الطبيعة الجسيمية للضوء

THE PARTICLE NATURE OF LIGHT

تقديم الطالبة : أمل ثائر أبوتك

إشراف المدرس: غسان الحايك

للعام الدراسي 2015-2016

المقدمة والإشكالية:

يعد الضوء موضوعاً حيرت طبيعته العلماء كثيراً واختلفو فيما إذا كان جسيمات أم أمواج وكلٌّ قدم نظريته والتجربة التي تثبتها واستمرّ الخلاف إلى أن أتت الفيزياء الحديثة بتفسير مقنع أرضى جميع الأطراف ألا وهو أن للضوء طبيعة مزدوجة (موجيّة – جسيمية) وتطور هذا التفسير فيما بعد ليشمل جميع المواد ولكن لا تبدي المادة الطبيعتين في آنٍ واحد بل تظهر إحداهما على حساب الأخرى وكلما كان إبداؤها لإحدى الطبيعتين واضحاً كانت قدرتنا على تحديد الطبيعة الآخرى لها أضعف.

فيما يخص الضوء، اعتقد قديماً بأنه أمواج وكان لهذه النظرية تأييد كبير وذلك لأن الخواص المعروفة للضوء والأمواج كانت متوافقة في ذلك الوقت ولكن مع تطور الفيزياء والتجارب تمّ التعرّف على خواص أخرى لم تستطع قوانين الفيزياء الكلاسيكية وفرضيّة أن الضوء هو أمواج فقط تفسيرها فبدأت الأنظار تتجه نحو صحّة وجود الطبيعة الجسيمية للضوء التي أول من تحدّث فيها كان نيوتن ولكن تفسيره كان مختفلاً عن التفسير الحقيقي الذي أشار إليه بلانك في محاولة حل معضلة الجسم الأسود أولاً ثم توالت التجارب لإثبات صحّة الفرضية.

- أولاً، كيف كان النظر لطبيعة الضوء؟؟
- ما هي التجارب التي كانت الدليل القاطع على أن الضوء يتصرف كجسيمات؟؟
- كيف يتجلَى الفرق بين الضوء كأمواج والضوء كجسيمات؟
- هل للمادة طبيعة مزدوجة أيضاً؟؟ ولماذا لا تتصرف الأجسام الكبيرة كأمواج؟؟

هذا ما سنحاول معرفته ضمن حلقة البحث هذه..

الباب الأول: طبيعة الضوء وفرض بلانك

الفصل الأول: طبيعة الضوء وفرضية دبرولي

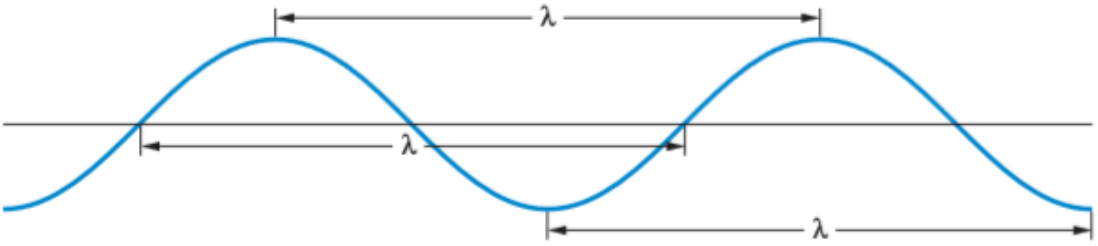
اعتقد قديماً أن الضوء هو عبارة عن جسيمات تصدر من المصدر المشع وهذه النظرية كان متزعمها إسحاق نيوتن الذي هو أول من افترض أن الضوء هو خليط من الألوان وذلك في ستينيات القرن السادس عشر باستخدام منشور زجاجي يحلل الضوء إلى قوس قزح ثم استخدم منشوراً آخر لإعادة دمج الألوان مرة أخرى للحصول على اللون الأبيض وقد استطاع باستخدام نظريته تفسير بعض الأمور منها التحقق من صحة قوانين انعكاس الضوء وقد لاقت نظريته قبولاً من العلماء في ذلك الوقت، إلا أن العالمان روبرت هوك وهايجنز لم يوافقا نيوتن وعارضا النظرية الجسيمية ووضعا النظرية الموجية للضوء وقد استطاعت هذه النظرية أن تفسر وتحقق قوانين الانعكاس والانكسار ولكنها لم تلقَ تأييداً وذلك لأن الأمواج المعروفة في ذلك الوقت (الصوت، الأمواج على سطح الماء، ...) كانت تنتقل في وسط مادي بينما الضوء كان يأتي إلينا من الفضاء إلى أن أتت تجربة شقا يونغ التي دعمت النظرية الموجية بتجارب علمية مقنعة وأيضاً تجارب ماكسويل وتجربة هيرتز دعمت النظرية الموجية غير أن بدايات القرن العشرين أتت بعدة تجارب وقفت مع النظرية الجسيمية وهي[1] :

- ✓ إشعاع الجسم الأسود
- ✓ الانبعاث الكهرضوئي
- ✓ طيف الأشعة السينية
- ✓ ظاهرة كمبتون

بقي للنظرية الموجية للضوء حججها القوية وبقي الدليل على أن الضوء يتصرف كأمواج، فالموجة تعرف بطولها وبترددها، الطول الموجي λ هو المسافة بين قمتين أو قاعين متتالين من الموجة، أمواج الراديو لها أطوال موجية تتراوح بين $100mm$ إلى بضع مئات الأمتار، الضوء المرئي له أطوال موجية أقصر من

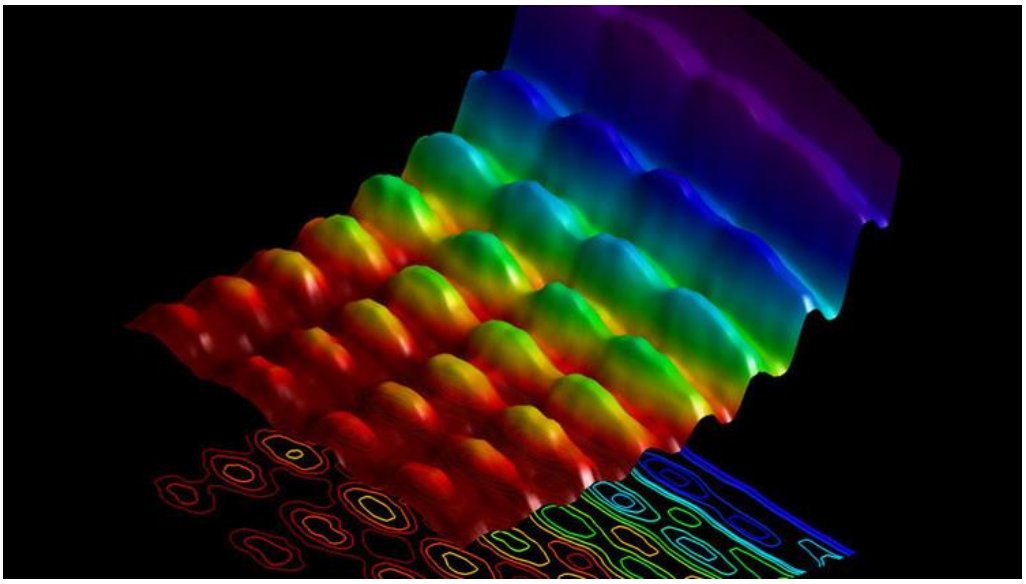
[1] كتاب طبيعة الضوء في الفيزياء الحديثة – صفحة 6

ذلك حوالي $10^{-6}m$ أو حوالي $10^{-9}m$ ، اما تردد الموجة فهو عدد أطوال الموجة التي تعبر نقطة محددة في واحدة الوقت.



