كلية العلوم

القسم : **الفيزياء**

السنة : **الثانية**

المادة : فيزياء كمومية

المحاضرة : الاولى /نظري/د.أصف يوسف

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر (What's app-Telegram) على الرقم 0931497960

الكهرطيسية الموجية ونظرية البنية الجسيمية، أديتا إلى مأزق كبير فجاء العالم لوي دي بروي Louis de Broglie بنظريته في الميكانيك الموجي ليخرجنا من هذا المأزق (التناقض).

خامساً: نظرية الميكانيك الموجي (او نظرية لوي دي بروي Louis de Broglie): إن العالم لوي دي بروي يُعتبر المكتشف الأول لعلم الميكانيك الموجي عام (1924) الذي وفق بين مظهري الضوء: الموجي والجسيمي. فتد اتخذ في تعليل الحوادث الضوئية مفهوماً مضاعفاً يطلق عليه أسم (المفهوم المضاعف الموجي – الجسيمي) أو (المثنوية الموجية – الجسيمية). الذي يقول بأن الضوء مؤلف من فوتونات (جسيمات الطاقة) تلازمها في انتقالها أمواج احتمالية (سحابة موجية). وهكذا جاءت هذه النظرية مؤيدة لنظرية الكوانتات من جهة وللنظرية الموجية الكهرطيسية من جهة أخرى. بالحقيقة فنحن نعامل الإلكترونات معاملة الجسيمات لأن لها شحنة وكتلة وتخضع في سلوكها لقوانين ميكانيك الجسيمات في الأجهزة المألوفة مثل أنبوبة شاشة التلفزيون. ولكننا سنرى قريباً في هذا الكتاب أنه توجد دلائل في صالح تفسير الإلكترون المتحرك كظاهرة موجية كما في تفسيرها كظاهرة جسيمية، أننا نعتبر الأمواج الضوئية (والتي هي جزءاً صغيراً جداً من الأشعة الكهرطيسية) أمواجاً لأنها تحت شروط معينة تبدي تداخلاً وانعراجاً واستقطاباً. وسنرى أيضاً شكل مشابه أنه تحت شروط أخرى تسلك الأمواج الكهرطيسية سلوك سيل من الجسيمات. في الحقيقة إن الطبيعة الازدواجية للموجة والجسيم إضافة الى النظرية النسبية الخاصة تؤلف أساساً مهماً في الفيزياء المعاصرة.

2- المفعول الكهوضوئي:

اكتشف العالم هرتز (H. Hertz) المفعول الكهرضوئي بطريقة غير مباشرة عام 1887م، فلقد قام هرتز بإجراء مجموعة من التجارب استطاع من

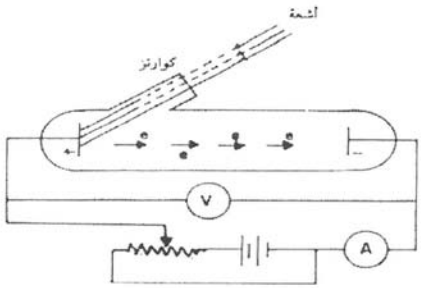
خلالها تأكيد وجود الأمواج الكهرطيسية التي كانت قد تنبأت بها نظرية مكسويل. وتبين له عندما كان يدرس خصائص هذه الأمواج أن سقوط الأشعة فوق البنفسجية على أقطاب أنبوبة التفريغ الكهربائي يسهل عملية التفرغ. وتبين فيما بعد أن جسيمات مشحونة تنطلق من فوق سطح القطب عند سقوط الأشعة فوق البنفسجية عليه. ولقد تمكن العالم لينارد (Lenard) من الكشف عن هذه الجسيمات المشحونة وبيّن من خلال قياس النسبة بين شحنة وكتلة هذه الجسيمات بأن هذه الجسيمات عبارة عن إلكترونات. وأطلق على هذا المفعول أي مفعول إنطلاق الإلكترونات من سطح المعدن عند سقوط الأشعة الكهرطيسية المناسبة عليه اسم المفعول الكهرضوئي.

لقد أظهرت سلسلة من التجارب اللاحقة أن الإلكترونات تصدر عن سطوح المعادن عندما يسقط ضوء ذو تواتر عالي، ولقد تبين أنه يلزم للضوء فوق البنفسجي من أجل جميع سطوح المعادن باستثناء المعادن القلوية، إذ يستطيع الضوء المرئي تحرير الكترونات منها كما يبين الجدول التالي:

المعدن	البلاتين	التنغستين	الليتيوم	الصوديوم	البوتاسيوم
أعظم طول لموجة الضوء الساقط المترافق بإصدار إلكترونات A^{o}	967	2750	5400	5900	6200

يستخدم الجهاز الموضح في الشكل (1) لدراسة هذا المفعول.

يتكون هذا الجهاز من أنبوبة زجاجية مفرغة من الهواء ومزودة بنافذة من الكوارتز وذلك لأن الزجاج يمتص معظم الأشعة المستخدمة قبل وصولها للسطح المعدني.



الشكل (1): الجهاز المستخدم لدراسة المفعول الكهرضوئي.

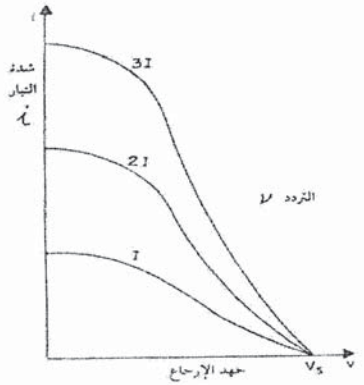
وتحتوي الأنبوبة على مصعد ومهبط متصلان خارج الأنبوبة بمقياس أمبير وبمقياس فولط لقياس كل من شدة التيار وفرق الجهد على الترتيب. عند سقوط الأشعة فوق البنفسجية على المصعد فان الإلكترونات تنطلق من سطحه نحو المهبط. وبما أن طاقة ارتباط هذه الإلكترونات بالمعدن مختلفة فإن طاقة حركتها تكون أيضاً مختلفة. تبين التجارب العملية أن طاقة حركة الإلكترونات المنطلقة تتراوح بين الصفر (للإلكترونات المرتبطة بطاقة عالية بالمعدن) وقيمة عظمى $T_{\max}$ (للإلكترونات التي تكون طاقة ارتباطها أقل ما يمكن). ويلاحظ أن الجهد السالب للمهبط قد يرد بعض الإلكترونات ذات الطاقة المنخفضة ويسمى هذا الجهد لذلك بجهد الإرجاع، ويؤدي زيادة هذا الجهد الى نقصان في عدد الإلكتروذت التي تتمكن من الوصول الى المهبط وبالتالي لنقصان في شدة التيار الكهربائي. وعند قيمة معينة لجهد الإرجاع تنعدم شدة التيار. وتعرف قيمة جهد الإرجاع التي تنعدم عندها شدة التيار بجهد الإيقاف (V_S). وتكون الطاقة (eV_S) في هذه الحالة مساوية بالضبط لطاقة الحركة العظمى للإلكترونات المنطلقة من السطح أي أن:

