د. مُظفر جاسم
2018

الفصل الرابع

الأشعة السينية X-Rays

4-1: اكتشاف الأشعة السينية Discovery of X-Rays

في الظاهرة الكهروضوئية تنتقل طاقة الفوتونات إلى الإلكترونات. ولكن هل من الممكن حصول العكس أي انتقال الطاقة الحركية من الإلكترون المتحرك إلى الفوتون؟ والجواب هو نعم وقد اكتُشف هذا عملياً من قبل رونتگن Roentgen في عام 1895. حيث وجد أنه عند تشغيل أنبوب الأشعة الكاثودية فإن حزمة من الإلكترونات عالية السرعة قد ضربت هدفاً معدنياً من سيانيد البلاتين والباريوم موضوع على مسافة من الأنبوب وأنتجت نوعاً جديداً من الإشعاع ذا اختراق كبير جداً. وقد سماها رونتگن بالأشعة السينية (أي المجهولة) لأنه لم يكن يعرف طبيعتها. وبعد أشهر من اكتشاف رونتگن التُقطت أولى الصور الطبية بواسطة الأشعة السينية. وخلال عدة سنوات أصبح من الواضح أن الأشعة السينية هي اهتزازات كهرومغناطيسية مشابهة للضوء ولكن بأطوال موجية قصيرة للغاية وقدرة اختراق كبيرة. وأظهرت التقديرات التقريبية المستحصلَة من حيود الأشعة السينية بواسطة فتحة ضيقة أن الأطوال الموجية للأشعة السينية تبلغ حوالي $10^{-10}m$، وهي بنفس مرتبة قيمة المسافات الذرية في البلورات. ولما أدرك رونتگن أهمية اكتشافه استمر بدراسة خواص هذه الأشعة الجديدة وتوصل إلى ما يلي:

1- تُعتبر جميع المواد شفافة بالنسبة لهذه الأشعة وتستطيع النفاذ خلالها واختراقها بدرجات تختلف حسب طبيعة المادة.

2- تنتقل بخطوط مستقيمة ولا تتأثر بالمجالين المغناطيسي والكهربائي فهي ليست جسيمات مشحونة.

3- تستطيع الأشعة السينية تفريغ شحنة الأجسام المشحونة كهربائياً، وسواء كانت الشحنة موجبة أو سالبة. كما إنها تستطيع أن تؤين الغازات عند مرورها خلالها.

4- تسبب الأشعة السينية توهج المواد الفسفورية وتؤثر على لوح التصوير.

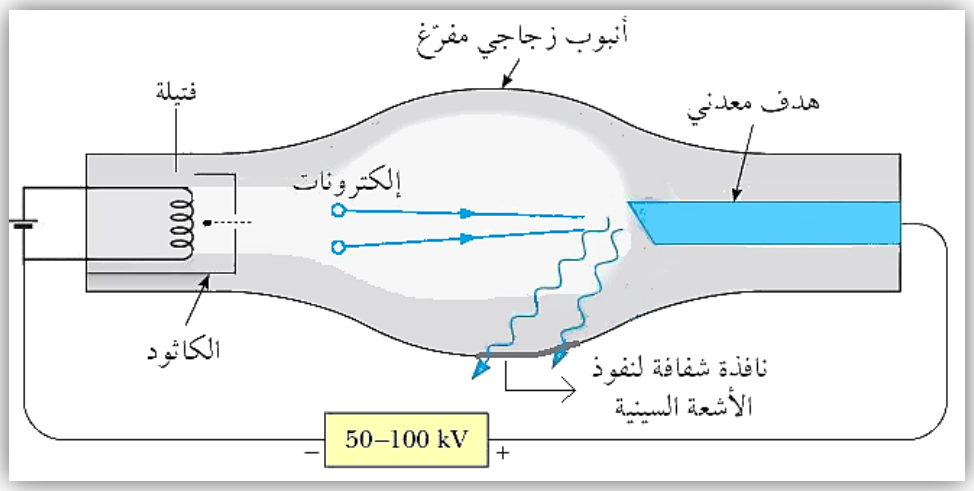
5- تتولد الأشعة السينية عند اصطدام الأشعة الكاثودية في أنبوب التفريغ بأي جسم صلب. وتكون العناصر الثقيلة مثل البلاتين أكثر كفاءة من العناصر الخفيفة مثل الألمنيوم.

6- توجد مواد كثير تومض عند سقوط الأشعة السينية عليها بالإضافة إلى سيانيد البلاتين والباريوم مثل مركبات الكالسيوم والملح الصخري وغيرها.

7- كلما زادت سرعة الإلكترونات المسببة لانبعاث الأشعة السينية زادت نفوذية الأشعة السينية المتولدة، وحين يزداد عدد تلك الإلكترونات تزداد شدة حزمة الأشعة السينية.

وحاول رونتگن أن يُعَرض الأشعة السينية للانعكاس والانكسار، ولكنه لم ينجح. وبعد ربع قرن تقريباً تبين أن الأشعة السينية يمكن أن تنعكس وتنكسر. وأحد أسباب عدم تمكن رونتگن من هذا هو أن الأشعة السينية ذات طول موجي قصير، ولهذا يكون معامل انكسارها صغيراً جداً وأقل قليلاً من واحد. وفي عام 1906 أثبت باركلا Barkla عملياً امكانية استقطاب الأشعة السينية، وفي عام 1912 نجح لاوي Laue أن يثبت حيود الأشعة السينية بواسطة البلورات crystals. وهكذا تجارب أثبتت الطبيعة الموجية للأشعة السينية. ويقع طيف الأشعة السينية ضمن مدى يقارب $(0.01 \rightarrow 10\ nm)$، وهذه الحدود ليست حدية حيث يتداخل الطول الموجي الأقصر مع أشعة گاما ويتداخل طول الموجة الأطول مع الأشعة فوق البنفسجية.

4-2: إنتاج الأشعة السينية Production of X-Rays



الشكل 4-1: أنبوب الأشعة السينية.

تنبعث الأشعة السينية عندما تقوم الإلكترونات ذات الطاقة العالية أو أي جسيمات مشحونة أخرى بقصف هدف معدني. ففي تجربة رونتگن عندما اصطدمت الأشعة الكاثودية بجدران أنبوب التفريغ أصبحت هذه الجدران مصدراً للأشعة السينية. ويوجد عدة أنواع من الأنابيب التي تستعمل لإنتاج الأشعة السينية، ويبين الشكل 4-1 مخططاً لأحد هذه الأنواع حيث يُسخن القطب السالب (الكاثود) بواسطة فتيلة مجاورة مصنوعة من التنكستن يمر خلالها تيار كهربائي، فتنتج إلكترونات بواسطة الانبعاث الحراري. ويُسلط فرق جهد عالٍ V يتراوح بين 50 و $100\ kV$ بين الكاثود والهدف المعدني يعمل على تعجيل

الإلكترونات نحو الهدف. وتكون طاقة هذه الإلكترونات النشطة من 50 إلى $100\ keV$. ويُصنع الهدف من مادة ذات درجة انصهار عالية وعددها الذري كبير مثل النحاس والتنكستن والموليبدينوم. ويشكل سطح الهدف زاوية مع اتجاه حزمة الإلكترونات الساقطة، وتمر الأشعة السينية المنبعثة من الهدف من خلال الجدار الجانبي للأنبوب. كما إن الجهاز مفرغ من الهواء كي يسمح للإلكترونات بالوصول إلى الهدف من دون عوائق.

3-4: قياس شدة الأشعة السينية Measurement of the Intensity of X-Rays

تقاس شدة الأشعة السينية بطرق عديدة مثل:

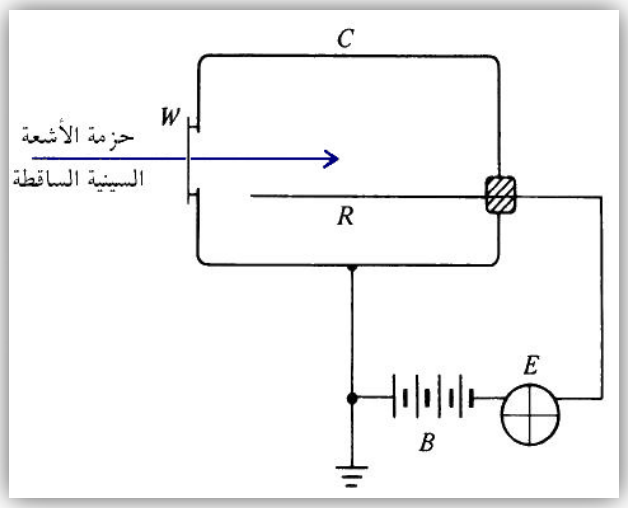
1- قياس شدة التوهج (الفلورة) الذي تحدثه الأشعة في بعض المواد.

2- قياس مقدار تأثيرها على لوح التصوير.

3- قياس مقدار ارتفاع درجة الحرارة لقطعة معدنية عند امتصاصها للأشعة مثل الرصاص.

4- قياس مقدار التأين الذي تسببه الأشعة.

وتُستخدم حجرة التأين ionization chamber للاستفادة من ظاهرة التأين لحساب شدة الأشعة السينية. وفي الشكل 4-2 حجرة تأين نموذجية تتكون من اسطوانة معدنية C يخترقها قطب معدني R معزول عنها ويكون بموازاة محورها. وتحتوي الاسطوانة على هواء أو غاز ملائم يقترب ضغطه من الضغط الجوي. وتدخل الأشعة السينية إلى الحجرة من خلال نافذة رقيقة W والتي تُصنع عادة من المايكا أو الألمنيوم، وسوف تؤين الأشعة السينية الغاز الموجود في الحجرة. وتحافظ البطارية B على فرق جهد بين R و C بحيث يتم تحديد حركة الأيونات باتجاه C و R بمجرد تشكيلها، فيتحرك كل أيون نحو القطب المخالف له بالشحنة، ويتسبب ذلك في مرور تيار كهربائي والذي يقاس بواسطة الإلكتروميتر E. وقد وُجد أن تيار التأين يتناسب طردياً مع شدة الأشعة السينية الساقطة.



الشكل 4-2 : حجرة التأين.

ويُستخدم عداد گايگر والعداد الوميضي أيضاً لقياس شدة الأشعة السينية. وقد وُجد أن شدة الأشعة السينية المنبعثة من أنبوب معين تعتمد على نوع مادة الهدف وفرق الجهد بين الهدف والكاثود.

4-4: أطياف الأشعة السينية Spectra of X-Rays

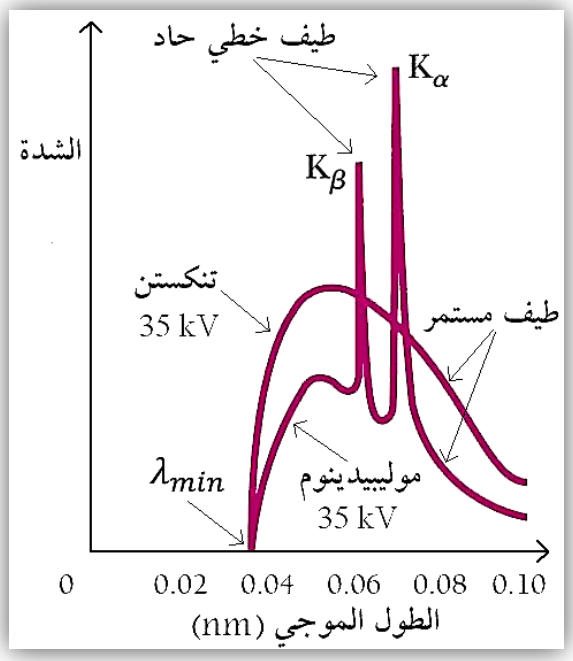
عند قياس شدة الأشعة السينية المنبعثة عن هدف كدالة لطول موجتها بواسطة مطياف بلوري crystal spectrometer وُجد بأن طيف الأشعة السينية النموذجي يتألف من نوعين متميزين من الأطياف:

1- طيف مستمر continuous spectrum (أي حزمة عريضة من الأطوال الموجية).