شكل 1: يوضح طول الموجة λ

وبقي موضوع الطبيعة الحقيقية للضوء محيّراً إلى أن أتت الفيزياء الحديثة بتفسير مقنع ألا وهو أن للضوء طبيعة مزدوجة (جسيم–موجة) أي أنه عند شروط معينة يسلك الضوء سلوك الأمواج وعند شروط أخرى يسلك سلوك الجسيمات وذلك حسب التجربة المراد إجراءها، وتم اكتشاف أنه ليس الضوء وحده من له هذه الازدواجية، بل إن لجميع المواد أيضاً هذه الازدواجية.



صورة 1: تظهر الطبيعة المزدوجة للضوء بشكل توضيحي

اقترح العالم الفرنسي لويس دبرولي صيغة رياضية بسيطة لوصف الطبيعة الموجية للجسيمات وذلك من خلال الربط بين كمية حركة الجسيم (زخمه) مع طول الموجة التي يمثلها وهي:

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

حيث أن h هو ثابت بلانك ويساوي $6.6 \times 10^{-34}\ j.s$

وحيث أنّ قيمة ثابت بلانك صغير جدّاً فإنّ أطوال الموجات الممثلة للجسيمات الكبيرة الكتلة التي نتعامل معها في حياتنا اليومية تكون قصيرة جدّاً وتكون عديمة التأثير بينما يظهر تأثيرها كجسيمات بشكل واضح، أما عند التعامل مع جسيمات صغيرة كالإلكترونات أو النترونات التي تكون كتلتها صغيرة جدّاً فإن صفاتها الموجيّة تكون واضحة.[2]

كمثال: كرة طاولة كتلتها 10 غرام تتحرك بسرعة 3 متر/ثانية جيئة وذهاباً على الطاولة، هذه الكرة يمكن تمثيلها بموجة طولها $2.2 \times 10^{-32}\ m$ بينما لو كان لدينا إلكترون يتحرك بنفس السرعة فوق الطاولة فإن طول الموجة التي تمثله يكون طولها $0.024\ m$ وبالتالي نجد أن الإلكترون يتصرّف كجسيم بشكل واضح.

ملاحظة : ليس لطول الموجة علاقة بأبعاد الجسم الذي تمثله فمع كبر حجم طاولة الكرة إلا ان طول موجتها ضئيل جدّاً ويظهر العكس عند لاجسيمات ضئيلة الحجم.

[2] General chemistry 9th edition , page 277

الفصل الثاني: فرضية بلانك

الظـواهر الفيزيائيـة الجديـدة كالطبيعـة الموجيـة للجسـيمات، الطبيعـة الجسـيمة للأمـواج وتكمـيم المقـادير الفيزيائيـة اسـتدعى وجـود نظـريات جديـدة لأن الفيـزياء الكلاسـيكية لم تسـتطع إعطـاء تفسـير جيـد لهـذه الظـواهر، فأتـت النظريـة الحديثـة الـتي قامـت أساسـاً علـى إدخـال تعـديلات في نموذج بور للذرة والتي من أهمها:

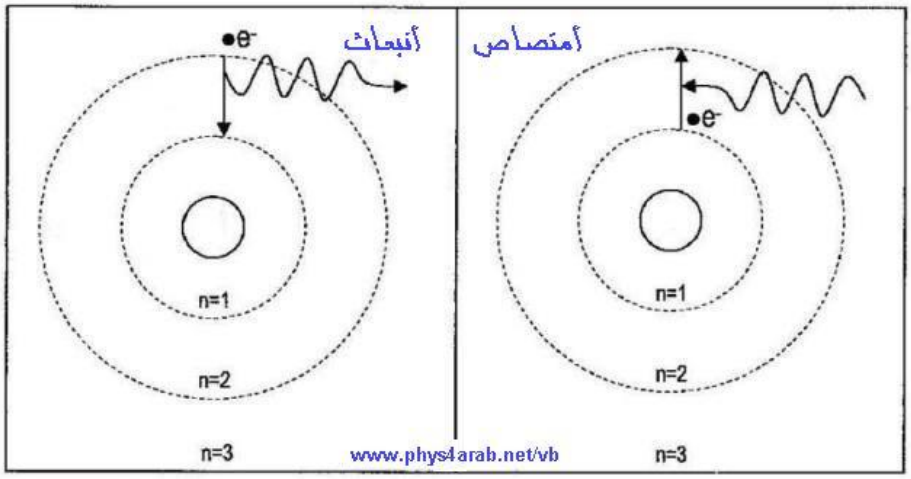
- ✓ الطبيعة الموجية للإلكترون
- ✓ مبدأ الشك لهايزنبرغ في تحديد سرعة ومكان الإلكترون
- ✓ إيجاد المعادلة المناسبة التي تصف الحركة الموجية للإلكترونات