$$T_{\max} = \frac{1}{2} m V_{\max}^2 = eV_S \qquad (1)$$

حيث: $V_{\max}$ هي السرعة العظمى للإلكترونات المنطلقة من السطح.

$T_{\max}$ هي طاقة الحركة العظمى للإلكترونات الصادرة.

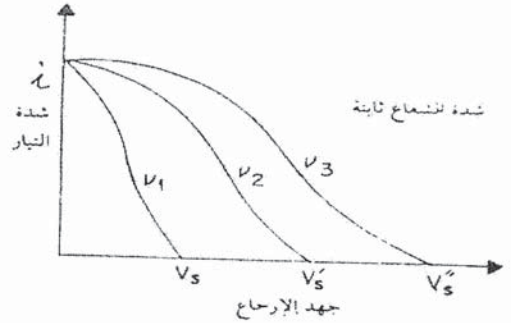
ويمكن استخدام الجهاز لدراسة العلاقة بين شدة التيار المار في الأنبوبة وجهد الإرجاع V، ويبين الشكل (2) هذه العلاقة لثلاثة أشعة لها نفس التردد ولكن شدتها مختلفة، ويلاحظ من الشكل أن جهد الإيقاف في الحالات الثلاث له نفس القيمة وبالتالي فإن طاقة حركة الإلكترونات العظمى في الحالات الثلاث متساوية. وهذا يدل على أن طاقة الحركة تعتمد على تردد الشعاع وليس على شدته – كما تفترض النظرية الكلاسيكية –.



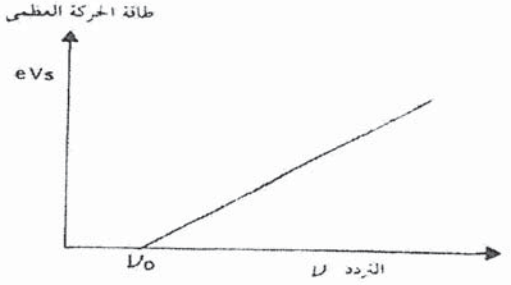
الشكل (2): شدة التيار كتابع لجهد الإرجاع لثلاث قيم مختلفة لشدة الشعاع الساقط والتي لها نفس التردد υ.

ويبين الشكل (3) نفس العلاقة السابقة أي العلاقة بين شدة التيار وجهد الإرجاع ولكن عند تثبيت شدة الشعاع الساقط وتغير تردده $(\nu_1 < \nu_2 < \nu_3)$،

ويلاحظ من الشكل أن جهد الإيقاف يزداد بزيادة تردد الشعاع الساقط. أما الشكل (4) فيُظهر العلاقة الخطية بين طاقة الحركة العظمى للإلكترونات الصادرة (أو جهد الإيقاف) وتردد الشعاع الساقط.



الشكل (3): شدة التيار بتابعية جهد الإرجاع لثلاث ترددات مختلفة ولكن عند نفس شدة الشعاع الساقط.



الشكل (4): العلاقة الخطية بين طاقة الحركة العظمى للإلكترونات الصادرة وتردد الشعاع الساقط.

2-1- خصائص المفعول الكهوضوئي:

أظهرت النتائج التجريبية المعروفة عن المفعول الكهرضوئي ما يلي:

1- إن طاقة حركة الإلكترونات العظمى المنطلقة من سطح معدن معين تعتمد على تردد الأشعة الساقطة ولا تعتمد بأي حال من الأحوال على شدة الشعاع الساقط.

2- يوجد لكل مادة تردد حرج ν_0، ويسمى تردد الإصدار أو تردد العتبة وإذا كان تردد الأشعة الساقطة أكبر من تردد العتبة فإن الإلكترونات الضوئية تنطلق من السطح وتزداد طاقة حركتها العظمى مع زيادة تردد الشعاع الساقط. أما إذا كان تردد الشعاع الساقط أقل من تردد العتبة فلا يمكن أن تنطلق الإلكترونات من السطح مهما كانت شدة الشعاع الساقط عالية.

يتضح من الشكل (4) أن العلاقة بين $(T_{\max} = eV_s)$ و ν تتضمن تناسباً يعبر عنه بالشكل التالي:

$$T_{\max} = h(\nu - \nu_0) = h\nu - h\nu_0 = h\nu - W \qquad (2)$$

حيث h ثابت و ν_0 هو تردد العتبة. من الأهمية بمكان أن نلاحظ أن قيمة h وكما تُظهر التجربة ثابتة دائماً وتساوي إلى $(h = 6.6253.10^{-34} J.s)$ وهي مطابقة لقيمة ثابت بلانك، لكن قيمة ν_0 تتغير بحسب المعدن المضاء.

3- تحدث عملية الإصدار مباشرة عند سقوط الشعاع ومهما كانت شدته ضعيفة وتبين التجارب أن الزمن بين سقوط الشعاع وصدور الإلكترونات لا يمكن أن يزيد عن $(10^{-9} s)$ مهما كانت شدة الشعاع ضعيفة، وتتناسب شدة التيار (عدد الإلكترونات في الثانية) وعند ثبات التردد مع شدة الشعاع الساقط كما هو موضح في الشكل (2).