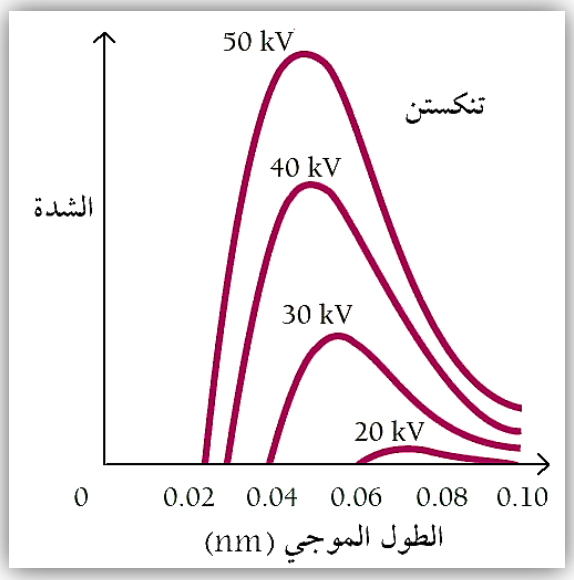
2- طيف خطي line spectrum حاد مركب على الطيف المستمر.

وفي الشكل 4-3 وُضحت أطياف الأشعة السينية النموذجية، حيث رُسمت شدة الإشعاع مقابل الطول الموجي. ويبين منحنى مادة التنكستن tungsten طيفاً مستمراً للأشعة السينية منبعثاً من هدف التنكستن في أنبوب للأشعة السينية خاضع لجهد $35\ kV$. أما منحنى الموليبيدينوم molybdenum فنتج عن ظروف مماثلة، ولكنه بخطين حادّين يميزان عنصر الموليبدينوم ومتراكبين على الطيف المستمر. ويُعرف هذان الخطان بخطي K_α و K_β للموليبدينوم. وللحصول على خطي K_α و K_β للتنكستن وجب أن يعمل الأنبوب بجهد يقارب $70\ kV$.

إن نوعي الأطياف (المستمر والخطي) لنفس الهدف يجب أن ينشئا عن أصلين مختلفين. إذ ينشأ الطيف المستمر (ويسمى أيضاً بالطيف المتصل) بسبب الإشعاع المنبعث من الإلكترونات المعجّلة في حقل كولوم لأنوية ذرات الهدف. بينما ينشأ الطيف الخطي الحاد من تغيرات الطاقة بسبب إعادة ترتيب الإلكترونات في المستويات الإلكترونية المختلفة في الذرة بعد نقل الطاقة إلى الذرة بواسطة الإلكترون القاصف. ويسمى الطيف الخطي أيضاً بالطيف المنفصل أو الطيف المتقطع Discrete spectrum.



الشكل 4-3: طيفا أشعة سينية للتنكستن والموليبيدينوم عند قصف الهدفين بإلكترونات خاضعة لجهد $35kV$.



الشكل 4-4: أطياف الأشعة السينية للتنكستن عند جهود معجِّلة مختلفة.

4-4-1: طيف الأشعة السينية المستمر

ينتج المنحنى المستمر في الشكلين 4-3 و 4-4 بسبب تباطؤ الإلكترونات ذات الطاقة العالية نتيجة فقدان الإلكترونات المعجّلة لطاقتها عند اصطدامها بجسيمات الهدف. حيث أنه وفق النظرية الكهرومغناطيسية فإن الشحنات الكهربائية المتعجلة أو المتباطئة تبعث إشعاعاً كهرومغناطيسياً. ومع هذا فليس هناك توافق تام بين استنتاجات النظرية الكهرومغناطيسية التقليدية والنتائج العملية من عدة جوانب. ويمكن أن تجري عدة تفاعلات للإلكترونات مع ذرات الهدف قبل أن يفقد الإلكترون كل طاقته الحركية. وفي هذه التصادمات يتحول جزء فقط من طاقة الإلكترون إلى إشعاع كهرومغناطيسي، وهذا الإشعاع الذي يولد الطيف المستمر يسمى bremsstrahlung، وهي كلمة ألمانية تعني أشعة الكبح أو أشعة التوقف braking radiation، حيث تتولد هذه الأشعة عندما تتباطأ حركة الإلكترونات القاصفة فجأة عند التصادم مع الهدف. وبسبب الاصطدامات العشوائية للإلكترونات فإن ما يفقده الإلكترون في الاصطدام الواحد من طاقة غير ثابت، كما إن عدد الاصطدامات متغير، ولهذا تصبح طاقة الإشعاعات المنبعثة متقاربة جداً وتظهر على شكل طيف مستمر.

وميزات منحنيات الطيف المستمر للأشعة السينية هي:

1- يوجد حد أدنى للطول الموجي للأشعة السينية λ_{min} لكل فرق جهد بين الكاثود والأنود ويتناسب عكسياً مع λ_{min}، حيث بزيادة قيمة V للمعدن الواحد تقل قيمة λ_{min} كما في الشكل 4-4، وعند نفس فرق الجهد تأخذ λ_{min} نفس القيمة لكل من الهدفين التنكستن والموليبدينوم كما في الشكل 4-3 لأنها لا

تعتمد على مادة الهدف وإنما تعتمد على فولتية الأنبوب V. وتكون الطاقة الحركية العظمى للإلكترون المعجّل عندما يصطدم بالذرة مساوية لـ Ve $\left(\text{أي } Voltage.e\right)$. وإذا انتقلت كل هذه الطاقة إلى فوتون واحد فالتردد f_{max} المقابل للطول الموجي λ_{min} سيعطى وفق فرضية بلانك-آينشتاين الكمية بالمعادلة:

$$E_{k_{max}} = hf_{max} = h\frac{c}{\lambda_{min}}$$

$$E_{k_{max}} = \frac{1.98 \times 10^{-25}\ J.m}{\lambda_{min}} = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{\lambda_{min}}\ eV.m = V.e \qquad \ldots\ldots 4.1$$

$$\lambda_{min} = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{V}\ V.m \quad or \quad \lambda_{min} = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{Voltage}\ Volt.m$$

وقد قادت هذه العلاقة إلى أولى الطرق الموثوقة لحساب ثابت بلانك من قبل دوين وهانت Duane and Hunt. ويمكن أن تُعد هذه الظاهرة معاكسة للظاهرة الكهروضوئية، لأن الطاقة الحركية للإلكترون القاصف تتحول إلى إشعاع، بينما في الظاهرة الكهروضوئية تتحول طاقة الإشعاع، ولو جزئياً، إلى طاقة حركية للإلكترون. وهكذا قدمت نظرية الكم تفسيراً لنهاية طول الموجة الصغرى للطيف المستمر للأشعة السينية والذي فشلت النظرية التقليدية في معالجته.

2- تزداد شدة الطيف المستمر عند زيادة فرق الجهد المسلط على الأنبوب. وتتناسب قدرة الأشعة السينية المنبعثة طردياً تقريباً مع مربع الجهد المسلط V والعدد الذري Z لمادة الهدف.

3- عند زيادة فرق الجهد المسلط في أنبوب الأشعة السينية فإن طول الموجة لأعظم شدة تقترب باتجاه أطوال الموجات القصيرة كما في الشكل 4-4.

كان شرحنا آنف الذكر عن الطيف المستمر للأشعة السينية الناتج عن هدف سميك. أما إذا كان الهدف رقيقاً جداً كصفيحة رقيقة من الذهب فسيصطدم عدد قليل فقط من الإلكترونات بذرات الهدف ويمر معظم الإلكترونات خلاله دون انحراف. وعليه فلا تتواجد الإلكترونات داخل الهدف الرقيق كما هي الحال في الهدف السميك.

مثال 4-1: جد التردد المقابل لأقصر طول موجي في إشعاع آلة أشعة سينية لها جهد معجِّل مقداره $50\ kV$.

الحل :

$$\lambda_{min} = \frac{1.24 \times 10^{-6} V.m}{V} = \frac{1.24 \times 10^{-6} V.m}{50000\ V} = 2.48 \times 10^{-11}\ m$$

$$f_{max} = \frac{c}{\lambda_{min}} = \frac{3 \times 10^{8}\ m/s}{2.48 \times 10^{-11}\ m} = 1.21 \times 10^{19}\ Hz$$

4-4-2: طيف الأشعة السينية الخطي الحاد

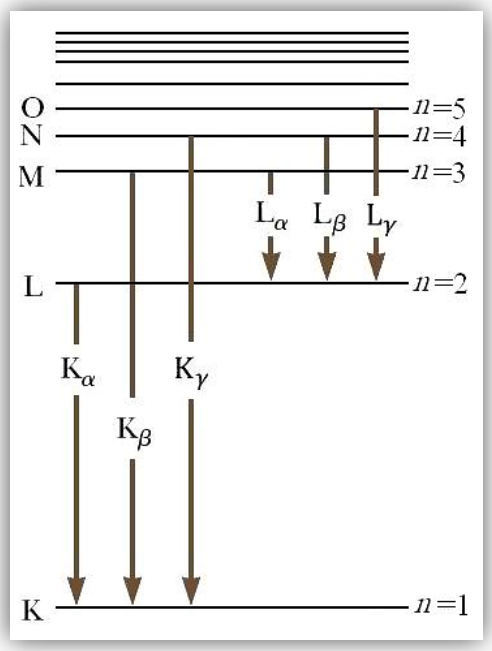
الخطوة الأولى لحدوث الطيف الخطي الحاد الموجود في الشكل 4-3 هي عندما يصطدم الإلكترون القاصف مع ذرة الهدف. ويجب أن يمتلك الإلكترون طاقة كافية لإزالة الإلكترون الموجود في الغلاف الداخلي من الذرة. ويتم ملء المكان الشاغر للإلكترون المطرود من القشرة الداخلية عندما ينزل إلكترون من مستوى أعلى إلى المستوى الذي يحتوي على المكان الشاغر فينبعث فوتون ذو طاقة معينة تساوي الفرق بين طاقتي المستويين ويظهر بشكل خط حاد في الطيف. والفترة الزمنية لهذه الانتقالات الذرية قصيرة جداً، حيث تقل عن $10^{-9}s$، وتكون طاقة هكذا انتقالات عادة أكبر من $1\ keV$، وتمتلك فوتونات الأشعة السينية المنبعثة طولاً موجياً ضمن المدى $(0.01\ nm \rightarrow 1\ nm)$. ويُعتبر وجود الخطوط الحادة في طيف الأشعة السينية دليلاً مباشراً آخر على تكميم الطاقة في الأنظمة الذرية.

ويمكن حدوث عدة احتمالات للانتقالات الإلكترونية داخل الذرة كما في الشكل 4-5:

1- لنفترض أن الإلكترون القاصف قد أزاح إلكترون الذرة من القشرة الداخلية الأعمق K (أي المدار الأول). فإذا تم ملء المكان الشاغر عن طريق الإلكترون الساقط من المدار الثاني L فإن الفوتون المنبعث لديه طاقة مماثلة لخط الأشعة السينية الحاد K_α في الشكل 4-3.

2- وإذا مُلئ المكان الشاغر في المدار الأول K بإلكترون ساقط من المدار الثالث M فسينتج الخط الحاد K_β في الشكل 4-3. وإذا تم ملئ الشاغر بإلكترون من المدار الرابع N فسينتج الخط K_γ.