وكـان مـن أساسـيات هـذه النظريـة مـا بـدأ في محاولـة حـل معضـلة إشـعاع الجسـم الأسـود حيـث افـترض الفيزيائـي الألمـاني مـاكس بلانـك أن الإشـعاع المنبعـث مـن الجسـم الأسـود مـن اهتـزاز الإلكـترونات المكونـة لمـادة الجسـم ولكـون هـذه الاهتـزازات ذات تـرددات عاليـة فإننـا نجـد في طيـف الإشـعاع المنبعـث تـرددات في منطقـة الضـوء المرئـي والأشـعة تحـت الحمـراء والأشـعة فـوق البنفسـجية بينمـا لا نجـد أي مـن تـرددات الراديـو في هـذا الطيـف، وطبقـاً لنظريـة رايلـي – جينـز فـإن طاقـة الإلكـترونات المهتـزة الـتي هـي السـبب في انبعـاث إشـعاع مـن المـادة مسـموح لهـا أن تأخـذ أي قـيم مـن الطاقـة ، فـأدرك بلانـك أنـه يجـب إحـداث تغيـير جـوهري في هـذا المفهـوم فـاقترح أن الطاقـة لا تمـتص ولا تفقـد بصـورة مسـتمرة ولكـن علميـة الانبعـاث والامتصـاص عمليـة مكممـة وأطلـق علـى هـذا الفـرض "مبـدأ الطاقـة المكممـة" أو "مبـدأ الكـم" وهـذا يعتـبر فرضـاً يختلـف عـن المفـاهيم المعروفـة في ذلـك الوقـت، حيـث افترضـت الفيـزياء الكلاسـيكية أن الجسـيمات تمـتص أو تبعـث أي قـيم عشـوائية مـن طاقـة الإشـعاع، أمـا بلانـك فقـال بأن الطاقـة مكونـة مـن وحـدات كـل وحـدة قائمـة بـذاتها ومسـتقلة عـن الوحـدات الأخـرى وأطلـق علـى هـذه الوحـدة اسـم "كـوانتم" أو "كمـة" وتتناسـب هـذه الوحـدة طـردياً مـع تـردد الضـوء الممـتص أو المنبعـث فالجسـم يسـتطيع أن يمـتص أو يبعـث وحـدة مـن هـذه الواحـدات أو اثنتـين أو ثلاثـة وهكذا..، وفق العلاقة

$$E = nhf \; ; n = 1,2,3, \dots$$

تقدر الطاقة بالجول J وتواتر الإشعاع بالهرتز Hz

h هو ثابت بلانك وهو ثابت فيزيائي يربط الطاقة بالتردد وقيمته $h=6.62*10^{-34} j.s^{-1}$، والقيم التي يأخذها n تسمى بالأعداد الكمية، والطاقة التي تمتلكها الموجة مكممة أي تأخذ قيماً محددة من الطاقة.



شكل 2: يحدث امتصاص الطاقة أو انبعاثها بكميات محددة

لتبسيط المعنى، كمثال: تعتمد الطاقة الكامنة لجسم ككرة التنس مثلاً على ارتفاعه عن مستوى سطح الأرض، وكلما زاد الارتفاع تزداد الطاقة الكامنة، هنا نستطيع أن نرفع الكرة إلى أي ارتفاع وستأخذ الطاقة أي قيمة، ولكن تخيل أننا نضع هذه الكرة على درج ما بالتالي نحن نستطيع فقط أن نضع الكرة على درجات معينة وبالتالي ستأخذ الطاقة الكامنة قيم محددة أي أن طاقتها تكون مكممة، لكن بالتأكيد كرة التنس في الحالة الطبيعية تستطيع أن تأخذ أي قيمة من الطاقة، ولكن هذا التكميم في الطاقة يبدو واضحاً أكثر كلما كانت كتلة الأجسام أصغر كالذرات أو بالتحديد الإلكترونات حيث يبدو تكميم الطاقة واضحاً فيها.[3]

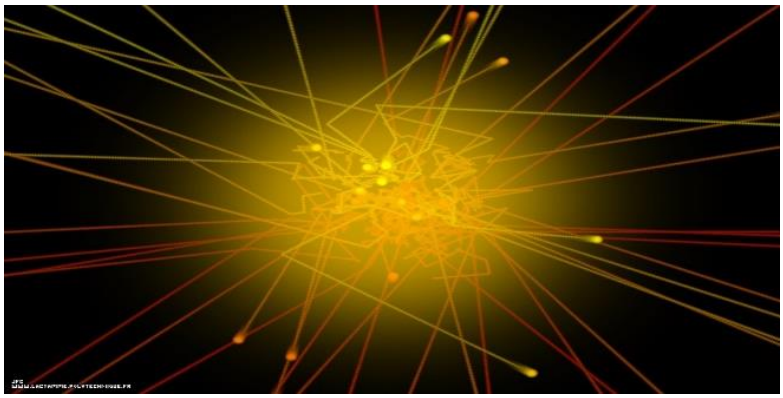
[3] General chemistry 9th edition, page 268

الفصل الثالث: ما هو الفوتون؟

الفوتونات هي حزم من الطاقة تتحرك بسرعة الضوء، هذه الطاقة يعبر عنها بمعادلة ماكس بلانك $E=hf$ أو $E=hc/\lambda$ وطاقة الفوتون عند ثبوته لا تتجزأ أي أنها كم واحد غير قابل للتجزئة إلا إذا تعدّل تردده بمعنى أنه يمكن للفوتون أن يعطي طاقته كاملة عند امتصاصه أو يعطي جزءاً منها وعندها ينخفض تردده بالقدر المفقود وهذا ما يلاحظ في ظاهرة كمبتون، إن للفوتون كتلة متغيرة حيث أن كتلته وهو ساكن تختلف عنها في حالة الحركة، وبما أن الفوتون يتمثل في الفراغ بسرعة الضوء فإنه يكون لدينا من قوانين النسبية

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\frac{U}{c})^2}}$$

حيث m كتلة الفوتون المتحرك و m_0 الكتلة السكونية للفوتون وعندما m_0 لا تساوي الصفر فإن m تساوي ∞ والحل هنا أن تكون الكتلة السكونية صفر وبذلك أن تكون كتلة الفوتون كمية غير معروفة جائز أكثر من أن تكون ما لا نهاية، وإن كان يبدو أن كتلة الفوتون السكونية صفر غريباً إلا أنه يجب التذكر بأن الفوتون لا يكون أبداً ساكناً إنه ينبعث ويُمتص بسرعة الضوء، وبما أن كتلة الفوتون تتعلق بطاقته الحركية كما في قوانين النسبية $E = mc^2$ بالتالي تكون كمية حركته تحسب بالقانون $P = mv$ وبما أن $v=c$ فتصبح كمية التحرك $P = mc$.[4]