إن حدوث المفعول الكهرضوئي لا يتناقض في حد ذاته مع الفيزياء الكلاسيكية. فمجال الإشعاع، والذي تعدّه النظرية الكهرطيسية أمواجاً

كهرطيسية، يحتوي على توزيع مستمر من الطاقة وقد تحصل بعض الإلكترونات على جزء كاف من الطاقة لتتحرر من سطح المعدن وتنطلق بطاقة حركية معينة. لكن الحقائق التى ذكرناها سابقاً لا يمكن تفسيرها من خلال مبادئ الفيزياء الكلاسيكية. فطاقة الموجة الكهرطيسية تعتمد على شدة المصدر ولا علاقة لها بتردد الأشعة. ويجب ان تعتمد طاقة حركة الإلكترونات الصادرة بالتالي على شدة الإشعاع وليس على تردده ويمكن توضيح ذلك بالقول إن المجال الكهربائي للإشعاع يسبب حركة اهتزازية للإلكترونات الذرية في سطح المادة، وإذا كانت شدة الشعاع وفترة التعرض مناسبتين فإن بعض هذه الإلكترونات قد تكتسب ما يكفي من الطاقة لتحررها وأنطلاقها من السطح بطاقة حركة تعتمد على شدة الشعاع ولكن هذا مناقض لنتائج التجارب العملية المذكورة سابقاً.

وهناك نقطة أخرى عجزت الفيزياء الكلاسيكية عن تفسيرها وهي حدوث عمليتي سقوط الأشعة وصدور الإلكترونات الضوئية بصورة آنية ضمن حدود القياسات التجريبية. وتفترض الفيزياء الكلاسيكية وجود فترة زمنية بين السقوط والصدور تعتمد على شدة الشعاع الساقط، وقد تصل لعدة ساعات أو أكثر في حالات الشدة المنخفضة. لكن هذا أيضا مناقض لنتائج التجارب العملية المذكورة سابقاً.

2-2- كيفية تفسير العالم أينشتاين للمفعول الكهرضوئي:

تُفسر النظرية الكهرطيسية للضوء كثيراً من الظواهر الفيزيائية المختلفة، إلا أنها أخفقت تماماً في تفسير المفعول الكهرضوئي. بيّن أينشتاين فى العام 1905م أن هذه المشكلة التي أوجدها المفعول الكهرضوئي، يمكن تفسيرها فقط بالاعتماد على الفكرة التي وضعها العالم الفيزيائي النظري بلانك قبل ذلك التاريخ بخمس سنوات، حيث كان بلانك يبحث في تفسير

خصائص الإشعاع الصادر عن الأجسام الحارة المضيئة. إن بلانك افترض أن المادة تصدر الإشعاع على شكل دفقات (أو رشات) مقتطعة من الطاقة سماها كمات (أو كوانتا والمفرد منها كوانتوم). طاقة كل دفقة مرتبطة بتواتر معين (υ) هي ($h\upsilon$) أو عدد صحيح منها ($nh\upsilon$). لكن بلانك الذي اضطر إلى افتراض إصدار الطاقة على شكل كمات (كوانتا) لم يساوره شك بأنها تنتشر في الخلاء بعد إصدارها بشكل مستمر كأمواج كهرطيسية. قام العالم أينشتاين بإجراء تعديلين على نظرية بلانك (نظرية الكوانتات) فافترض أن كل دفقة من الإشعاع الكهرطيسي الصادر لها طاقة ($h\upsilon$) وليس عدداً صحيحاً منها ($nh\upsilon$) وسماها فوتوناً. وفرض أيضاً أن الضوء لا يُصدر فقط على شكل كوانتات، ولكنه ينتشر أيضاً على شكل كوانتات منفصلة.

استناداً إلى العالم أينشتاين أصبح الضوء وحيد اللون سيلاً من الفوتونات، وفق هذه الفرضية يمكن تفسير المفعول الكهرضوئي حالاً، حيث أنه عندما يصطدم فوتون تردده (υ) بسطح معدن يقدم جميع طاقته لأحد الإلكترونات في المعدن حيث يصرف جزء من هذه الطاقة وليكن (W) في فصل الإلكترون عن سطح المعدن، بينما يصرف القسم الآخر لإعطاء الإلكترون طاقة حركية ومنه يمكن أن نكتب ما يلي:

$$h\nu = W + \frac{1}{2}mv^2 = h\upsilon_0 + T_{\max} \qquad (3)$$

إن فرضية العالم أينشتاين تعني أنه يمكن تفسير الحدود الثلاثة السابقة كما يلي:

$h\upsilon$ = الطاقة التي يملكها فوتون الضوء الساقط على السطح.

$T_{\max}$ = الطاقة العظمى للإلكترون الضوئي الصادر.

$h\upsilon_0$ = الطاقة الصغرى اللازمة لاقتلاع الإلكترون من سطح المعدن المضاء.

وبالفعل يجب أن توجد طاقة صغرى لازمة لتحرير الإلكترون من

السطح المباشر للمعدن وإلا لانسكبت الإلكترونات منه حتى بغياب الضوء. نسمي الطاقة $(W = h\nu_0)$ التي تميز سطحاً معدنياً "**تابع العمل**" الخاص بالسطح. يمكننا إذن أن نكتب العلاقة (3) على الشكل التالي:

طاقة الفوتون = الطاقة الحركية العظمى للإلكترون + تابع العمل للسطح.

من السهل أن نرى – بعد هذا كله – لماذا لا تملك الإلكترونات الصادرة نفس الطاقة، وإنما تصدر بطاقات مختلفة تتفاوت بين الصفر و $T_{\max}$، وأن $W = h\nu_0$ هي الطاقة اللازمة لتحرير إلكترون من سطح المعدن مباشرة ومن الواضح أن طاقة أكبر من هذا يجب أن تصرف لتحرير الإلكترونات من طبقات أعمق من السطح المباشر للمعدن.

أما بالنسبة للخاصة الثالثة التي تنص على أن عدد الإلكترونات الصادرة في الثانية يتناسب مع شدة الإشعاع الوارد، إذا تذكرنا أن شدة الإشعاع تتناسب مع عدد الفوتونات الواردة إلى نقطة ما من السطح في واحدة الزمن، فإذا ازدادت شدة إشعاع ذي تواتر معين مناسب ازداد عدد الإلكترونات الصادرة ولكن طاقاتها الحركية تبقى ثابتة.