3- تتشكل خطوط حادة أخرى للأشعة السينية عندما تمتلئ الفراغات في المدار L بالإلكترونات الهابطة من مدارات أعلى، حيث يتولد الخط L_α عندما يهبط إلكترون من المدار الثالث M إلى المدار الثاني L، وينتج الخط L_β عند الانتقال من المدار الرابع N إلى المدار L. وينشأ الخط L_γ عند الانتقال من المدار الخامس O إلى المدار L.



الشكل 4-5: الانتقالات بين مستويات الطاقة داخل الذرة.

وتجريبياً تكون شدة الخط K_α أكبر من شدة الخط K_β، وذلك لأن احتمالية ملئ الفراغ في المدار الأول من قبل إلكترون من المدار الثاني هي أكبر من احتمالية ملئه من قبل إلكترون من المدار الثالث.

5-4: طبيعة وحيود الأشعة السينية Nature and Diffraction of X-Rays

لم ينجح رونتگن في تحديد طبيعة الأشعة السينية، ولكنه استنتج أنها ليست جسيمات مشحونة ولا تشبه الضوء الاعتيادي في طبيعتها الموجية بسبب عدم تأثرها بالمجال المغناطيسي أو الكهربائي وعدم انكسارها أو حيودها. ولدينا من معادلة محزز الحيود:

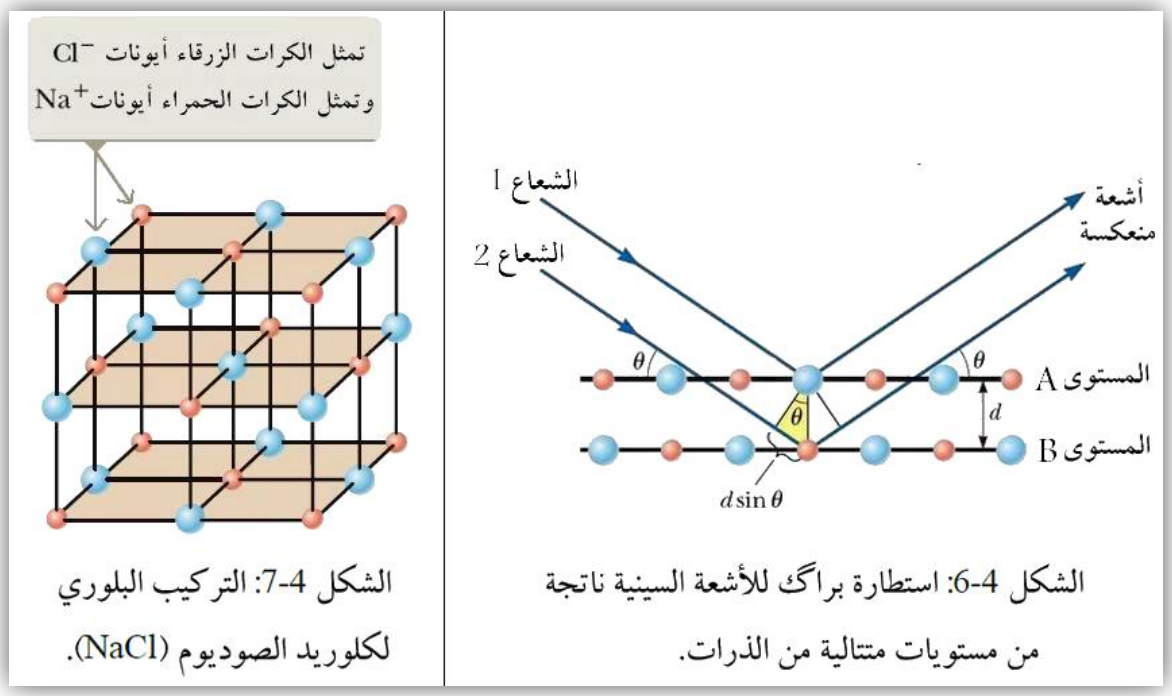
$$d \sin\theta = m\lambda \ , \qquad m = 0, 1, 2, 3, ... \qquad \ldots\ldots 4.2$$

حيث m: مرتبة الطيف، و λ: طول الموجة، و d: فاصلة المحزز، و θ: زاوية الحيود.

$$\sin\theta = m\frac{\lambda}{d}$$

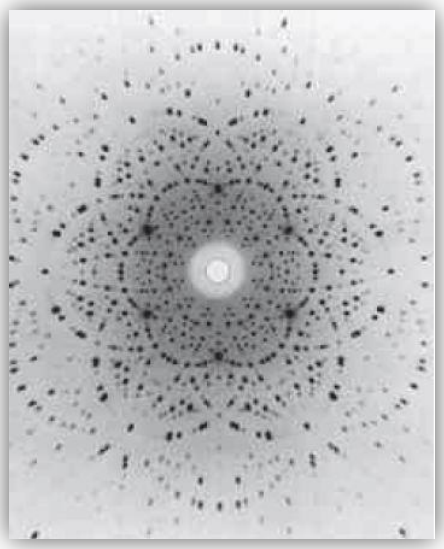
ويلاحظ من هذه المعادلة أنه عندما يكون الطول الموجي λ قصيراً جداً مقارنة بالفاصل d تكون زاوية الحيود θ صغيرة جداً إذا لم تكن m كبيرة. ولكن الشدة في المراتب العليا (m كبيرة) تكون ضعيفة جداً. لذا فإن افتراض λ صغيرة جداً يعني عدم امكانية الحصول على حيود محسوس للأشعة السينية. ولحل هذه المشكلة يجب تصغير d بحيث تكون قيمتها مقاربة للطول الموجي للأشعة السينية λ الساقطة، ولكن هذا التصغير صعب عملياً. وفي سنة 1912 اقترح لاوي استخدام البلورات ذات التركيب الذري أو الجزيئي المنتظم لتحل محل المحزز الاعتيادي لإحداث الحيود في مثل هكذا أطوال موجية قصيرة، فالتباعد بين هذه الذرات أو الجزيئات كان معروفاً أنه من مرتبة الأنكستروم ($10^{-10}\ m$). وتختلف البلورة عن محزز الحيود diffraction grating الاعتيادي بأن مراكز الحيود في البلورة ليست جميعاً في مستوى واحد، فالبلورة تؤثر كمحزز مجسم (بثلاثة أبعاد) كما في الشكل 4-7 وليس كمحزز مستوى (ببعدين). ونتيجة لهذا أجريت تجربة أطلقت فيها حزمة ضيقة من الأشعة السينية خلال بلورة ووضع لوح تصوير خلفها، وكانت النتيجة ظهور بقع في مواقع متناظرة على اللوح بسبب الحيود، وهذا يثبت الطبيعة الموجية للأشعة السينية كما في الشكل 4-8.

وقد اقترح براگ Bragg طريقة بسيطة لتحليل استطارة الأشعة السينية من مستويات بلورية متوازية بافتراض مستويين متعاقبين من الذرات كما في الشكل 4-6، حيث تسقط حزمة أشعة سينية أحادية الطول الموجي مقداره λ على بلورة بزاوية θ بالنسبة للمستوى العُلوي A الذي يبعد مسافة d عن المستوى الأوطأ المجاور له B. وستصطدم الحزمة الساقطة بذرة في المستوى الأول وذرة في المستوى الثاني، وبهذا فإن كلاً من الذرتين ستشتت جزءاً من الحزمة باتجاهات مختلفة. وستقطع الحزمة التي تنعكس من المستوى الأوطأ B مسافة أكبر من الحزمة التي تنعكس من المستوى الأعلى A. وفرق المسار الفعال هو $2d \sin\theta$. وتعزز الحزمتان بعضهما البعض (تداخل بناء) عندما يساوي فرق المسار هذا عدداً صحيحاً m مضروباً بـ λ. وينطبق الأمر نفسه على الانعكاس من جميع المستويات المتوازية داخل البلورة.



الشكل 4-7: التركيب البلوري لكلوريد الصوديوم (NaCl).

الشكل 4-6: استطارة براگ للأشعة السينية ناتجة من مستويات متتالية من الذرات.



الشكل 4-8: نمط لاوي لبلورة من البريل المعدني (البريليوم الألومنيوم السيليكات).
وتمثل كل نقطة سوداء نقطة تداخل بناء.

ولهذا فإن التداخل البناء سوف يحدث بشرطين:

1- إذا كانت زاوية السقوط مساوية لزاوية الانعكاس في مستوى واحد (كالمستوى A).

2- إذا كان فرق طول المسار للأشعة (1) و (2) في مستويين متعاقبين (A و B) عدداً صحيحاً من الأطوال الموجية $m\lambda$، أي:

$$2d \sin \theta = m\lambda \ , \qquad m = 1, 2, 3, \ldots \qquad \text{(Bragg's law)}, \ldots\ldots 4.3$$

حيث m: مرتبة الطيف لأقصى شدة. وهذه المعادلة تسمى معادلة براگ، وقد استخدمها لحساب مواقع الذرات في البلورة، فإذا كانت λ معلومة فيمكن حساب d. ومن معرفة قيم متعددة لـ d يمكن معرفة تركيب البلورة. وبالمقابل إذا أجريت الحسابات بعد معرفة d أمكن حساب شدة الأشعة السينية وطولها الموجي λ وفحص طيف انبعاث الأشعة السينية.

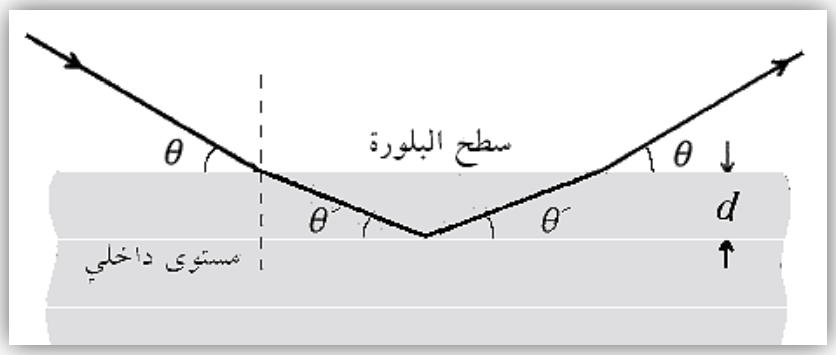
6-4: انكسار الأشعة السينية Refraction of X-Rays

لم تُكتشف ظاهرة انكسار الأشعة السينية حتى عام 1919 عندما لاحظ ستينستروم Stenstrom أن قانون براگ لم يُسفر عن نفس القيمة للطول الموجي λ في مراتب مختلفة من انعكاس حزمة أحادية الطول الموجي من البلورة. وتفسير هذا الفشل لقانون براگ هو أن الأشعة السينية تنكسر عندما تخترق البلورة. وبسبب الانكسار سيختلف الطول الموجي في البلورة عن ذلك الخارج. وإذا كانت n تمثل معامل الانكسار index of refraction، و λ الطول الموجي في الفراغ، و λ' الطول الموجي في البلورة، فإنه:

$$n = \frac{\lambda}{\lambda'} \qquad \ldots\ldots 4.4$$

وبالإضافة لهذا فإن زاوية السقوط على السطوح البلورية الداخلية ليست نفس الزاوية بين الحزمة الساقطة وسطح البلورة، وإنما تساوي الزاوية بين الشعاع المنعكس داخل البلورة والمستوى الذري الداخلي. والانحرافات عن قانون براگ تبين أن زاوية الانعكاس θ' تقل عن زاوية السقوط θ بحيث أن الأشعة السينية تبتعد عن العمود المقام على موضع دخول الحزمة لسطح البلورة كما في الشكل 4-9. وهذا يعني أن معامل الانكسار للأشعة السينية يقل عن الواحد. وسيأخذ قانون سنيل Snell للانكسار الشكل التالي:

$$n = \frac{\cos\theta}{\cos\theta'} \qquad \ldots\ldots 4.5$$



الشكل 4-9: انكسار الأشعة السينية داخل بلورة.