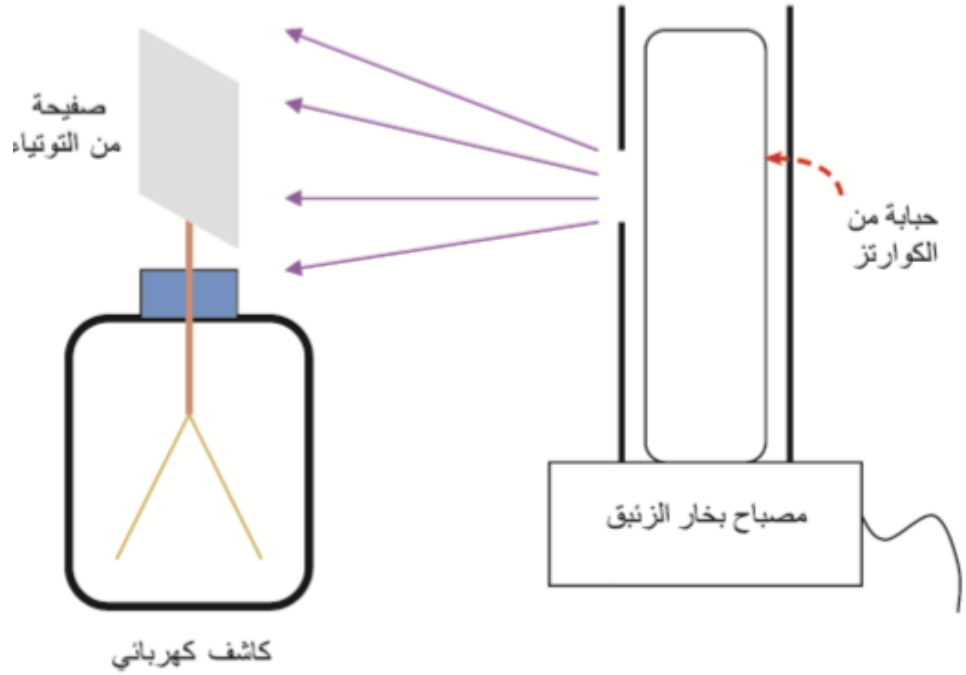
صورة 2: فوتونات

[4] كتاب طبيعة الضوء في الفيزياء الحديثة صفحة 18- 19

الباب الثاني: ظاهرة الفعل الكهرضوئي

الفصل الأول: تجربة هيرتز

كان هيرتز أول من لاحظ أن الأشعة الضوئية يمكنها اقتلاع الإلكترونات من سطح المعدن وكانت بمحض الصدفة حين كان يعمل على جهاز يتركب من صفيحة من التوتياء (الزنك) فوق قرص كاشف كهربائي ونعرضها للأشعة السينية الصادرة عن مصباح بخار الزئبق (يجب أن تكون الحبابة مصنوعة من الكوارتز) كما الشكل:



شكل 3: جهاز هرتز

1. نقوم بشحن صفيحة التوتياء بشحنة سالبة فتنفرج وريقتا الكاشف، ثم نسلط ضوء المصباح عليها فنجد أن الوريقتان تتقاربان حتى تنطبقا.
2. نعيد التجربة ولكن نضع بين المصباح والصفيحة لوحاً زجاجيّاً، فتبقى وريقتي الكاشف منفرجتان بالرغم من وصول ضوء المصباح إلى الصفيحة، وعند تقريب المصباح من الصفيحة مع

بقاء اللوح الزجاجي بينهما أي أن الشدة الضوئية التي تتلقاها الصفيحة تزداد ومع هذا لا يتغير انفراج الوريقتين، واذا سحبنا اللوح الزجاجي فنلاحظ أن وريقتي الكاشف تعودان لتنطبقا.

3. نعيد شحن الصفيحة بشحنة موجبة ثم نعرضها لضوء مصباح الزئبق فنلاحظ أن انفراج الورقتين لا يتغير

نتائج التجربة

عند تعريض صفيحة التوتياء لأشعة المصباح يجري انتزاع بعض الإلكترونات الحرة من الصفيحة وهذا يسمى الفعل الكهرضوئي.

التجربة (1): بعد انتزاع الإلكترونات تنفرهم شحنة الصفيحة السالبة فتبتعد الإلكترونات عنها بالتالي تفقد الشحنة السالبة تتدريجياً حتى تتعادل

التجربة (2): إن الأشعة التي عبرت من خلال اللوح الزجاجي لم تتمكن من انتزاع الإلكترونات من صفيحة التوتياء، فإذا عزينا ذلك إلى ضعف الشدة كان علينا أن نقرب المصباح من الصفيحة لنزيد الشدة التي تصل إلى الصفيحة، غير أنه عند تقريب المصباح نجد أن الصفيحة لا تفقد شحنتها وتبقى ورقتي الكشاف منفرجتين، مما يدل على أن الشدة ليست العامل الحاسم في انتزاع الإلكترونات، والسبب في منع انتزاع الإلكترونات هو وجود اللوح الزجاجي، إن ضوء المصباح يحتوي على أشعة فوق البنفسجية بالإضافة للأشعة تحت الحمراء والأشعة المرئية ولكن لوح الزجاج لايسمح للأشعة فوق البنفسجية بالمرور أي أنه يقوم بامتصاصها ويمنعها من الوصول للصفيحة بالتالي لا تفقد الصفيحة شحنتها السالبة أي أن انتزاع الإلكترونات لا يحدث حتى لو زدنا الشدة الضوئية بالتالي إن الأشعة فوق البنفسجية هي الوحيدة المسؤولة عن انتزاع الإلكترونات.

التجربة (3) الإلكترونات التي يجري انتزاعها يعاد جذبها إلى الصفيحة من قبل شحنتها الموجبة فتبقى شحنة الصفيحة على حالها (لا يتغير انفراج الوريقتين).[5]

[5] كتاب الفيزياء للصف الثالث الثانوي – 2015/2014 صفحة 199

حيرت ظاهرة الفعل الكهرضوئي العلماء كثيراً ولم تكن قوانين الفيزياء الكلاسيكية كافية لوضع حل لهذه المشكلة، فأتى العالم العبقري أينشتين وأوجد الحل الصحيح والمناسب لهذه المعضلة.

في عام 1905 أدرك أينشتين أن الضوء يتصرف وكأنه مكون من جسيمات صغيرة (في البداية سميت كوانتا، لاحقاً أصبحت فوتون) وطاقة كل جزيء نسبت إلى تردد الأشعة الكهرومغناطيسية، حيث استفاد أينشتين من اكتشاف بلانك لهذه العلاقة بين التردد والطاقة $E = hf$ التي اكتشفها عندما كان يحاول حل مشكلة إشعاع الأجسام السوداء إلا أن بلانك لم يكن مدركاً أن الإشعاع حقاً يتألف من قطع صغيرة كما بين تحليله الرياضي، كان قد اعتقد أن الأمر عبارة عن اختراع أعطاه كل الإجابات الصحيحة اللازمة، ولكن عبقرية اينشتين كانت بإدراك أن اختراع بلانك كان في الحقيقة وصف منطقي للواقع، حيث أن الاشعة الكهرومغناطيسية التي نعرفها هي عبارة عن مجرى من الجزيئات المنفصلة.

يتصف الفعل الكهرضوئي بما يلي:

- ✓ لا تنطلق إلكترونات من المعدن تحت تأثير الأشعة إلا إذا كان تواتر الإشعاع أكبر من حد معين يدعى العتبة، وهذه القيمة تتعلق بطبيعة المعدن.
- ✓ إذا ازدادت كمية شدة الأشعة (كميتها) دون أن يتغير تواترها فإن كمية الإلكترونات المتحررة تزداد أما طاقتها فلا تتغير.
- ✓ إذا استخدمت أشعة ذات تواتر أعلى، فإن الإلكترونات المتحررة تزداد طاقتها.