قبل الإنتهاء من تفسير العالم إينشتاين للمفعول الكهرضوئي لا بد من التنويه إلى أن دراسات الإصدار الكهرحراري تدعم أيضا هذا التفسير. فلقد كان معروفاً منذ زمن لا بأس به وقبل اكتشاف المفعول الكهرضوئي أن وجود مادة مسخنة يزيد من ناقلية الهواء المحيط بها، كما اكتشف في أواخر القرن ما قبل الماضي أن سبب هذه الظاهرة هو صدور الإلكترونات من هذه المادة. إن الإصدار الحراري يؤلف مبدأ عمل الأنابيب المخلاة المستعملة بشكل واسع في الإلكترونيات، حيث ينطلق في درجات الحرارة العالية من الاسلاك الدقيقة (الفتائل) أو المهابط المغلفة سيل من الإلكترونات تكتسب هذه الإلكترونات الصادرة طاقتها من التهيج الحراري للذرات التي يتركب منها المعدن، ومن أجل تحرر الإلكترونات من المعدن يجب أن تكتسب طاقة دنيا

تعادل طاقة ارتباطها بالمعدن. يمكن تعيين هذه الطاقة الدنيا وهي من أجل معظم السطوح مساوية تقريباً لتابع العمل في الفعل الكهرضوئي للسطح نفسه. نلاحظ أن في المفعول الكهرضوئي تقدم فوتونات الضوء الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون، بينما تقوم الحرارة بتقديمها في المفعول الكهرحراري.

3- أشعة X أو الأشعة السينية:

إن المفعول الكهرضوئي يؤمن الإثبات المقنع بأن فوتونات الضوء تنقل الطاقة إلى الإلكترونات، والسؤال الذي يطرح نفسه الآن هو إذا ما كان العكس ممكناً أيضاً، أي هل يمكن لكل الطاقة الحركية لإلكترون متحرك او لجزء منها أن يتحول إلى فوتون؟ في الحقيقة أن الحادثة المعاكسة للمفعول الكهرضوئي ليست ممكنة الحدوث وحسب، بل إنها اكتشفت – رغم أنها لم تفهم تماماً – قبل العمل النظري لكل من العالمين بلانك وأينشتاين.

إن الأشعة السينية هي من المواضيع الفيزيائية التي تجلت بوساطتها أهمية البحث العلمي على أوسع نطاق. ولم يمض على اكتشاف الأشعة السينية من قبل العالم الألماني رونتجن (Rontgen) سوى ثلاثة أشهر فقط حتى وجدنا أكبر مستشفيات مدينة فيّـنا يخصص جناحاً للبحث العلمي للتحري عن خواص وإمكانية استخدام الأشعة السينية للأغراض الجراحية. منذ ذلك التاريخ وحتى الآن انتشرت الأجهزة المولدة للأشعة السينية في جميع بقاع العالم حتى كاد لا يخلو منها مستشفى أو عيادة طبيب أو مصنع أو جامعة.

وكانت التطبيقات الصناعية للأشعة السينية لا تقل أهمية عن تطبيقاتها الطبية، وكان وما زال للأشعة السينية شأن كبير في التحريات الذرية والتركيب الجزيئي للمادة.

بعض الأحيان لنقص عدد الكريات الحمر والكريات البيض وقد يؤدي أيضاً إلى حروق جلدية كانت مميتة ورهيبة النتائج لبعض الباحثين.

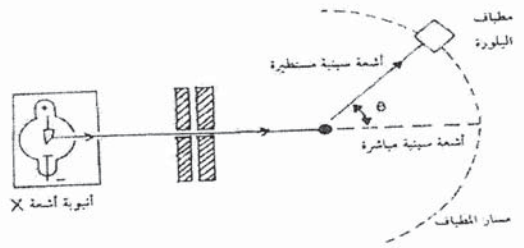
وعلى العاملين في حقل هذه الأشعة أن يفحصوا باستمرار أجهزة الأشعة السينية بوساطة عداد غايغر أو يضعوا أفلاماً خاصة على أجسامهم طوال النهار لمعرفة ما إذا كان هناك تسرب للأشعة من الجهاز من غير النافذة المعدة له أو لمعرفة ما إذا كان الباحث قد تعرض للأشعة السينية أثناء عمله.

إن الجرعة التي يمكن لجسم الإنسان تحملها دون مضاعفات هي حوالي (0.5) رونتجن في الأسبوع. أما إذا كانت الأطراف (اليدان والرجلان) هي المعرضة فقط فيمكن تحمل (1.5) رونتجن في الأسبوع. ويبقى أن نشير إلى أن الباحثين في ميدان صحة الأجهزة التناسلية، يعتبرون أن عشر هذه الكمية فقط يمكن تحمله دون مضاعفات.

4- مفعول كومبتون:

لقد استخدم العالم كومبتون (Compton) مقياس الطيف البلوري عام 1913 ميلادية لدراسة استطارة (تشتت) الأشعة السينية القاسية بعد سقوطها على الكربون (الجرافيت). ويوضح الشكل (12) الجهاز الذي استخدمه العالم كومبتون في تجربته التي برهنت بصورة مباشرة على الطبيعة الجسيمية للأشعة السينية وأكد بالتالي فرضية أينشتاين التي استخدمها لتفسير المفعول الكهرضوئي. ويتكون الجهاز بصورة أساسية من أنبوبة لتوليد الأشعة السينية يمكن الحصول منها على شعاع وحيد الطاقة ويُسلط هذا الشعاع خلال حواجز فيها فتحات صغيرة مناسبة لتجميعه واسقاطه على

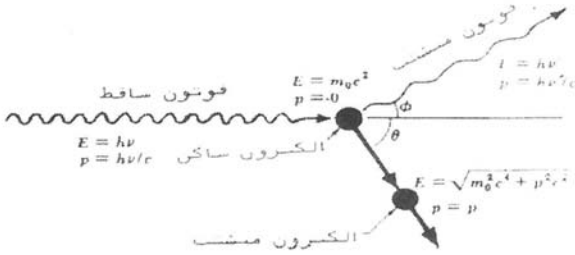
قطعة من الكربون (الجرافيت)، ويوجد كذلك مطياف بلوري يمكن أن يتحرك على محيط دائرة تكون قطعة الجرافيت في مركزها.