ولا تُعَد الزاوية θ' زاوية انكسار فقط، بل هي أيضاً الزاوية التي تقع بين الشعاع النافذ والمستويات الذرية الداخلية، بحيث يتخذ قانون براگ داخل البلورة الشكل التالي:

$$m\lambda' = 2d\sin\theta' \qquad \ldots\ldots 4.6$$

ومع ذلك، فإن الزاوية التي تقاس في الواقع هي الزاوية θ والطول الموجي المطلوب عادة هو طول الموجة λ في الفراغ. ويمكن الحصول على صيغة معدلة من قانون براگ تحتوي على λ و θ و n كما يلي بعد تذكر العلاقة المثلثية:

$$\sin^2\theta' + \cos^2\theta' = 1 \quad \Rightarrow \quad \sin\theta' = (1 - \cos^2\theta')^{1/2}$$

فبتعويض قيم $\cos\theta'$ و λ' من المعادلتين (4.4) و (4.5) نجد أن المعادلة (4.6) ستصبح بالشكل:

$$\frac{m\lambda}{n} = 2d\left(1 - \frac{\cos^2\theta}{n^2}\right)^{1/2}$$

$$m\lambda = 2d(n^2 - \cos^2\theta)^{1/2} = 2d(n^2 - 1 + \sin^2\theta)^{1/2}$$

وبإخراج $\sin\theta$ من الجذر:

$$m\lambda = 2d\sin\theta\left(\frac{n^2-1}{\sin^2\theta} + 1\right)^{1/2} \qquad \ldots\ldots 4.7$$

وتمثل هذه المعادلة الشكل المصحح لقانون براگ عند أخذ انكسار الأشعة السينية بنظر الاعتبار. ويكمن تبسيطها بفك الجذر التربيعي وفق نظرية ذي الحدين binomial theorem كما يلي:

$$\left(1 + \frac{n^2-1}{\sin^2\theta}\right)^{1/2} = 1 + \frac{1}{2}\frac{n^2-1}{\sin^2\theta} + \cdots = 1 + \frac{1}{2}\frac{(n-1)(n+1)}{\sin^2\theta}$$

ويلاحظ هنا أننا أهملنا الحدود التي تلي الحد الثاني لأن قيمة $(n^2 - 1)$ صغيرة جداً يمكن إهمالها. وقد أثبتت التجربة أن قيمة n قريبة من واحد، وكتقريب جيد فإن $(n + 1 \approx 2)$، لذا يمكن كتابة المعادلة السابقة بالشكل التالي:

$$\left(1 + \frac{n^2-1}{\sin^2\theta}\right)^{1/2} = 1 + \frac{n-1}{\sin^2\theta} = 1 - \frac{1-n}{\sin^2\theta}$$

وبالتعويض في المعادلة (4.7) ستكون الصيغة التجريبية لقانون براگ المعدل بالشكل التالي:

$$m\lambda = 2d\sin\theta\left(1 - \frac{1-n}{\sin^2\theta}\right) \qquad \ldots\ldots 4.8$$

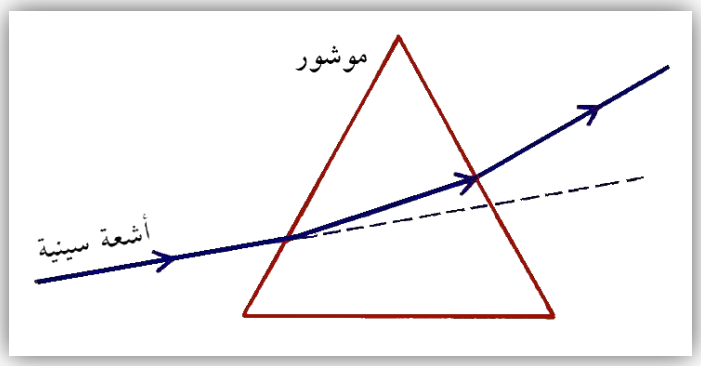
إن الطريقة الشائعة للتعبير عن النتائج هي التمثيل بالكمية $(\delta = 1 - n)$ التي توضح كيف يختلف معامل الانكسار عن واحد، وكمثال فإن معامل الانكسار للكالسايت calcite لطول الموجة $(\lambda = 0.708\ \text{Å})$ يختلف عن الواحد بالمقدار:

$$\delta = 1 - n = 1.85 \times 10^{-6}$$

ويمكن استخلاص استنتاجين مهمين من حقيقة أن معامل انكسار الأشعة السينية في الأوساط المادية هو أقل من واحد، أحدهما هو أنه عندما تنتقل الأشعة السينية من الفراغ إلى وسط مادي ستنكسر مبتعدة عن العمود (بعكس ما يحدث للضوء الاعتيادي)، فمثلاً عندما تمر الأشعة السينية من خلال موشور على شكل مثلث ستنحرف الحزمة الساقطة باتجاه يبتعد عن قاعدة الموشور كما في الشكل 4-10. والاستنتاج الآخر هو أنه في زاوية حرجة معينة θ_c سوف لا نكسر الأشعة السينية في الوسط المادي بل تنعكس كلياً وستكون عندها $(\theta' = 0)$ أو $(\cos\theta' = 1)$، وسيصبح معامل الانكسار في المعادلة 4.5:

$$n = \cos\theta_c \qquad \ldots\ldots 4.9$$

وإذا سقطت الأشعة السينية بزاوية أصغر من الزاوية الحرجة لن يحدث انكسار وإنما سيحدث انعكاس كلي لحزمة الأشعة السينية.



الشكل 4-10: مسار الأشعة السينية خلال موشور

4-7: تأثير كومبتن Compton Effect

تفترض النظرية الكمية للضوء أن الفوتونات تسلك سلوك الجسيمات ما عدا أنها بلا كتلة سكونية. وعلى هذا الأساس يمكن معالجة تصادم الفوتون مع الإلكترون بنفس الطريقة التي يُعالج بها تصادم كرات صغيرة. ويوضح الشكل 4-11 فوتون أشعة سينية يصدم إلكتروناً (ولنفرض أنه كان في البداية ساكناً وفق نظام احداثيات المختبر)، وسوف ينحرف الفوتون عن مساره الأصلي بزاوية ϕ بينما يستلم الإلكترون دفعة تجعله يتحرك منحرفاً عن اتجاه الفوتون الساقط بزاوية θ. ويمكن أن نعتقد أن الفوتون الساقط قد فقد طاقة في التصادم تساوي الطاقة الحركية E_k المكتسبة من قبل الإلكترون رغم أن الفوتون الساقط هو غير الفوتون المستطار. وإذا كان للفوتون الابتدائي التردد f فإن الفوتون المستطار له التردد الأقل f' حيث أن:

النقص في طاقة الفوتون = الزيادة في طاقة الإلكترون

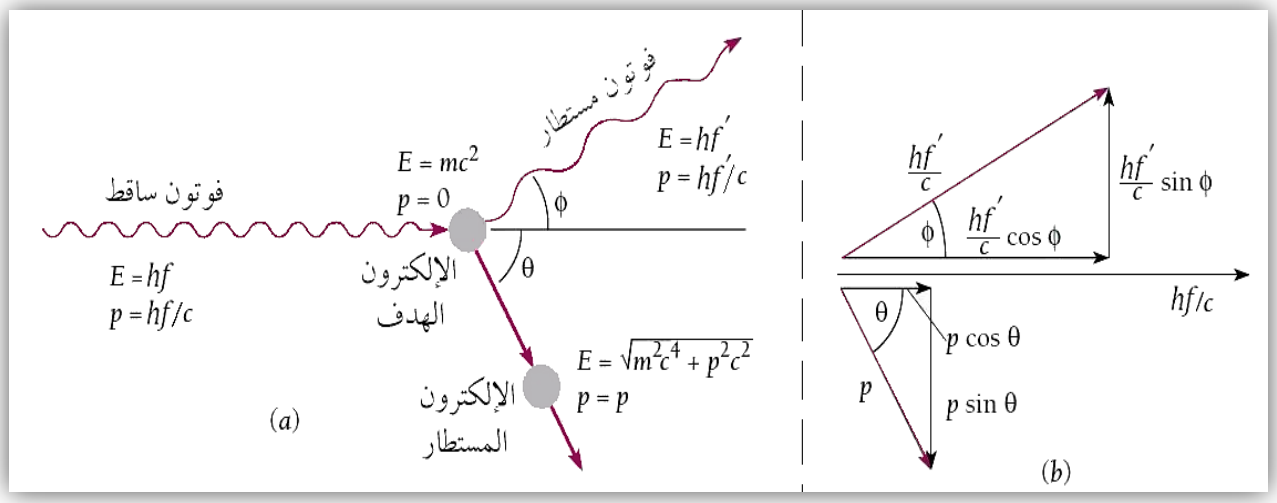
$$E_k = hf - hf' \qquad \ldots\ldots 4.10$$

ومن الفصل الأول لدينا أن العلاقة بين زخم الجسم عديم الكتلة كالفوتون وطاقته هي:

$$E = pc \qquad \ldots\ldots 1.40$$

وبما أن طاقة الفوتون $(E = hf)$، فإن زخمه سيكون:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} \qquad \ldots\ldots 4.11$$



الشكل 4-11: (a) استطارة كومبتن. (b) مخطط اتجاهي للزخم ومركباته للفوتون الساقط والفوتون المستطار وللإلكترون المستطار.

يعتبر الزخم كمية اتجاهية تتضمن اتجاهاً ومقداراً وليس كالطاقة. ويجب أن يكون الزخم خلال التصادم محفوظاً في كل اتجاهين متقابلين (أي على محور x وعلى محور y)[1]. وسيكون زخم الفوتون الابتدائي (hf/c) وزخم الفوتون المستطار (hf'/c). ويكون زخم الإلكترون الابتدائي صفراً وزخمه النهائي p. وبتطبيق قانون حفظ الزخم الخطي باتجاه الفوتون الأصلي:

الزخم النهائي = الزخم الابتدائي

$$\frac{hf}{c} + 0 = \frac{hf'}{c}\cos\phi + p\cos\theta \qquad \ldots\ldots 4.12$$

وعمودياً على هذا الاتجاه:

الزخم النهائي = الزخم الابتدائي

$$0 = \frac{hf'}{c}\sin\phi - p\sin\theta \qquad \ldots\ldots 4.13$$

ويمكن إيجاد صيغة تربط بين الفرق في طول موجة الفوتون الابتدائي والمستطار وبين الزاوية ϕ. والخطوة الأولى هي ضرب كل من المعادلتين (4.12) و (4.13) بـ c وإعادة ترتيبهما لينتج:

$$pc\cos\theta = hf - hf'\cos\phi \qquad \ldots\ldots 4.14$$

[1] لو كانت الأجسام المتصادمة ثلاثة فيجب أن يكون الزخم محفوظاً في كل من الاتجاهات الثلاثة (المحاور x,y,z).

$$pc\sin\theta = hf'\sin\phi \qquad \dots\dots 4.15$$

وبتربيع كل من هاتين المعادلتين ثم جمعهما ستُختصر الزاوية θ لأن $(\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1)$، وسينتج:

$$p^2c^2 = (hf)^2 - 2(hf)(hf')\cos\phi + (hf')^2 \qquad \dots\dots 4.16$$

وعندنا من الفصل الأول علاقتان لطاقة الجسيم الكلية:

$$E = E_o + E_k = m_oc^2 + E_k \qquad \dots\dots 1.36$$
$$E^2 = p^2c^2 + m_o^2c^4 \qquad \dots\dots 1.39$$