ويمكن تفسير هذه الخواص كما يلي: كل إلكترون يرتبط بمعدنه بقوة معينة ولابد لاقتلاعه من بذل طاقة معينة، وتختلف هذه الطاقة من معدن إلى آخر، وهي تدعى تابع العمل *work function* يرمز لها ϕ، وبما أن الضوء مؤلف من جسيمات (فوتونات) وكل فوتون له طاقة قدرها $E = hf$ حيث (f تواتر الضوء و h ثابت بلانك) فإن الطاقة اللازمة لاقتلاع الإلكترون تأتي من طاقة الفوتون، فإذا كانت طاقة الفوتون أقل من ϕ فإنه لا يستطيع اقتلاع

الإلكـترون، لهـذا السـبب علـى طاقـة الفوتـون علـى الأقـل أن تسـاوي ϕ ، أي لابـد أن يكـون التواتر مساوياً لحد معين هو العتبة.

إذا كانـت طاقـة الفوتـون أكـبر مـن ϕ، ($hf > \phi$)، فـإن قسـماً مـن طاقتـه يسـتهلك لاقـتلاع الإلكـترون مـن المعـدن والقسـم الآخـر يمـنح يكسـب الإلكـترون سـرعة ابتدائيـة ينطلـق بهـا ويكـون لدينا:

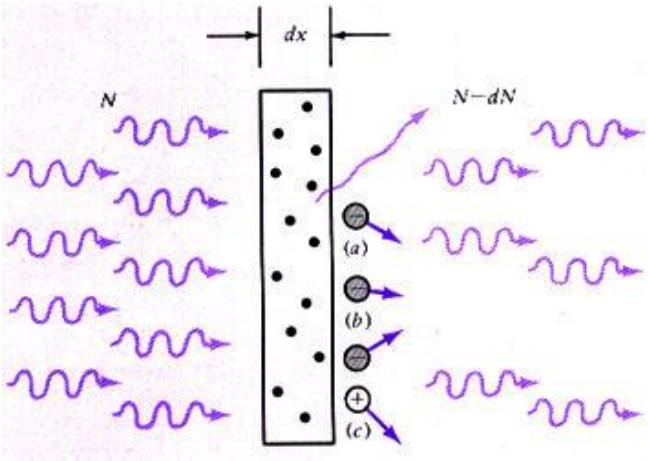
$$hf = \phi + \frac{1}{2}mv^2$$

حيث m هي كتلة الإلكترون و v هي سرعته البدائية التي ينطلق بها من المعدن

$$hf - \phi = \frac{1}{2}mv^2$$

بمـا أن الطاقـة الحركيـة مقـدار موجـب نسـتنتج أن تـواتر الإشـعاع الواقـع علـى سـطح المعـدن يجـب أن يحقق العلاقة التالية ليستطيع اقتلاع الإلكترون $hf - \phi \geq 0$

إذا كان $hf = \phi$ فإن الالكترون يتحرر بسرعة بدائية تساوي الصفر[6].

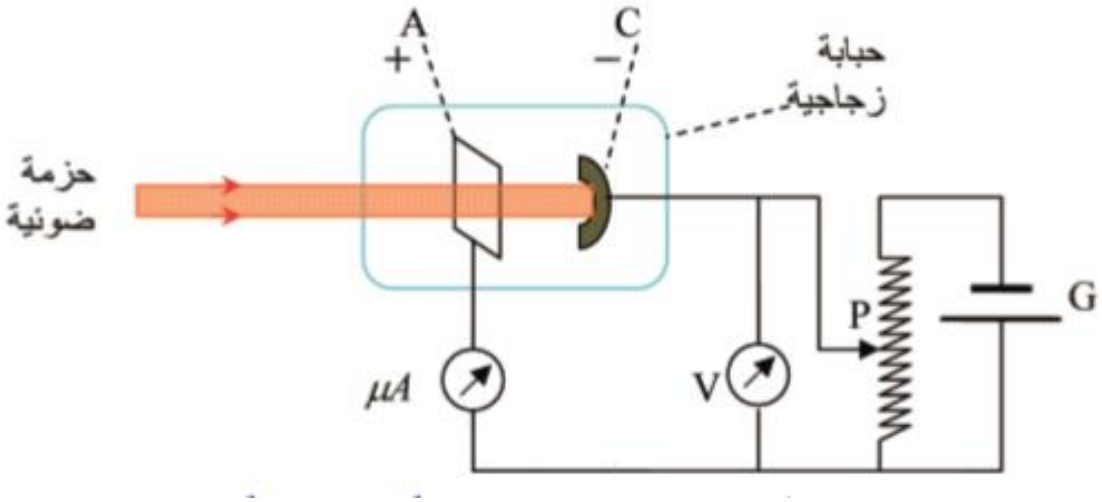


شكل 4: ظاهرة الفعل الكهرضوئي

[6] مبادئ الكيمياء الكوانتية–الدكتور عصام جانو–مديرية الكتب والمطبوعات– 1982/1981 – صفحة 21–22

أداة تستفيد من الضوء لتحريك أو تحرير الإلكترونات من مادة، قد استخدمت هذه الأداة في فهم ظاهرة التأثير الكهرضوئي، وهي عبارة عن حبابة زجاجية مخلاة من الهواء وهي مخلاة كي يتسنى للإلكترونات سالبة الشحنة الوصول إلى المسرى الموجب دون الاصطدام بجزيئات الهواء، هذه الحبابة تحوي على مسرى معدني هو المهبط يغطي سطحه طبقة من معدن قلوي تتلقى الضوء ويمكن أن تكون من أي مادة تحوي إلكترونات ضعيفة الارتباط بالشكبة البلورية، وهناك مسرى أخر هو المصعد، يطبق بين المصعد والمهبط توتر كهربائي ثابت.

نعرض الخلية لحزمة ضوئية ذات طول موجة وحيد مناسب مع ثبات شدة الحزمة ثم نقوم بتغيير التوتر المطبق، عند تعرض المهبط للحزمة الضوئية تنتزع بعض الإلكترونات من الصفيحة بسرعة غير معدومة ومع تغيير التوتر المطبق تصل بعض الإلكترونات إلى المصعد وكلما قل التوتر المطبق زاد عدد الإلكترونات الواصلة إلى المصعد وبالتالي ازدادت شدة التيار.