الشكل (12): جهاز كومبتون لدراسة استطارة الأشعة السينية.

لا يمكن تفسير ظاهرة مفعول كومبتون من خلال النظرية الكلاسيكية، ولقد استخدم العالم كومبتون أفكار بلانك وأينشتاين عن تكميم الطاقة لتفسير هذه الظاهرة. وافترض كومبتون أن الاشعاع يتفاعل مع المادة على صورة كمات منفصلة من الطاقة (فوتونات) وعامل الفوتونات وكأنها جسيمات، ودرس بالتالى تصادم الفوتون والإلكترون بنفس الطريقة التي تدرس تصادم كرتين صغيرتين فى الميكانيك الكلاسيكي.

يوضح الشكل (13) كيف يمكن تمثيل مثل هذا التصادم، حيث يصطدم فوتون الأشعة السينية بإلكترون ثابت فى البداية بالنسبة لجملة إحداثيات المخبر. ونتيجة لذلك فإنه يتشتت بعيداً عن اتجاه حركته الأصلية ويبدأ الإلكترون بالحركة بسبب التصادم.



الشكل (13): مفعول كومبتون.

يمكننا أن نعدّ الفوتون فقد كمية من الطاقة تساوي الى الطاقة الحركية التي اكتسبها الإلكترون على الرغم من أنه يوجد فوتونين مختلفين. إذا كان تواتر الفوتون الأصلي (ν) فإن تواتر الفوترن المشتت يكون (ν') حيث:

$$h\nu - h\nu' = T \qquad (23)$$

لكن من قوانين أينشتاين في النظرية النسبية نكتب:

$$E = (m_0^2c^4 + p^2c^2)^{1/2} \qquad (24)$$

حيث (m_0) هي الكتلة الساكنة للجسيم، و (c) سرعة الضرء و (p) كمية الحركة، وبما أن الفوتون لا يملك كتلة سكونية فإن طاقته الكلية:

$$E = pc \qquad (25)$$

وبما أن طاقة الفوتون تُعطى بالعلاقة التالية:

$$E = h\upsilon \qquad (26)$$

فعندئذ نجد أن كمية حركة الفوتون تساوي إلى:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\upsilon}{c} \qquad (27)$$

إن كمية الحركة، بعكس الطاقة، مقداراً متجهاً تملك اتجاهاً بالإضافة إلى القيمة العددية. خلال عملية التصادم يجب أن تكون كمية الحركة محفوظة في كلا الإتجاهين المتعامدين. والإتجاهين اللذين نختارهما هنا هما اتجاه الفوتون الأصلي والإتجاه العمودي عليه في المستوي الذي يحوي الإلكترون والفوتون المتشتت. إن كمية حركة الفوتون الأصلي تساوي $(h\upsilon/c)$ والمتشتت $(h\upsilon'/c)$، والإلكترون الساكن (0) والمتحرك (p).

لدينا في اتجاه الفوتون الأصلي وفق مبدأ انحفاظ كمية الحركة:

$$\frac{h\upsilon}{c} + 0 = \frac{h\upsilon'}{c}\cos\phi + p\cos\theta \qquad (28)$$

وفي الإتجاه العمودي عليه نجد المعادلة التالية:

$$0 = \frac{h\upsilon}{c}\sin\phi - p\sin\theta \qquad (29)$$

حيث ϕ هي الزاوية الكائنة بين اتجاهي الفوتونين الأصلي والمشتت، θ هي الزاوية بين اتجاه الفوتون الأصلي واتجاه الإلكترون المشتت.

الآن بضرب طرفي العلاقتين (28) و (29) بـــ c وكتابتهما كما يلي:

$$pc\cos\theta = h\upsilon - h\upsilon'\cos\phi$$
$$pc\sin\theta = h\upsilon\sin\phi$$

بتربيع طرفي كل من المعادلتين السابقتين وجمعهما نجد ما يلي:

$$p^2c^2 = (h\upsilon)^2 - 2(h\upsilon)(h\upsilon')\cos\phi + (h\upsilon')^2 \qquad (30)$$

لكن حسب قوانين النظرية النسبية، الطاقة الكلية للجسيم تساوي إلى:

$$E = T + m_0c^2$$

أي مجموع الطاقتين الحركية والساكنة. ومن جهة أخرى وحسب النظرية النسبية أيضا:

$$E = (m_0^2c^4 + p^2c^2)^{1/2}$$

وبمساواة العبارتين السابقتين نجد التالي:

$$(T+m_0c^2)^2 = m_0^2c^4 + p^2c^2$$

أو بشكل آخر نكتب العلاقة السابقة:

$$p^2c^2 = T^2 + 2m_0c^2T \qquad (31)$$

وبما أن:

$$T = h\nu - h\nu'$$

فيكون لدينا ما يلي:

$$p^2c^2 = (h\upsilon)^2 - 2(h\upsilon)(h\upsilon') + (h\upsilon')^2 + 2m_0c^2(h\upsilon - h\upsilon') \qquad (32)$$

بمساواة (30) و (32) نجد أن:

$$2m_0c^2(h\upsilon - h\upsilon') = 2(h\upsilon)(h\upsilon')(1-\cos\phi) \qquad (33)$$

من المناسب التعبير عن هذه العلاقة بدلالة طول الموجة بدلاً من التواتر. بتقسيم طرفي المعادلة (33) على $2h^2c^2$ فنجد ما يلي:

$$\frac{m_0c}{h}\left(\frac{\upsilon}{c} - \frac{\upsilon'}{c}\right) = \frac{\upsilon}{c}.\frac{\upsilon'}{c}(1-\cos\phi) \qquad (34)$$

وبما أن:

$$\frac{1}{\lambda'} = \frac{\upsilon'}{c} \quad \text{و} \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{\upsilon}{c}$$

فسيكون لدينا ما يلي:

$$\frac{m_0c}{h}\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'}\right) = \frac{(1-\cos\phi)}{\lambda\,\lambda'}$$

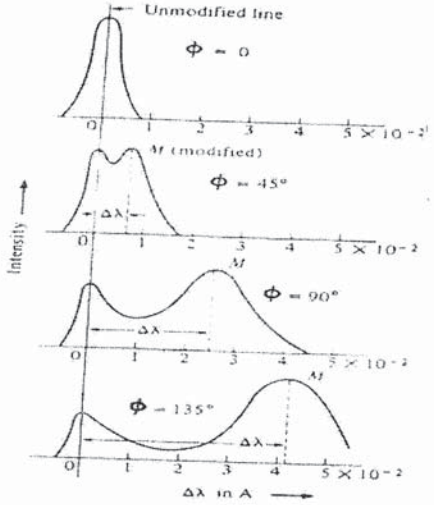
أو بشكل آخر:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c}(1-\cos\phi) = \frac{2h}{m_0c}\sin^2\frac{\phi}{2} \qquad (35)$$

ان هذه المعادلة تعبر عن مفعول كومبتون وتعتبر برهاناً جيداً على النظرية الكوانتية للإشعاع.