وبتربيع المعادلة 1.36 ثم مساواتها مع المعادلة 1.39 ينتج:

$$(m_oc^2 + E_k)^2 = p^2c^2 + m_o^2c^4$$
$$p^2c^2 = m_o^2c^4 + 2m_oc^2E_k + {E_k}^2 - m_o^2c^4 = 2m_oc^2E_k + {E_k}^2$$

$$from\ \text{eq. } 4.10:\ E_k = hf - hf'$$
$$\therefore p^2c^2 = 2m_oc^2(hf - hf') + (hf)^2 - 2(hf)(hf') + (hf')^2 \qquad \dots\dots 4.17$$

وبتعويض قيمة p^2c^2 هذه في المعادلة (4.16) سنحصل على:

$$2m_oc^2(hf - hf') = 2(hf)(hf')(1 - \cos\phi) \qquad \dots\dots 4.18$$

ويمكن تبسيط هذه المعادلة باستخدام طول الموجة بدل التردد بتقسيمها على $(2h^2c^2)$:

$$\frac{m_o}{h}(f - f') = \frac{f}{c}\frac{f'}{c}(1 - \cos\phi) \quad or \quad \frac{m_oc}{h}\left(\frac{f}{c} - \frac{f'}{c}\right) = \frac{f}{c}\frac{f'}{c}(1 - \cos\phi)$$
$$\because f/c = 1/\lambda \quad and \quad f'/c = 1/\lambda'$$
$$\therefore \frac{m_oc}{h}\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'}\right) = \frac{(1 - \cos\phi)}{\lambda\lambda'}$$
$$\frac{m_oc}{h}\left(\frac{\lambda' - \lambda}{\lambda\lambda'}\right) = \frac{(1 - \cos\phi)}{\lambda\lambda'} \quad \Rightarrow \quad \frac{m_oc}{h}(\lambda' - \lambda) = (1 - \cos\phi)$$
$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_oc}(1 - \cos\phi) \qquad \dots\dots 4.19$$

وتمثل هذه المعادلة ظاهرة كومبتن الذي اشتق هذه المعادلة في أوائل عشرينيات القرن العشرين وحققها عملياً بالإستناد إلى أسس كمية، وهذا مما يدل على صحة النظرية الكمية للإشعاع. وتعطي هذه المعادلة التغير في الطول الموجي لفوتون مستطار بزاوية ϕ بواسطة جسيم كتلته السكونية m_o. ولا يعتمد هذا التغير على طول موجة الفوتون الساقط، ويُدعى المقدار λ_C بطول موجة كومبتن للجسيم المستطار:

$$\lambda_C = h/m_oc \qquad \dots\dots 4.20$$

والذي يساوي للإلكترون: $(\lambda_C = 2.427 \times 10^{-12}m)$ أي $(2.427\ pm)$[1]، وستصبح المعادلة 4.19 بدلالة λ_C كما يلي:

[1] $1\ pm = 1\ \text{picometer} = 10^{-12}m$

$$\lambda' - \lambda = \lambda_C(1 - \cos\phi) \qquad \dots\dots 4.21$$

ومن هذه المعادلة نلاحظ أن أكبر تغيير في الطول الموجي يحدث عند زاوية استطارة $(\phi = 180°)$، وسيكون هذا التغيير ضعف طول موجة كومبتن λ_C لأن $(\cos 180 = -1) \leftarrow (\lambda' - \lambda = 2\lambda_C)$. ولما كان طول موجة كومبتن للإلكترون هو $2.427\ pm$ فسنجد أن أكبر تغيير في λ_C هو $4.854\ pm$، حيث أن باقي الجسيمات لها λ_C أصغر مما للإلكترون بسبب كبر كتلتها السكونية نسبياً.

وتُعطى العلاقة بين زاويتي الاستطارة للإلكترون المرتد θ والفوتون ϕ بالعلاقة:

$$\cot\frac{\phi}{2} = (1+\propto)\tan\theta \qquad \dots\dots 4.22 \quad , \quad \text{where} \quad \propto = \frac{hf}{m_o c^2}$$

مثال 4-2: استطارت أشعة سينية طولها الموجي $10\ pm$ من هدف. (أ) جد طول موجة الأشعة السينية المستطارة بزاوية $45°$. (ب) جد أكبر طول موجي ممكن في الأشعة السينية المستطارة. (ج) جد أكبر طاقة حركية للإلكترونات المرتدة. مع العلم أن طول موجة كومبتن للإلكترون هو $2.427\ pm$.

الحل: (أ) من المعادلة $\lambda' - \lambda = \lambda_C(1 - \cos\phi)$: 4.21

$$\therefore \lambda' = \lambda + \lambda_C(1 - \cos 45)$$
$$= 10\ pm + 0.293\ \lambda_C = 10\ pm + 0.293 \times 2.427\ pm = 10.71\ pm$$

(ب) تكون أكبر قيمة لـ $(\lambda' - \lambda)$ عندما $(1 - \cos\phi = 2)$، وفي هذه الحالة:

$$\lambda' = \lambda + 2\lambda_C = 10\ pm + 4.854\ pm = 14.854\ pm$$

(ج) إن أكبر طاقة حركية ارتدادية تساوي الفرق بين طاقتي الفوتونات الساقطة والمستطارة، بحيث:

$$E_k = h(f - f') = hc\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'}\right)$$
$$= (6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^8\ m/s)\left(\frac{1}{10 \times 10^{-12} m} - \frac{1}{14.854 \times 10^{-12} m}\right)$$
$$= 6.49 \times 10^{-15}\ J$$

مثال 4-3: أسقطت أشعة سينية طولها الموجي $(\lambda = 0.2\ nm)$ على كتلة كربونية، وقد شوهدت الأشعة السينية المستطارة عند الزاوية $30°$ بالنسبة للحزمة الساقطة. احسب طول موجة الأشعة السينية المستطارة في هذه الزاوية.

الحل: يُعطى التغير في الطول الموجي للأشعة السينية المستطارة بالمعادلة 4.19

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_o c}(1 - \cos\phi) = \frac{6.626 \times 10^{-34}\ J.s}{(9.1 \times 10^{-31}\ kg)(3 \times 10^8\ m/s)}(1 - \cos 30)$$
$$= 3.25 \times 10^{-13}\ m = 0.325\ pm$$

ولهذا سيكون الطول الموجي للأشعة السينية المستطارة في هذه الزاوية:

$$\lambda' = \Delta\lambda + \lambda = 0.325\ pm + 200\ pm = 200.325\ pm$$

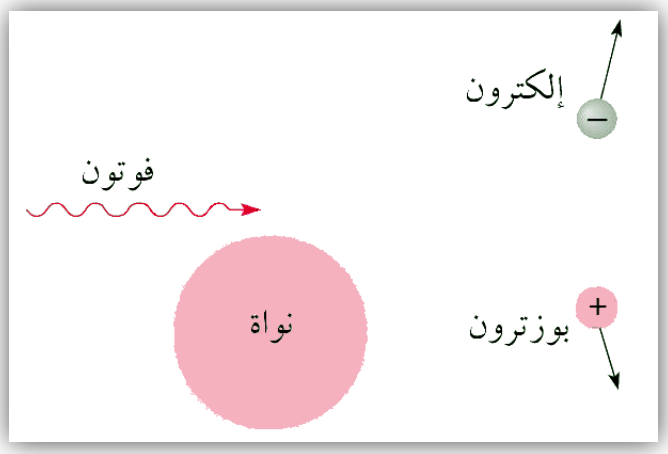
8-4: إنتاج الزوج The Pair Production

كما لاحظنا سابقاً، يمكن خلال التصادم أن يُعطي الفوتون الساقط كل طاقته لإلكترون (الظاهرة الكهروضوئية) أو بعض طاقته (تأثير كومبتن). ومن الممكن أيضاً أن يتحول الفوتون إلى مادة بشكل إلكترون وبوزترون[1]. وفي هذه العملية التي تُدعى إنتاج الزوج تتحول الطاقة الكهرومغناطيسية إلى مادة. ويمكن حساب الكتلة السكونية للإلكترون أو البوزترون بدلالة الطاقة، وهي تكافئ طاقة سكونية مقدارها $0.51\ MeV$، وذلك باستخدام المعادلة النسبية الخاصة $(E_o = m_o c^2)$، ولهذا فإن إنتاج زوج إلكترون-بوزترون يتطلب فوتوناً لا تقل طاقته عن $1.02\ MeV$. ولا يمكن أن يتحول الفوتون إلى إلكترون أو إلكترونين أو بوزترون أو بوزترونين لأن هذا يخالف مبدأ حفظ الشحنة الكهربائية. كما لا يتحول الفوتون إلى زوج إلكترون- بوزترون في أي مكان، وإنما يجب أن تحدث العملية في مجال كهربائي قوي مثل مجال نواة الذرة (لاحظ الشكل 4-12). وحينها ستأخذ النواة بعض الزخم. وعليه فلن يحدث خرق لمبادئ الحفظ عندما يتولد زوج إلكترون- بوزترون قرب نواة الذرة، حيث:

- يتحقق مبدأ حفظ الشحنة لأن مجموع شحنتي الإلكترون $(q = -e)$ والبوزترون $(q = +e)$ يساوي صفراً مثل شحنة الفوتون،
- ويتحقق مبدأ حفظ الطاقة لأن الطاقة الكلية وبضمنها الطاقة السكونية للإلكترون والبوزترون المتولِّدَين تساوي طاقة الفوتون،
- ويكون الزخم الخطي محفوظاً بمساعدة النواة التي تأخذ ما يكفي من زخم الفوتون كي تحدث العملية.

وبسبب كتلة النواة الهائلة نسبياً فإنها تمتص نسبة ضئيلة جداً فقط من طاقة الفوتون. ولا يتحقق حفظ الطاقة والزخم الخطي إذا حدث الإنتاج الزوجي في الفضاء الفارغ، ولهذا لا يمكن أن تحدث هذه العملية في هكذا فضاء. كما إن أي زيادة في طاقة الفوتون ستصبح طاقة حركية للإلكترون والبوزترون. وسيكون أكبر طول موجي للفوتون $1.2\ pm$. والموجات الكهرومغناطيسية التي يكون لها هكذا طول موجي تُسمى أشعة گاما gamma rays ويُرمز لها بـ γ، وتتواجد في الطبيعة كإحدى الانبعاثات من النوى النشطة إشعاعياً وفي الأشعة الكونية cosmic rays.

[1] البوزترون هو ضديد الإلكترون وله نفس كتلة الإلكترون ونفس شحنته ولكنها موجبة.



الشكل 4-12: إنتاج زوج إلكترون- بوزترون.