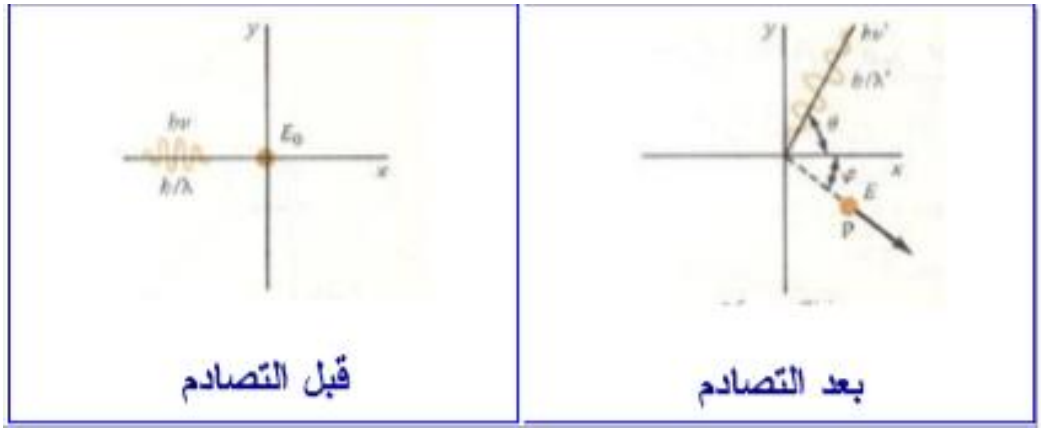
شكل 5: رسم تخطيطي للخلية الكهرضوئية

الباب الثالث: فعل كومبتون

الفصل الأول: ماهية الظاهرة

هذه الظاهرة تهتم بتشتت الأشعة السينية عن طريق الإلكترونات الحرة، فقد لوحظ أنه عندما تسقط موجات كهرومغناطيسية في منطقة الضوء المرئي وما قبلها (ترددات منخفضة) على إلكترونات حرة بتردد معين فإن الإلكترون الحر يتذبذب بنفس التردد لهذه الموجات فتنبعث موجات لها نفس التردد والطول الموجي وهذا النوع يسمى التشتت المتجانس (تشتت تومسون وتشتت رايلي) ولكن عند دراسة الأشعة السينية والموجات ذات الأطوال الموجية القصيرة (ترددات عالية) فقد وجد آرثر كومبتون أن النتيجة تختلف فقد خرج من المعدن فوتونان وليس واحد فقط وكان لهما طولان موجيان مختلفان λ و λ' وهذا النوع من التشتت يسمى تشتت غير متجانس (تبعثر أو فعل كومبتون).

أي أنه عندما تجتاز الأشعة السينية صفيحة من جسم صلب فإن قسماً منها يتشتت في شتى الاتجاهات ويكون للأشعة المتشتتة مركبتان إحداهما لها نفس تواتر الأشعة والآخرى لها تواتر أصغر من تواتر الأشعة الواردة ولوحظ بالتجربة أن النقصان في تواتر الأشعة يزداد بزيادة زاوية التشتت a، كما يلاحظ انطلاق الكترونات من الجسم الصلب.



شكل 6: يوضح كيف يصدر فوتونين بعد اصطدام الأشعة بالصفيحة المعدنية

ولتفسير هذه الظاهرة يجب التذكير أولا ببعض العلاقات الأساسية في النظرية النسبية التي اعتمد عليها آرثر كومبتون في تفسير هذه الظاهرة، تقوم النظرية النسبية على فرضين أساسيين هما:

- ✓ لا يوجد في الطبيعة حركة مطلقة، كل حركة هي نسبية وقوانين الفيزياء هي واحد في جميع جمل المقارنة العطالية أي جمل المقارنة التي يسير بعضها بالنسبة للبعض الآخر بسرعة منتظمة.
- ✓ إن سرعة الضوء محدودة وثابتة ثباتاً مطلقاً، وهي مستقلة عن حركة المراقب الذي يقوم بقياسها، وعن حركة المنبع الضوئي، إلا أن الكتلة تتغير بتغير السرعة والعلاقات التي تربط الكتلة والسرعة وكمية الحركة هي

- $m = m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$
- $\vec{p} = m.v^2$
- $T = (m - m_0)\, c^2 = m_0\, c^2 \left[\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} - 1\right]$

حيث m_0 هي كتلة الجسم أثناء السكون (الكتلة السكونية) و c سرعة الضوء، ونلاحظ من العلاقات بأن الكتلة m وكمية الحركة p والطاقة الحركية T تقترب من اللانهاية كلما اقتربت السرعة v من سرعة الضوء، حيث أن الكتلة السكونية m_0 غير معدومة.

أما بالنسبة للفوتونات الضوئية فإن الكتلة السكونية تكون معدومة والكمية الحركة والطاقة مقداران محدودان وبالتالي تأخذ المعادلات الشكل:

- $P = mc = \frac{hf}{c}$
- $T = E = mc^2 = hf$
- $m = \frac{hf}{c^2}$

لا يوجد في النظرية النسبية انحفاظ بالكتلة ولكن يوجد انحفاظ في الطاقة، ونلاحظ هنا أن الطاقة الحركية T ناتجة عن الحركة حيث m تتغير بتغير السرعة v ويمكن أن نكتب

- $T = mc^2 - m_0c^2$

فالمقدار mc^2 يساوي مجموع الطاقة الحركية T والطاقة عند السكون m_0c^2 لذلك تكون الطاقة الكلية للجسيم مساوية إلى $E = mc^2 = T + m_0c^2$

إن طاقة الفوتون الواردة إلى الجسم تساوي hf وطاقة الفوتون المتشتت تساوي hf' أما الإلكترون الذي يصطدم به الفوتون فيمكن اعتباره في حالة سكون وطاقته تساوي m_0c^2 وبعد الاصطدام بالفوتون الوارد تصبح طاقة الالكترون mc^2 واستناداً إلى قانون انحفاظ الطاقة يكون

$$hf + m_0c^2 = hf' + mc^2$$

وبإبدال m بما يساويها $m_0\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$ نحصل على:

$$h(f - f') = m_0c^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} - m_0c^2$$

بالتالي نلاحظ أن النقص في التواتر $(f - f')$ بسبب أن الفوتون يعطي قسم من طاقته للالكترون.