ان المعادلة (35) تعين التغير المتوقع فى طول الموجة للفوتون المتشتت بزاوية ϕ نتيجة اصطدامه بجسيم كتلته (m_0). وهو مستقل عن طول الموجة (λ) للفوتون الوارد. تدعى الكمية (h/m_0c) طول موجة كومبتون للجسيم المشتت ويساوي $(0{,}024A^o)$ من أجل الإلكترون. نلاحظ من المعاملة (35) أن أكبر تغير ممكن يحدث عندما $(\phi=\pi)$، حيث يساوي هذا التغير ضعف طول موجة كومبتون (h/m_0c). بما أن طول موجة كومبتون للإلكترونات يساوي إلى $(0{,}024A^o)$ وهو أقل بكثير من حالة الجسيمات الأخرى بسبب كبر كتلتها الساكنة، فإن التغير الأعظمي في طول الموجة في مفعول كومبتون يساوي $(0{,}048A^o)$.

يبين الشكل (14) نتيجة كومبتون عند زوايا مختلفة. ويلاحظ من الشكل أن الأشعة السينية المشتتة تتكون من مركبتين، ويساوي طول موجة إحداهما طول موجة الأشعة السينية الساقطة، أما المركبة الثانية فقد انزاحت نحو الطاقات المنخفضة (أي زاد طول موجتها)، ويعتمد مقدار الإزاحة في طول الموجة على زاوية التشتت ϕ كما هو واضح في الشكل. ولقد وجد كومبتون تجريبياً أن الإزاحة في طول الموجة والذي يعرف بإزاحة كومبتون $(\lambda'-\lambda)$ يتناسب مع $\left(\sin^2\frac{\phi}{2}\right)$ وأن ثابت التناسب يساوي $(4{,}8.10^{-12}m)$. وأن هذه الإزاحة لا تعتمد على نوع المادة التي تسقط عليها الأشعة السينية.



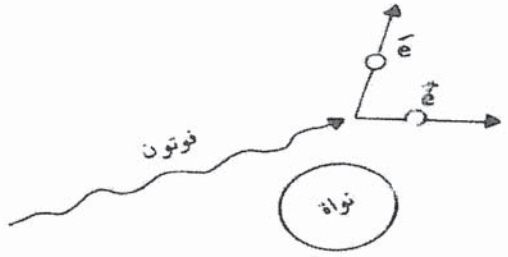
الشكل (14): نتيجة تجربة كومبتون.

لقد قلنا أن الأشعة السينية المشتتة في أي اتجاه تحوي جزءاً لا بأس به من الأشعة السينية لها نفس طول الموجى الأصلي. ليس من الصعب فهم ذلك لأنه عند الحصول على المعادلة (35) فرضنا أن الجسيم المتشتت حر الحركة وهذا منطقى لأن أكثر الإلكترونات في المادة ترتبط ارتباطاً ضعيفاً مع ذراتها. إلا أن بعض الإلكترونات الأخرى ترتبط أرتباطاً قوياً مع ذراتها. وبالتالي فإن الذرة بأكملها تتحرك عند اصطدام الفوتون بها، بدلاً من تحرك الإلكترون لوحده. إذا حدث هذا فإن قيمة (m_0) في المعادلة (35) تكون كتلة الذرة بأكملها. وعادة تساوي عشرات الألوف من المرات من كتلة الإلكترون، وبالتالي فإن التغير في طول الموجة يكون صغيراً جداً لا يمكن قياسه.

5- خلق وفناء الأزواج:

a – خلق الأزواج:

بالإضافة إلى ظاهرة المفعول الكهرضوئي وظاهره مفعول كومبتون. توجد ظاهرة، يتفاعل بنتيجتها الفوتون مع المادة فاقداً طاقته، ومتحولاً إلى زوج من الجسيمات ذات طاقة سكونية وحركية، تسمى ظاهرة خلق (توليد) الأزواج، تعدّ ظاهرة خلق الأزواج مثالاً حقيقياً على تحول الطاقة الإشعاعية إلى طاقة سكونية، وإلى طاقة حركية أيضاً. في هذه الظاهرة الموضحة في الشكل (15) نلاحظ أن الفوتون ذو الطاقة العالية يفقد كامل طاقته $h\upsilon$ نتيجة اصطدامه مع النواة ويتولد بدلاً عنها زوج من الجسيمات المادية إلكترون وبوزيترون، لكل منهما طاقة حركية معينة ويطلق عليها جسيمات β مستخدمين الرمز β^- للإلكترون و β^+ للبوزيترون.



الشكل (15): ظاهرة خلق الزوج إلكترون – بوزيترون.

يعدّ البوزيترون جسيماً أولياً يتمتع بصفات مطابقة تماماً للإلكترون باستثناء وحيد هو أن شحنته تعاكس بالإشارة شحنة الإلكترون ولذا يدعى أحياناً مضاد المادة. نهمل في عملية خلق الأزواج الطاقة المسببة في ارتداد النواة. نتيجة الكتلة الكبيرة للنواة. واعتماداً على مبدأ مصونية الطاقة نستطيع كتابة علاقة الطاقة الكلية النسبية لعملية خلق الأزواج بالشكل التالي:

$$h\nu = E_- + E_+ = (m_0c^2 + T_-) + (m_0c^2 + T_+) \qquad (36)$$

أو:

$$h\nu = T_- + T_+ + 2m_0c^2 \qquad (37)$$

حيث E_- و E_+ الطاقة الكلية النسبية على التوالي لكل من الإلكترون والبوزيترون بينما T_- و T_+ الطاقة الحركية لكل منهما. والطاقة السكونية لهما متساوية وتساوي m_0c^2. يلاحظ أحياناً أن للبوزيترون المتولد طاقة حركية T_+ أكبر من الطاقة الحركية للإكترون T_- $(T_+ > T_-)$ ، لأنه نتيجة الشحنة الموجبة للنواة يتسارع البوزيترون بينما تحدث عملية كبح (فرملة) للإلكترون اعتماداً على قانون كولون بين الشحنات الكهربائية.