ويحدث معكوس إنتاج الزوج الذي يُسمى فناء الزوج pair annihilation عندما يكون البوزترون بالقرب من الإلكترون ويكون الاثنان معاً تحت تأثير شحنتيهما الكهربائيتين المتعاكستين. وتتلاشى مادة كل من الجُسيمين في وقت واحد وتصبح الكتلة المفقودة طاقة على شكل زوج من فوتونات أشعة گاما:

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$$

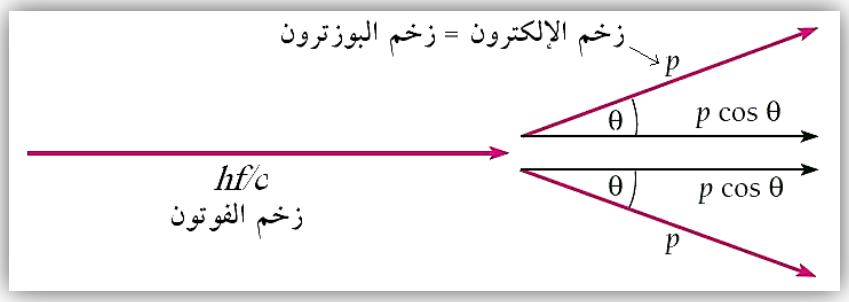
ويتجه الفوتونان الوليدان باتجاهين يتحقق معهما مبدئا حفظ الطاقة وحفظ الزخم الخطي، ولا حاجة لتواجد نواة أو جسيم آخر كي يحدث فناء الزوج هذا.

مثال 4-4: بيِّن أن انتاج الزوج لا يمكن أن يحدث في فضاء فارغ.

الحل: من مبدأ حفظ الطاقة:

$$hf = 2Km_oc^2$$

حيث hf هي طاقة الفوتون، و Km_oc^2 هي الطاقة الكلية للإلكترون أو البوزترون. ويوضح الشكل 4-13 المخطط الاتجاهي للزخم الخطي للفوتون والإلكترون والبوزترون. والزاويتان θ متساويتان كي يكون الزخم محفوظاً في الاتجاه العرضي.



الشكل 4-13: مخطط اتجاهي للزخم عند تحول الفوتون إلى إلكترون وبوزترون.

ولكي يكون الزخم محفوظاً في اتجاه حركة الفوتون يجب أن يكون:

$$hf/c = 2p\cos\theta \quad \rightarrow \quad hf = 2pc\cos\theta$$

$$hf = 2Km_o uc\cos\theta$$

حيث أن $(p = Km_o u)$ لكل من الإلكترون والبوزترون. وبضرب الطرف الأيمن بـ (c/c) ينتج:

$$hf = 2Km_o c^2\left(\frac{u}{c}\right)\cos\theta$$

ولأن $\left(\frac{u}{c} < 1\right)$ و $(\cos\theta \leq 1)$ فإنه: $hf < 2Km_o c^2$

ولكن حفظ الطاقة يتطلب $(hf = 2Km_o c^2)$. ولهذا فمن غير الممكن أن يحافظ انتاج الزوج على كلا مبدأي حفظ الطاقة والزخم ما لم يكن هنالك جسيم آخر في العملية ليحمل جزءاً من زخم الفوتون الابتدائي.

مثال 4-5: إذا تحول فوتون إلى زوج إلكترون- بوزترون سيكون أكبر طول موجي للفوتون $1.2\ pm$. أثبت هذا.

الحل: إن إنتاج زوج إلكترون- بوزترون يتطلب فوتوناً لا تقل طاقته عن $1.02\ MeV$. أي:

$$E_{k_{min}} = hf_{min}$$

$$f_{min} = \frac{E_{k_{min}}}{h} = \frac{1.02\ MeV}{(6.626\times10^{-34}\ J.s)} = \frac{(1.02\ \times10^{6}\ eV)(1.6\times10^{-19}\ J/1\ eV)}{(6.626\times10^{-34}\ J.s)}$$

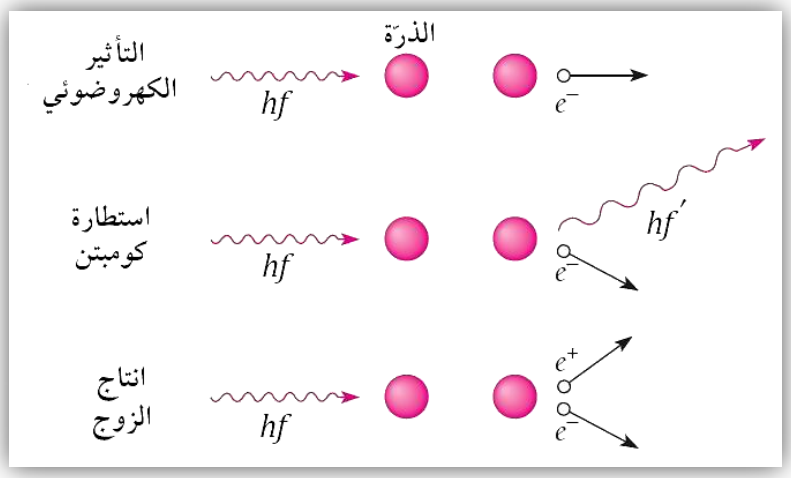
$$= 2.46\times10^{20}\ Hz$$

$$\lambda_{max} = \frac{c}{f_{min}} = \frac{3\times10^{8}\ m/s}{2.46\times10^{20}\ s^{-1}} = 1.2\times10^{-12}\ m = 1.2\ pm$$

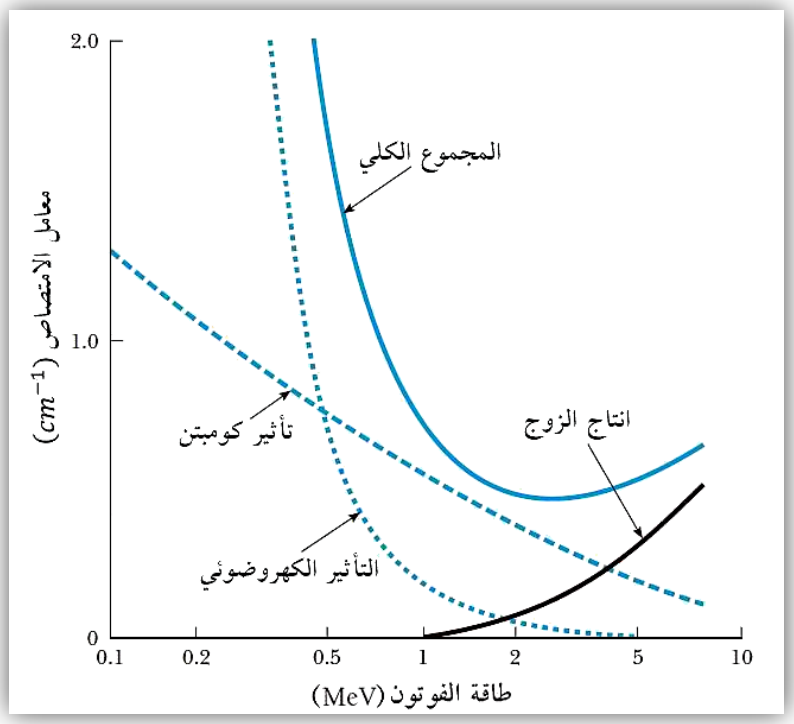
4-9: امتصاص الفوتون Photon Absorption

بسبب أن الفوتونات غير مشحونة فهي ليست فعالة كالجسيمات المشحونة في إنتاج التأين أو التهيج في المادة. ومع هذا توجد ثلاث طرق رئيسة تتفاعل فيها فوتونات الضوء والأشعة السينية وأشعة گاما مع المادة كما في الشكل 4-14. وفي جميع الحالات يتم نقل طاقة الفوتونات إلى الإلكترونات التي بدورها تفقد طاقتها منتقلة إلى الذرات الموجودة في المواد الممتصة. وتمتص المواد ذات العدد الذري الكبير الأشعة السينية أكثر من المواد ذات العدد الذري الواطئ. وبملاحظة الشكل 4-15 يتبين ما يلي:

- إذا كانت طاقة الفوتون منخفضة (أقل من $0.5\ MeV$) فإن الآلية السائدة لفقدان الطاقة هي الظاهرة الكهروضوئية، وفيها يُمتص الفوتون وتنتقل كل طاقته إلى الإلكترون.
- إذا كانت طاقة الفوتون متوسطة فإن العملية السائدة هي ظاهرة كومبتن، حيث يقوم الفوتون بتحويل بعض طاقته إلى الإلكترون.
- عند الطاقات العالية يكون الدور الأكبر لظاهرة انتاج الزوج.



الشكل 4-14: تفاعل الفوتونات مع المادة



الشكل 4-15: معامل الامتصاص الخطي للفوتونات في الرصاص كدالة لطاقة الفوتون.

إن الشدة I لحزمة الأشعة السينية أو أشعة گاما تساوي معدل نقل الطاقة لوحدة مساحة المقطع العرضي للحزمة. وقد وُجد أن السمك x للمادة الماصة يقلل شدة الحزمة الساقطة عليها بمقدار $(-dI)$، ولهذا فإن الطاقة الجزئية $(-dI/I)$ التي تفقدها الحزمة عند مرورها خلال سُمك dx من مادة ماصة معينة تتناسب مع dx:

$$-dI/I = \mu\, dx \qquad \ldots\ldots 4.23$$

حيث يدعى ثابت التناسب μ بمعامل الامتصاص الخطي linear absorption coefficient، وتعتمد قيمته على طاقة الفوتونات وعلى طبيعة المادة الماصة للإشعاع. فإذا كانت شدة الحزمة الساقطة I_0 على طبقة من المادة سمكها x فيمكن إيجاد شدة الحزمة النافذة بتكامل المعادلة 4.22:

$$\int_{I_0}^{I} \frac{dI}{I} = -\int_{0}^{x} \mu\, dx \quad \Rightarrow \quad \ln\frac{I}{I_0} = -\mu x \qquad \ldots\ldots 4.24$$

$$\therefore I = I_0\, e^{-\mu x} \qquad \ldots\ldots 4.25$$

ويتبين من هذه المعادلة أن شدة الإشعاع تقل أسّياً بزيادة سمك المادة الماصة x. ويوضح الشكل 4-15 المعامِل μ لظواهر الكهروضوئية وكومبتن وانتاج الزوج. ومن المعادلة 4.24 يمكن حساب السُمك الذي يتم عنده امتصاص الإشعاع، وكما يلي:

$$\ln\frac{I_0}{I} = \mu x \quad \Rightarrow \quad x = \frac{\ln(I_0/I)}{\mu} \qquad \ldots\ldots 4.26$$

ومن المفيد أن نعبر عن خواص المادة الماصة بدلالة سمك قيمة النصف half-value thickness للمادة الماصة، وهو السُمك الذي يقلل شدة حزمة الإشعاع النافذة للمادة إلى نصف الشدة الساقطة $(I/I_0 = 0.5)$ أو $(I_0/I = 2)$ أو $(I(x) = I_0/2)$، ويسمى سمك النصف ويرمز له بالرمز $x_{1/2}$. ولهذا نستنتج من المعادلة 4.26 ما يلي:

$$x_{1/2} = \frac{\ln(I_0/I)}{\mu} = \frac{\ln(2)}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \qquad \ldots\ldots 4.27$$

مثال 4-6: احسب سمك النصف للرصاص بعد سقوط حزمة أشعة سينية ذات طول موجي $20\ pm$ إذا كان معامل امتصاص الأشعة السينية في الرصاص لهذا الطول الموجي $55\ cm^{-1}$.

الحل :

$$x_{1/2} = \frac{0.693}{\mu} = \frac{0.693}{55\ cm^{-1}} = 0.0126\ cm = 1.26 \times 10^{-4} m = 0.126\ mm$$

وهذا يعني أن الرصاص ماص جيد جداً للأشعة السينية.

مثال 4-7: معامل الامتصاص الخطي في الماء لأشعة گاما ذات طاقة $2\ MeV$ هو $4.9\ m^{-1}$. (أ) جد الشدة النسبية لحزمة من هذا الإشعاع بعد قطعها مسافة $10\ cm$ في الماء. (ب) ما هي المسافة التي يجب أن تقطعها هذه الحزمة في الماء قبل أن تقل شدتها إلى 1% من قيمتها الأصلية؟

الحل : (أ)

$$\mu x = (4.9\ m^{-1})(0.1\ m) = 0.49$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} = e^{-0.49} = 0.61$$

أي ستقل شدة الحزمة إلى 61% من قيمتها الأصلية بعد مرورها خلال $10\ cm$ من الماء.