نطبق قانون انحفاظ كمية الحركة بعد اصطدام الفوتون بالالكترون، فإذا كانت سرعة الالكترون v تصنع زاوية β مع منحى الأشعة الواردة وكان الفوتون المتشتت يصنع زاوية α مع هذا المنحى فنجد العلاقات:

- $\frac{hf}{c} = mv\cos\beta + \frac{hf'}{c}\cos\alpha$
- $mv\sin\beta = \frac{hf'}{c}\sin\alpha$

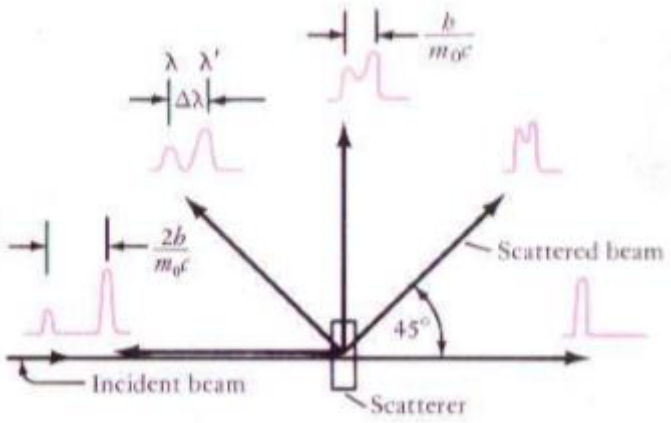
من العلاقات الثلاث السابقة نصل إلى العلاقة التالية:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f} + \frac{h}{m_0 c^2}\,(1 - cos\alpha)$$

تبين هذه العلاقة كيف أن تواتر الفوتون المتشتت يتغير بتغير زاوية التشتت α وقد أيدت التجربة هذه المعادلة.

المقدار $h\frac{m_0}{c}$ يسمى بطول موجة كومبتون وله وحدة طول هي $h\frac{m_0}{c} = 0.024\text{Å}$

ونلاحظ أن في حالة الزاوية 180 يكون التغير في الطول الموجي أكبر ما يمكن ويكون التصادم بين الفوتون والإلكترون تصادم مباشر



شكل 7: تغير الطول الموجي للفوتون المتشتت تبعاً لزاوية التشتت

ويعتبر فعل كومبتون دليلاً قاطعاً على أن الضوء يتكون من فوتونات وأنه يسلك سلوك الجسميات وكما أثبت في ظواهر أخرى بأنه يسلك سلوك الأمواج بالتالي أثبتت من جديد الطبيعة المزدوجة للضوء (موجة – جسيم).[7]

[7] مبادئ الكيمياء الكوانتية–الدكتور عصام جانو–مديرية الكتب والمطبوعات– 1982/1981 – صفحة 23 – 26.

النتائج

الظواهر التي دلّت على الطبيعة الجسيمية للضوء

- ✓ لمحاولة حل معضلة الجسم الأسود اكتشف ماكس بلانك بأن الضوء يتألف من جسيمات لها طاقة معينة سميت بالفوتونات وهي كم واحد من الطاقة لا يمكن تجزئته وهي التي تجعل الضوء يتصرف كالجسيمات في بعض الشروط، وأثبتت ايضاً طبيعته الموجية وبالتالي الضوء له طبيعة مزدوجة (موجة – جسيم)، كما أن بلانك اكتشف بأن انتقال الطاقة لا يحدث بقيم عشوائية بل بكيمات محددة وفق المعادلة $E = nhf$ حيث h هو ثابت اوجده بلانك، و n عدد صحيح و f هو تواتر الاشعاع ويقدر بالهرتز hz
- ✓ اكتشف هيرتز وهو يجري تجربته بأنه إذا سلطنا أشعة على سطح معدن فإنها تحرر من هذا المعدن الكترونات وسميت هذه الظاهرة بظاهرة الفعل الكهرضوئي وقد حيرت هذه الظاهرة علماء الفيزياء إلى أن أتى اينشتين وأوجد الحل المناسب وقد شرح النظرية بالاعتماد على فرض بلانك بأن الضوء يتألف من جسيمات لها طاقة محددة، حيث قال بأنه إذا وجهت أشعة ذات طاقة محددة (اكبر من طاقة ارتباط الذرات بالمعدن الموجهة إليه الأشعة التي تسمى العتبة) فإنه يتحرر من هذا المعدن الكترونات يكون لها طاقة الأشعة الواردة نفسها، فإذا زادت كمية الاشعة الموجهة فإن عدد الالكترونات المتحررة يزداد ولا تزداد طاقتها، وإذا زادت طاقة الاشعاع عن العتبة فإن الالكترونات تحرر بطاقة العتبة والزائد من الطاقة يعطى بشكل طاقة حركية للإلكترون، أما اذا كانت طاقة الإشعاع أقل من العتبة فإن الأشعة لا تحرر إلكترونات من المعدن.
- ✓ من الدلائل أيضاً على الطبيعة الجسيمية للضوء ظاهرة كومبتون، أيضاً اعتمد آرثر كومبتون فيها على تفسير اينشتين للفعل الكهرضوئي وقوانين النظرية النسبية وانحفاظ كمية الحركة في التصادمات المرنة، وهذه الظاهرة تحدث عند توجيه إشعاع ذو طاقة عالية (الأشعة السينية عالية الطاقة) إلى سطح معدن فإنه ينتج من المعدن فوتون ولكن بتردد مختلف عن الذي ورد به و كذلك ينبعث إلكترون من المعدن وهذا

الاختلاف في تردد الفوتونين ينتج من ان الفوتون يعطي قسم من طاقته للإلكترون وفوتونات أخرى تتصادم تصادم مرن ولا يحدث بتبادل بالطاقة، ويتعلق هذا الفرق في التردد بزاوية التشتت التي يخرج بها الفوتون الجديد.

هذه كانت أهم الدلائل على أن للضوء طبيعة جسيمية أي أنه يتصرف كالجسيمات في بعض التجارب وبالاعتماد على هذه النظرية وهذه الخصائص للضوء تم حل العديد من المعضلات التي كانت تحير العلماء سابقاً

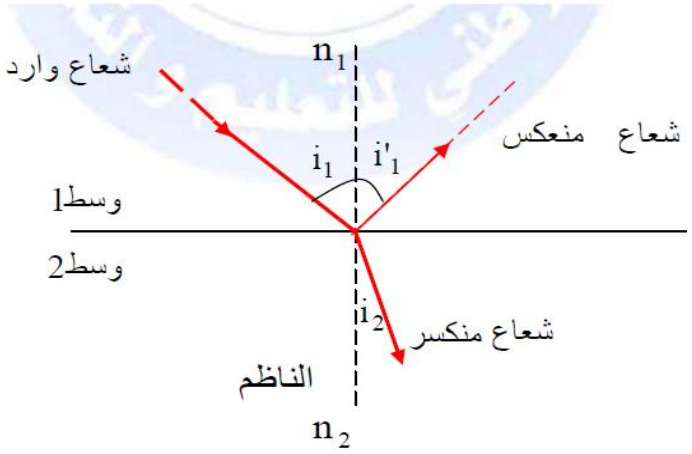
مقارنة بين الطبيعة الجسيمية والطبيعة الموجية للضوء من حيث الظواهر التي فسرتها كل منهما

- الطبيعة الموجية : فسّرت خواص الضوء كالانكسار والانعكاس بالإضافة إلى انعراج الضوء وحيوده الذي يعد البرهان التجريبي الأساسي على الطبيعة الموجية للضوء.
- الطبيعة الجسيمية: فسّرت قدرة الأشعة على انتزاع إلكترونات من سطح المعدن (ظاهرة التأثير الكهروضوئي) بالإضافة إلى تفسير ظاهرة كومبتون (قدرة الأشعة السينية ذات الترددات العالية على انتزاع الإلكترونات من سطح المعدن وخروج فوتونات ترددها يختلف عن تردد الفوتونات الواردة إلى سطح المعدن.