لنحلل الآن عملية خلق الأزواج، وذلك بإهمال عملية التفاعل ذاتها، والأخذ بعين الاعتبار نقط الحالة قبل التفاعل وبعده. إن القوانين الأساسية التي يجب أن تتحقق في عملية الخلق هي: قانون مصونية الطاقة الكلية النسبية، قانون مصونية كمية الحركة وقانون مصونية الشحنة. اعتماداً على هذه القوانين من السهل الملاحظة أنه في الفضاء الخالي لا يمكن للفوتون أن يتلاشى ويتولد بدلاً عنه زوج من الجسيمات المادية. لكن وجود النواة الثقيلة (التي يمكن أن تأخذ جزءاً من كمية الحركة ولا تغير بشكل ملحوظ ميزان الطاقة) ضروري في عملية خلق الأزواج كي يتحقق معاً قانون مصونية كمية الحركة وقانون مصونية الطاقة. أما قانون مصونية الشحنة فمحقق تماماً بشكل أوتوماتيكي لأنه ليس للفوتون شحنة كهربائية، ومحصلة الشحنة الكهربائية للزوج المتولد إلكترون – بوزيترون تساوي الصفر. نستطيع أن نثبت الآن اعتماداً على العلاقة (38) أن الطاقة الأصغرية للفوتون المعروفة بشكل آخر بالطاقة الحدية اللازمة لتوليد زوج الجسيمات تساوي $2m_0c^2$، أي

$1{,}02MeV$ حيث $(1MeV = 10^6 eV)$، ويوافق هذا طول موجة يساوي $0{,}012A^o$. إذا كان طول الموجة أقل من ذلك وبنفس الوقت الطاقة أكبر من الطاقة الحدية، فإن للزوج المتولد بالإضافة إلى طاقته السكونية طاقة حركية معينة أيضاً. تحدث عملية خلق الأزواج من أجل الفوتونات ذوات الطاقة العالية جداً. وهي فوتونات تقع في مجال أشعة رونتجن التي لها أطوال أمواج قصيرة جداً وفي مجال أشعة غاما γ التي ما هي إلا أشعة كهرطيسية طاقتها عالية جداً (تواترها كبير جداً وطول موجتها صغير جداً) تكون طاقة الفوتونات $h\nu$ في هذه المجالات مساوية أو أكبر من $2m_0c^2$. تؤكد النتائج التجريبية على أن امتصاص الفوتونات يحدث نتيجة تفاعلاتها مع الماده ويتم هذا التفاعل في مجال الطاقات المنخفضة (المفعول الكهرضوئي)، وفي مجال الطاقات المتوسطة (مفعول كومبتون)، وفي مجال الطاقات العالية (ظاهرة خلق الأزواج).

يتولد الزوج إلكترون – بوزيترون في الطبيعة بواسطة فوتونات الأشعة الكونية (Cosmic Ray) التي تأتي إلينا من النشاط الشمسي أو من انفجار نجوم حديثة الولادة، أما في المختبرات فيتولد بمسرعات الجسيمات. والأزواج الأخرى من الجسيمات المادية مثل البروتون ومضاد البروتون يمكن توليدها بقدر ما يكون للفوتونات من طاقة عالية كافية لعملية التوليد. لأن للإلكترون والبوزيترون أقل كتلة سكونية من بين جميع الجسيمات المعروفة (لا نأخذ بعين الاعتبار الجسيمات معدومة الكتلة)، لذلك فإن الطاقة الحدية، اللازمة لتوليدهما تكون أيضاً أصغر ما يمكن. لقد أثبتت التجارب الكمومية منذ عام 1932م ظاهرة توليد الأزواج، بينما لم يُعثر خلال مراحل تطور النظرية الكلاسيكية على أي معلومات حول وجود هذه الظاهرة.

b – فناء الأزواج:

ترتبط مع ظاهرة خلق الأزواج ظاهرة حقيقية معاكسة لها تعرف بظاهرة فناء الأزواج. وتنص أنّه عندما يتواجد جسيمان ماديان ساكنان – إلكترون وبوزيترون – بالقرب من بعضهما البعض فإنهما ينضمان ويخضعان للفناء ويقال أن المادة (إلكترون) فنت ضدها (البوزيترون). تحدث بالنتيجة عملية إبادة لجسيمين ماديين في المكان الذي تظهر فيه أشعة كهرطيسية. بما أن كمية حركة الجملة الابتدائية تساوي الصفر، وكمية الحركة في العملية المعتبرة يجب أن تكون محفوظة، لذلك لا يمكن ظهور فوتون واحد، لأن الفوتون الوحيد له كمية حركة معينة لا تساوي الصفر. العملية الأكثر احتمالاً هي ظهور فوتونين يتحركان باتجاهين متعاكسين بحيث يكون لهما نفس القيمة العددية لكمية الحركة. إن عملية ظهور ثلاث فوتونات أيضاً ممكنة لكن باحتمال أقل.

في عملية ظهور الفوتونين الموضحة في الشكل (16) نستطيع اعتماداً على قانون مصونية كمية الحركة أن نكتب $\vec{P}_1+\vec{P}_2=0$ وبالتالي $\vec{P}_1=-\vec{P}_2$. ينتج من ذلك أن كمية حركة الفوتونين متعاكسة بالاتجاه، بينما متساوية بالقيمة المطلقة $|\vec{P}_1|=|\vec{P}_2|$ أو $P_1=P_2$. نستنتج من ذلك أن: $h\upsilon_1/c=h\upsilon_2/c$ وبالتلي $\upsilon_1=\upsilon_2=\upsilon$. وهذا يعني أن للفوتونين الناتجين نفس التواتر ونفس طول الموجة $\lambda_1=\lambda_2=\lambda$ ونفس الطاقة $h\upsilon$.

