34}\ J.S)$ و سرعة الضوء $(C = 3\times10^{8}\ m/s)$ و شحنة الإلكترون $(q_e = 1.6\times10^{-19}C)$ و كتلته $(m_e = 9.1\times10^{-31}kg)$ و $(1A^0 = 10^{-10}m)$ احسب :

1- تردد فوتون الإشعاع الساقط .

2- طاقة فوتونات الإشعاع الساقط .

3- طاقة الحركة القصوى للإلكترونات المتحررة

4- السرعة القصوى للإلكترونات الضوئية المتحررة

5- تردد العتبة.

6- طول موجة تردد العتبة.