ظواهر الطبيعة الموجية للضوء:

✓ انعكاس الضوء:

الانعكاس هو تغير منحى الشعاع الضوئي الذي ينتشر في وسط شفاف عندما يضرب سطحاً ويرجع لنفس الوسط

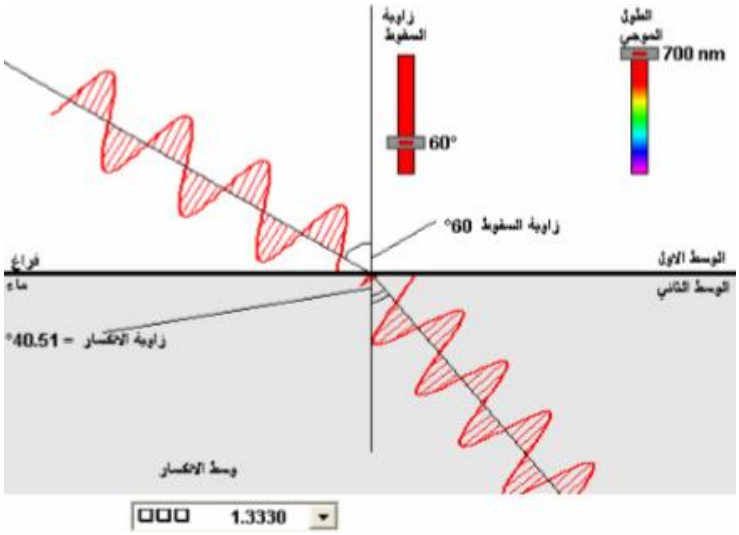


زاوية الورود i_1 هي الزاوية المحصورة بين الشعاع الوارد والناظم على السطح العاكس

زاوية الانعكاس i'_1 هي الزاوية المحصورة بين الشعاع المنعكس والناظم.

✓ انكسار الضوء

الانكسار هو تغير منحى الأشعة الضوئية عند مرورها من وسط شفاف وتجانس ونسيق إلى وسط آخر شفاف متجانس ونسيق أو تغير المنحى عندما تجتاز الأشعة الحاجز الفاصل بين وسطين شفافين مختلفين في الكثافة الضوئية*.



* الكثافة الضوئية هي قدرة الوسط على كسر الأشعة الضوئية عند مرورها فيه.

✓ انعراج الضوء:

الانعراج هو انحراف الموجات عن انتشارها الأصلي، ولا تقتصر ظاهرة الانعراج على نوع معين من الأمواج بل إن الأمواج الميكانيكية تنعرج عندما تصطدم بفتحة ذات أبعاد قريبة من طول الموجة.

الطبيعة الموجية للجسيمات

لجميع المواد في الكون صغيرة كانت أم كبيرة طبيعة مزدوجة (جسيم – موجة) ولكنها تبدي أحدها على حساب الأخرى ويتعلق إبداؤها لإحدى الطبيعتين متعلق بكتلتها من جهة وبظروف التجربة المجراة من جهة أخرى.

لا تتصرف الجسيمات الكبيرة كأمواج وذلك لأن كتلتها تعتبر كبيرة جدّاً بالنسبة لثابت بلانك الذي يربط بين طول الموجة التي تمثل الجسيم وكمية حركته في علاقة دبرولي $\lambda = \frac{h}{p}$ بينما الجسيمات صغيرة الكتلة كالإلكترونات والنترونات يكون تصرفها بشكل أمواج واضحاً

المصادر والمراجع

المراجع الأجنبية:

1. *Elert, G. (1998). "The physics hyprtbook."*

2. *Gammon, E. "General chemistry."*

3. *Serwey, jwette 9th Edition.*

المراجع العربية:

1. اللحياني, د .س .ب .ح". ميكانيكا الكم".

2. المؤلفين, م .م". *(2013-2014)*. كتاب الفيزياء للصف الثالث الثانوي العلمي."

3. جانو, ا .ع". *(1981-1982)*. مبادئ الكيمياء الكوانتية".

4. *Hettab, A. (29/may/2012)."* طبيعة الضوء في الفيزياء الحديثة".

5. *http:/onefd.edu.dz*

الفهارس

فهرس الصور

صورة 1: تظهر الطبيعة المزدوجة للضوء بشكل توضيحي..... 3
صورة 2: فوتونات..... 7

فهرس الأشكال

شكل 1: يوضح طول الموجة Λ..... 3
شكل 2: يحدث امتصاص الطاقة أو انبعاثها بكميات محددة..... 6
شكل 3: جهاز هرتز..... 8
شكل 4: ظاهرة الفعل الكهرضوئي..... 11
شكل 5: رسم تخطيطي للخلية الكهرضوئية..... 12
شكل 6: يوضح كيف يصدر فوتونين بعد اصطدام الأشعة بالصفيحة المعدنية..... 13
شكل 7: تغير الطول الموجي للفوتون المتشتت تبعاً لزاوية التشتت..... 16

فهرس المحتويات

المقدمة والإشكالية: 1

الباب الأول: طبيعة الضوء وفرض بلانك 2

الفصل الأول: طبيعة الضوء وفرضية دبرولي.....2

الفصل الثاني: فرضية بلانك.....5

الفصل الثالث: ما هو الفوتون؟ 7

الباب الثاني: ظاهرة الفعل الكهرضوئي..... 8

الفصل الأول: تجربة هيرتز.....8

الفصل الثاني: تفسير أينشتين لظاهرة الفعل الكهرضوئي 10

الفصل الثالث: الخلية الكهرضوئية (الحجيرة الكهرضوئية).....12

الباب الثالث: فعل كومبتون 13

الفصل الأول: ماهية الظاهرة 13

الفصل الثاني : تفسير هذه الظاهرة 14

النتائج.....17

الظواهر التي دلّت على الطبيعة الجسيمية للضوء.....17

مقارنة بين الطبيعة الجسيمية والطبيعة الموجية للضوء من حيث الظواهر التي فسرتها كل منهما.....18

الطبيعة الموجية للجسيمات 20

المصادر والمراجع 21

المراجع الأجنبية:.....21

المراجع العربية: 21

الفهارس 22

فهرس الصور.....22

فهرس الأشكال.....22