الشكل (16): فناء الزوج إلكترون – بوزيترون وظهور فوتونين.

بما أن الطاقة الكلية النسبية للجملة مصونة لذلك ينتج:

$$m_0c^2+m_0c^2=h\upsilon+h\upsilon$$

لأن الطاقة الحركية الابتدائية لكل من الإلكترون والبوزيترون تساوي الصفر (حالة السكون)، نستنتج من ذلك أن:

$$h\upsilon=m_0c^2=0{,}51\ MeV$$

أو:

$$\frac{hc}{\lambda}=m_0c^2$$

ومنه:

$$\lambda=\frac{h}{m_0c}=0{,}0243A^o$$

وهو عبارة عن طول موجة كل من الفوتونين الناتجين. إذا كان لزوج الجسيمات طاقة حركية ابتدائية، فإنه سيكون لكل من الفوتونين الناتجين طاقة أكبر من $0{,}51\ MeV$ وطول موجة يمكن أن يكون أصغر من $0{,}0243A^o$.

تتولد البوزيترونات في عملية خلق الأزواج، وعندما يدخل البوزيترون عبر مادة فإنه يفقد جزءاً من طاقته نتيجة الصدم المتتالي حتى اللحظة التي يشكل فيها مع إلكترون ما جملة مرتبطة تعرف بالبوزيترون – إلكترون، ويكون لهذه الجملة زمن حياة قصير جداً، وفي زمن يقارب $10^{-10}s$ من لحظة التشكل تفنى هذه الجملة إلى فوتونات، حيث يتحرك كل من الإلكترون والبوزيترون حول مركز الكتلة المشترك لها لتأدية "رقصة الموت" قبل فناؤها المشترك.

بما أن الجملة المرتبطة بوزويترون – إلكترون تفنى إلى فوتونات لذلك نقول عن البوزيترون أنه جسيم مضاد للإلكترون وبالتالي يمكن الاعتقاد بأن لكل جسيم مادي، جسيم آخر مضاد له. لقد أُثبت تجريبياً أنّ هناك جسيمات مضادة للبروتون وللنترون وفي معظم الحالات تفنى الجملة المؤلفة

من الجسيم ومضاده الى فوتونات وقد تفنى إلى جسيمات أخرى. فمثلاً الجملة المؤلفة من البروتون – مضاد البروتون تفنى إلى ميزون.

من الملاحظ أن الكون غير مؤلف من جمل متناظرة وبالتالي قد لا يكون متناظر في نشأته، ذلك لأنه مؤلف من إلكترونات وبروتونات ونترونات وغيرها، ولم يبدو مكوناً من مضادات هذه الجسيمات. فالمادة ومضادها لا يمكن ان يوجدا معاً في مزيج واحد وإلا لخضعا للفناء المباشر، لكنهما قد يوجدا منفصلين على مسافات من مرتبة السنين الضوئية. والأسئلة التي تطرح نفسها الآن كثيرة نذكر منها: لماذا لم تتصف الجسيمات المادية المضادة بالإستمرار والديمومة كبقية الجسيمات المادية الأخرى، ولماذا لم نشعر بوجودها منذ فترة بعيدة، وهل الكون برمّته متناظر، ولماذا لا توجد المادة ومضادها في مزيج واحد؟ وهناك الكثير من الأسئلة المشابهة التي لم تلق جواباً قطعياً حتى الآن.

مسائل محلولة:

مثـــال (1):

إذا كان تابع العمل للبوتاسيوم يساوي إلى $(2eV)$، فما هي الطاقة العظمى للإلكترونات الضوئية عندما يسقط على السطح ضوء فوق بنفمجي طول موجته يساوي إلى $(350nm)$؟

الحـــل:

طاقة الإلكترون العظمى $(T_{\max})$ = طاقة الفوتون الساقط – تابع العمل للسطح. أو بشكل آخر:

$$T_{\max} = h\nu - W$$

ولكن طاقة الفوتون الساقط تُحسب كمل يلي:

$$h\upsilon = \frac{h.c}{\lambda} = \frac{6{,}63.10^{-34}\,J.s \times 3.10^{8}\,m/s}{350.10^{-9}\,m} = 5{,}7.10^{-19}\,J$$

$$= \frac{5{,}7.10^{-19}\,J}{1{,}6.10^{-19}\,J/eV} = 3{,}6\,eV$$

ومنه فإن الطاقة العظمى للإلكترونات الكهرضوئية تكون مساوية إلى:

$$T_{\max} = h\upsilon - W = 3{,}6 - 2 = 1{,}6\,eV$$

مثـــال (2):

إذا كان في أجهزة الأشعة السينية تستخدم كمونات مسرعة حتى $(50kV)$، والمطلوب: هو إيجاد أكبر تردد في الإشعاع الصادر عن هذا الكمون.

الحـــل:

أولاً يجب حساب أقصر طول موجة في الإشعاع الصادر عن هذا الكمون، لذلك فإننا نستخدم القانون التالي:

$$\lambda_{\min} = \frac{1{,}24.10^{-6}\,volt.m}{V(volt)} = \frac{1{,}24.10^{-9}\,volt.m}{50000\,(volt)} = 2{,}5.10^{-11}\,m = 0{,}25A^{o}$$

مع الأخذ بعين الاعتبار أن $(50kV = 5.10^{4}V)$.

وطول الموجة هذا يوافق تردداً مقداره:

$$\nu_{\max} = \frac{c}{\lambda_{\max}} = \frac{3.10^{8}\,m/s}{0{,}25.10^{-10}\,m} = 1{,}2.10^{19}\,s^{-1} = 1{,}2.10^{19}\,Hz$$

مثـــال (3):

إذا كان تابع العمل للنحاس يساوي إلى $(4{,}7eV)$ والمطلوب حساب ما يلي:

1- عتبة التردد للإصدار الكهرضوئي للنحاس.

2- طاقة حركة الإلكترونات الكهرضوئية العظمى الصادرة من النحاس

مكتبة A to Z