(ب) بما أن الشدة ستقل إلى 1% من قيمتها الأصلية فإن $(I/I_0 = 0.01)$ أو $(I_0/I = 100)$. ولهذا:

$$x = \frac{\ln(I_0/I)}{\mu} = \frac{\ln 100}{4.9\ m^{-1}} = 0.94\ m$$

أسئلـة

1- من صفات الأشعة السينية أنها تستطيع تفريغ شحنة الأجسام المشحونة كهربائياً، وسواء كانت الشحنة موجبة أو سالبة. كما إنها تستطيع أن تؤين الغازات عند مرورها خلالها. علِّل هذا.

2- لماذا كلما زادت سرعة الإلكترونات المسببة لانبعاث الأشعة السينية زادت نفوذية الأشعة السينية المتولدة؟

3- لماذا حين يزداد عدد الإلكترونات المسببة لانبعاث الأشعة السينية تزداد شدة حزمة الأشعة السينية؟

4- لماذا لم يتمكن رونتگن من معرفة انعكاس وانكسار الأشعة السينية؟

5- عندما تتلقى أشعة الصدر في المستشفى، تمر الأشعة السينية عبر مجموعة من الأضلاع المتوازية في صدرك. هل تعمل أضلاعك كمحزز حيود للأشعة السينية؟ ولماذا؟

6- بيِّن مع الرسم كيفية انتاج الأشعة السينية.

7- لماذا يُصنع الهدف المستخدم في أنبوب انتاج الأشعة السينية من مادة ذات درجة انصهار عالية وعدد ذري كبير؟

8- لماذا يكون أنبوب انتاج الأشعة السينية مفرغاً من الهواء؟

9- وفق أي ظاهرة تعمل حجرة التأين؟

10- لماذا يتناسب تيار التأين طردياً مع شدة الأشعة السينية الساقطة في حجرة التأين؟

11- كيف ينتج الطيف المستمر للأشعة السينية؟

12- ما الذي يَجعل الطيف الناشئ بسبب الإلكترونات المعجّلة مستمراً وليس خطياً؟

13- ما هي أشعة التوقف bremsstrahlung ؟

14- لماذا تُعد ظاهرة انتاج الأشعة السينية معاكسة للظاهرة الكهروضوئية؟

15- كيف ينشأ طيف الأشعة السينية الخطي الحاد؟

16- لماذا تكون شدة الخط K_α من طيف الأشعة السينية أكبر من شدة الخط K_β ؟

17- ما هما شرطا التداخل البنّاء للأشعة السينية الساقطة على بلورة؟ وضِّح مع الرسم.

18- ما هو العدد الكمي الأساسي للحالة الابتدائية لذرة تبعث الخط M_β في طيف الأشعة السينية؟ أي: مِن أي قشرة سيهبط الإلكترون إلى المدار M في هذه الحالة؟ وما هو العدد الكمي الأساسي للحالة النهائية لهذا الانتقال؟

19- ما هو الفشل في قانون براگ؟

20- استطار فوتون أشعة سينية بعد سقوطه على إلكترون ثابت. فهل سيكون تردد الفوتون المستطار: (أ) أدنى من تردد الفوتون الساقط (ب) أو أعلى منه، (ج) أو دون تغيير؟

21- ما هي عملية إنتاج الزوج؟

22- ما هي عملية فناء الزوج؟

23- هل يمكن أن تحدث عمليتا إنتاج الزوج وفناء الزوج في فضاء فارغ؟

24- هل يمكن أن يتحول الفوتون إلى إلكترونين؟ ولماذا؟

25- لماذا تمتص المواد ذات العدد الذري الكبير الأشعة السينية أكثر من المواد ذات العدد الذري الواطئ؟

26- اعتماداً على قيمة طاقة الفوتون الساقط، بيِّن متى تسُود كل من الظاهرة الكهروضوئية و ظاهرة كومبتن وظاهرة انتاج الزوج.

مسائل محلولة

(1) احسب أقصى سرعة للإلكترون المعجل داخل أنبوب الأشعة السينية قبل اصطدامه بالهدف إذا علمت أن الجهد المسلط داخل الأنبوب $100\ kV$ والطاقة السكونية للإلكترون $0.511\ MeV$.

الحل :

$$E_{k_{max}} = Ve = (10^5 V)(1.6 \times 10^{-19}\ C) = 1.6 \times 10^{-14} J$$

$$= (1.6 \times 10^{-14} J)\left(\frac{1\ eV}{1.6 \times 10^{-19}\ J}\right) = 1 \times 10^5 eV = 0.1\ MeV$$

الطاقة الكلية = الطاقة السكونية + الطاقة الحركية

$$E = E_o + E_{k_{max}}$$

$$= m_o c^2 + E_{k_{max}} = 0.511\ MeV + 0.1\ MeV = 0.611\ MeV$$

$$E = mc^2 = \frac{m_o c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \quad \rightarrow \quad 0.611\ MeV = \frac{0.511\ MeV}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}$$

$$1 - u^2/c^2 = \left(\frac{0.511\ MeV}{0.611\ MeV}\right)^2 = 0.699 \quad \rightarrow \quad u^2/c^2 = 1 - 0.699 \approx 0.3$$

$$u^2 = 0.3\ c^2 \quad \rightarrow \quad u_{max} = 0.548\ c$$

(2) جد أقل جهد معجل يلزم لانتاج أشعة سينية بطول موجي $70\ pm$.

الحل: يتم إنتاج فوتون ذي طاقة قصوى وتردد أقصى (طول موجي أدنى) عندما يتخلى الإلكترون عن كل طاقته الحركية في تصادم منفرد مع فوتون داخل الهدف وتنتقل الطاقة إلى الفوتون. ولذلك:

$$E_{k_{max}} = \frac{hc}{\lambda_{min}} = V.e$$

والجهد المعجل المطلوب لأدنى طول موجي $(\lambda = 70\ pm = 70 \times 10^{-12} m)$ سيكون:

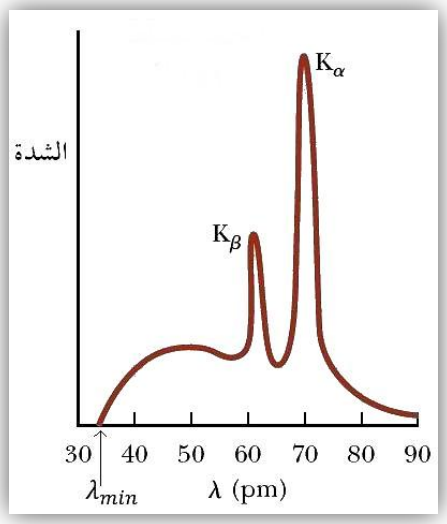
$$V = \frac{hc}{e\lambda_{min}} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ J.s)(3 \times 10^{8}\ m/s)}{(1.6 \times 10^{-19}\ C)(70 \times 10^{-12} m)} = 17748\ V = 17.748\ kV$$

(3) عند إنتاج الأشعة السينية، تتعجل الإلكترونات نتيجة فولتية عالية ثم تتباطأ بعد ضرب الهدف،

(أ) ما هو فرق الجهد الأدنى V الذي يعجل الإلكترونات كي يمكن إنتاج أشعة سينية ذات طول موجي λ؟

(ب) ما هي العلاقة بين فرق الجهد المطلوب والطول الموجي؟

(ج) هل تتوقع نتائجُك الطولَ الموجي الأدنى الصحيح λ_{min} في الشكل المجاور الناتج بعد قصف إلكترونات ذات جهد $37\ kV$ لهدف من الموليبدينوم؟ وكيف هذا؟



(د) هل تنطبق العلاقة المستنتجة في الفرع "أ" على أنواع الإشعاع الكهرومغناطيسي الأخرى إلى جانب الأشعة السينية؟

(هـ) ممَّ يقترب فرق الجهد عندما تتجه قيمة λ نحو الصفر؟

(و) ممَّ يقترب فرق الجهد عندما تزداد قيمة λ بلا حدود؟

الحل: (أ) تتجه كل الطاقة الحركية للإلكترون بعد تعجيله بجهد V إلى إنتاج فوتون واحد.

$$E_{k_{max}} = \frac{hc}{\lambda_{min}} = V.e \quad \rightarrow \quad V = \frac{hc}{e\lambda_{min}} = \frac{1.24 \times 10^{-6}\ eV.m}{e\lambda_{min}} = \frac{1.24 \times 10^{-6}\ V.m}{\lambda_{min}}$$

(ب) يتناسب فرق الجهد عكسياً مع طول الموجة.

(ج) نعم. وبحيث يكون $(\lambda_{min} = 33.5\ pm)$ كما في الشكل عندما يكون الجهد المعجل $37\ keV$.

(د) نعم، ولكن قد يكون من المستبعد أن يقف إلكترون متعجل ذو طاقة عالية جداً في تفاعل منفرد ليُنتج إشعاع كاما عالي الطاقة، وقد يكون من الصعب رصد الموجات الراديوية المنخفضة الشدة جداً المتولدة كأشعة كبح bremsstrahlung بواسطة إلكترونات منخفضة الطاقة.

(هـ) فرق الجهد يتجه إلى ما لا نهاية عندما يقترب الطول الموجي من الصفر.

(و) فرق الجهد يتجه نحو الصفر عندما يتجه الطول الموجي نحو الما لا نهاية.

(4) (أ) جد طول الموجة التي يحدث لها انعكاس براگ في المرتبة الأولى بزاوية $20°$ مع مستويات بلورة الكالسايت التي تبلغ الفاصلة بين ذراتها 3.0357 Å. (ب) ما قيمة الزاوية التي يحدث عندها انعكاس المرتبة الثانية؟ (ج) ما هي الزاوية التي يحدث عندها انعكاس الخط K_α للموليبدينوم للمرتبة الأولى والذي يحدث عند الطول الموجي 0.707 Å ؟

الحل : (أ) بتطبيق قانون براگ لـ $(m = 1)$ $2d \sin\theta = m\lambda$

$$2 \times 3.0357\ \text{A°} \times \sin 20 = 1 \times \lambda \quad \rightarrow \quad \lambda = 2.076\ \text{Å}$$

(ب) $m = 2$ $2d \sin\theta = m\lambda$

$$2 \times 3.0357\ \text{Å} \times \sin\theta = 2 \times 2.076\ \text{Å} \quad \rightarrow \quad \sin\theta = 0.684 \quad \rightarrow \quad \theta = 43.16°$$

(ج) $2d \sin\theta = m\lambda$

$$2 \times 3.0357\ \text{Å} \times \sin\theta = 1 \times 0.707 \quad \rightarrow \quad \sin\theta = 0.116 \quad \rightarrow \quad \theta = 6.687°$$

(5) أشعة سينية أحادية الطول الموجي $(\lambda = 0.166\ nm)$ انبعثت من هدف من النيكل وسقطت على سطح بلورة كلوريد البوتاسيوم (KCl) التي تبلغ الفواصل بين مستويات الذرات فيها $0.314\ nm$. عند أي زاوية (بالنسبة للسطح) يجب أن تُوجه الحزمة كي يظهر الحد الأقصى للمرتبة الثانية؟

الحل : بتطبيق قانون براگ $2d \sin\theta = m\lambda$

$$\sin\theta = \frac{m\lambda}{2d} = \frac{2(0.166 \times 10^{-9} m)}{2(0.314 \times 10^{-9} m)} = 0.529 \quad \rightarrow \quad \theta = 31.9°$$

(6) شوهد الحد الأقصى لحيود المرتبة الأولى عند الزاوية $12.6°$ لبلورة تبلغ الفواصل بين مستويات الذرات فيها $0.25\ nm$. (أ) ما هو طول موجة الأشعة السينية المستخدمة لمشاهدة نمط هذه المرتبة الأولى؟ (ب) كم مرتبة يمكن مشاهدتها لهذه البلورة عند هذا الطول الموجي؟

الحل : (أ) بتطبيق قانون براگ لـ $(\mathrm{m} = 1)$ $2\mathrm{d} \sin\theta = \mathrm{m}\lambda$

$$\lambda = 2d \sin\theta = 2(0.25\ nm) \sin 12.6 = 0.109\ nm$$

(ب) للحصول على رقم الرتبة:

$$\frac{m\lambda}{2d} = \sin\theta \leq 1 \quad \rightarrow \quad m \leq \frac{2d}{\lambda} = \frac{2(0.25\ nm)}{0.109\ nm} = 4.59$$

رقم الرتبة يجب أن يكون عدداً صحيحاً، ولهذا فإن أكبر قيمة تكون 4: أي يمكن مشاهدة أربع رتب.

(7) يُستطار فوتون عالي الطاقة في ظاهرة كومبتن بزاوية $30°$، ويرتد الإلكترون المقصوف بزاوية $30°$ أيضاً. احسب طاقة الفوتون الساقط.

الحل: زاوية استطارة الفوتون $(\phi = 30°)$ وزاوية استطارة الإلكترون $(\theta = 30°)$

$$\cot\frac{\phi}{2} = (1+\propto)\tan\theta \quad \Rightarrow \quad \cot 15 = (1+\propto)\tan 30 \quad \Rightarrow \quad 3.732 = (1+\propto)0.577$$

$$(1+\propto) = \frac{3.732}{0.577} = 6.468 \quad \rightarrow \propto = 5.468$$

$$\propto = \frac{hf}{m_o c^2} \quad \rightarrow \quad f = \frac{\propto m_o c^2}{h}$$

$$E = hf = \propto m_o c^2 = 5.468(9.1\times10^{-31}kg)(3\times10^8 m/s)^2 = 4.478\times10^{-13}J$$

$$= 4.478\times10^{-13}J\left(\frac{1\ eV}{1.602\times10^{-19}\ J}\right) = 2.799\times10^6 eV = 2.799\ MeV$$

(8) احسب التغير في الطول الموجي الناتج بسبب إستطارة إشعاع K_α صادر من هدف موليبدينوم والذي يحدث عند الطول الموجي 0.707 Å، وكانت زاوية الاستطارة $90°$ بعد وقوعه على: (أ) إلكترون، (ب) ذرة كربون. ثم احسب طول موجة الخط المستطار في كل حالة.

الحل: زاوية استطارة الفوتون $(\phi = 90°) \leftarrow (\cos 90° = 0)$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_o c}(1-\cos\phi) = \frac{h}{m_o c}(1-0) = \frac{h}{m_o c}$$

(أ) للإلكترون:

$$\Delta\lambda = \frac{6.626\times10^{-34}\ J.s}{(9.1\times10^{-31}\ kg)(3\times10^8\ m/s)} = 2.42\times10^{-12}\ m = 0.024\ \text{Å}$$

* وسيكون الطول الموجي للخط المستطار في هذه الزاوية:

$$\lambda' = \Delta\lambda + \lambda = 0.024\ \text{Å} + 0.707\ \text{Å} = 0.731\ \text{Å}$$

(ب) لذرة الكربون:

$$\Delta\lambda = \frac{6.626\times10^{-34}\ J.s}{(12\times1.67\times10^{-27}\ kg)(3\times10^8\ m/s)} = 1.1\times10^{-16}\ m = 1.1\times10^{-6}\ \text{Å}$$

* وسيكون الطول الموجي للخط المستطار في هذه الزاوية:

$$\lambda' = \Delta\lambda + \lambda = 1.1\times10^{-6}\ \text{Å} + 0.707\ \text{Å} \approx 0.707\ \text{Å}$$

ويُلاحظ أن التغير في الطول الموجي في حالة الإلكترون أكبر بكثير من التغير في حالة ذرة الكربون، بل إن التغير في حالة ذرة الكربون غير محسوس عملياً، وهذا بسبب كبر كتلة ذرة الكربون مقارنة بكتلة الإلكترون وحسب ما تعطيه قيمة المقدار $(h/m_o c)$.

(9) خضعت أشعة سينية طاقتها $300\ keV$ لاستطارة كومبتن من هدف، ورُصدت الأشعة المستطارة عند الزاوية $37°$ نسبة للأشعة الساقطة. جد (أ) التغير في طول موجة كومبتن عند هذه الزاوية، (ب) طاقة الأشعة السينية المستطارة، (ج) طاقة الإلكترون المرتد.

الحل : (أ)

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_o c}(1-\cos\phi)$$

$$= \frac{6.626\times10^{-34}\ J.s}{(9.1\times10^{-31}\ kg)(3\times10^{8}\ m/s)}(1-\cos 37) = 4.89\times10^{-13}\ m = 0.489\ pm$$

(ب)

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6.626\times10^{-34}\ J.s)(3\times10^{8}\ m/s)(1\ eV/1.6\times10^{-19}\ J)}{300\times10^{3} eV}$$

$$= \frac{1.24\times10^{-6}\ eV.m}{300\times10^{3}\ eV} = 4.14\ pm$$

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = 4.14\ pm + 0.489\ pm = 4.629\ pm$$

طاقة الفوتون المستطار:

$$E' = hf' = \frac{hc}{\lambda'} = \frac{1.24\times10^{-6}\ eV.m}{4.629\ \times10^{-12}\ m} = 2.68\times10^{+5}\ eV = 268\ keV$$

(ج) طاقة الإلكترون المرتد:

$$E_e = E - E' = 300\ keV - 268\ keV = 32\ keV$$

(10) جد أعظم فقدان طاقة جزئي لشعاع گاما طاقته $0.511\ MeV$ خضع لاستطارة كومبتن من: (أ) إلكترون حر، (ب) بروتون حر.

الحل: أعظم فقدان للطاقة يظهر كأعظم زيادة في الطول الموجي، وهذا يحدث عندما تكون الاستطارة بدرجة $180°$. ولهذا:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_o c}(1-\cos 180) = \frac{h}{m_o c}(1+1) = \frac{2h}{m_o c}$$

حيث m_o كتلة الجسيم الهدف. وسيكون فقدان الطاقة الجزئي:

$$\frac{E-E'}{E} = \frac{hc/\lambda - hc/\lambda'}{hc/\lambda} = \frac{1/\lambda - 1/\lambda'}{1/\lambda} = \frac{\frac{\lambda'-\lambda}{\lambda\lambda'}}{1/\lambda} = \frac{\lambda'-\lambda}{\lambda'} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda+\Delta\lambda}$$

$$= \frac{2h/m_o c}{\lambda + 2h/m_o c} = \frac{2h/m_o c}{hc/E + 2h/m_o c} \qquad because\ \ (\lambda = hc/E)$$

وبضرب الطرف الأيمن للمعادلة بـ $\left(\frac{Em_o c/h}{Em_o c/h}\right)$ ⇐

$$\frac{E-E'}{E} = \frac{2E}{m_o c^2 + 2E}$$

(أ) لاستطارة من إلكترون حر: $(m_o c^2 = 0.511\ MeV)$، ولهذا:

$$\frac{E - E'}{E} = \frac{2(0.511\ MeV)}{0.511\ MeV + 2(0.511\ MeV)} = 0.667$$

(ب) لاستطارة من بروتون حر: $(m_o c^2 = 938\ MeV)$، ولهذا:

$$\frac{E - E'}{E} = \frac{2(0.511\ MeV)}{938\ MeV + 2(0.511\ MeV)} = 0.00109$$

ويتضح من هاتين النتيجتين أنه كلما كانت كتلة الهدف كبيرة كلما قل فقدان الفوتون الساقط لطاقته.

(11) إذا كان معامل الامتصاص الخطي للألمنيوم والنحاس يساوي $0.693\ cm^{-1}$ و $13.9\ cm^{-1}$ على التوالي للخط K_α من طيف الأشعة السينية للتنكستن، فاحسب:

(أ) النسبة المئوية لشدة هذا الخط عند مروره خلال صفيحة سمكها $5\ mm$ من الألمنيوم وأخرى بنفس السمك من النحاس. (ب)سمك الألمنيوم المكافئ لامتصاص $5\ mm$ من النحاس لهذا الطول الموجي.

الحل : (أ) للألمنيوم :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} = e^{-0.693\ cm^{-1} \times 0.5 cm} = e^{-0.3465} = 0.707 = 70.7\%$$

للنحاس :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} = e^{-13.9\ cm^{-1} \times 0.5 cm} = e^{-6.95} = 9.58 \times 10^{-4} = 0.0958\%$$

(ب) نفرض سمك الألمنيوم المكافئ لسمك $5\ mm$ من النحاس هو x،

$$(I/I_0\ )_{Cu} = (I/I_0\ )_{Al}$$

$$\left(e^{-13.9\ cm^{-1} \times 0.5 cm}\right)_{Cu} = \left(e^{-0.693\ cm^{-1} x}\right)_{Al}$$

$$-13.9\ cm^{-1} \times 0.5 cm = -0.693\ cm^{-1} x \quad \rightarrow \quad x = \frac{13.9\ cm^{-1} \times 0.5 cm}{0.693\ cm^{-1}} = 10.02\ cm$$

(12) إذا كان معامل الامتصاص الكتلي للأشعة السينية ذات الطول الموجي $(\lambda = 0.7\ \text{Å})$ هو $(5\ cm^2/gm)$ للألمنيوم و $(50\ cm^2/gm)$ للنحاس. وكانت كثافة الألمنيوم $(2.7\ gm/cm^3)$ وكثافة النحاس $(8.93\ gm/cm^3)$. ما سُمك كل من هاتين المادتين اللازم لتخفيض شدة حزمة الأشعة السينية المارة خلالها إلى ربع قيمتها الابتدائية؟

الحل : يُعطى معامل الامتصاص الكتلي بالعلاقة

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

للألمنيوم :

$$5\ cm^2/gm = \frac{\mu}{2.7\ gm/cm^3} \quad \rightarrow \quad \mu = 13.5\ cm^{-1}$$

$$I/I_0 = e^{-\mu x} \quad \rightarrow \quad 0.25\ I_0 = I_0\, e^{-\mu x} \quad \rightarrow \quad 0.25 = e^{-\mu x} \quad \rightarrow \quad \ln 0.25 = -\mu x$$

$$x = \frac{-\ln 0.25}{\mu} = \frac{1.386}{13.5\ cm^{-1}} = 0.102\ cm$$

للنحاس :

$$50\ cm^2/gm = \frac{\mu}{8.93\ gm/cm^3} \quad \rightarrow \quad \mu = 446.5\ cm^{-1}$$

$$x = \frac{-\ln 0.25}{446.5\ cm^{-1}} = 0.0031\ cm$$

فهرست الفصل الرابع

الموضوع	الصفحة
4-1: اكتشاف الأشعة السينية	1
4-2: إنتاج الأشعة السينية	2
4-3: قياس شدة الأشعة السينية	3
4-4: أطياف الأشعة السينية	4
4-4-1: طيف الأشعة السينية المستمر	5
4-4-2: طيف الأشعة السينية الخطي الحاد	7
4-5: طبيعة وحيود الأشعة السينية	8
4-6: انكسار الأشعة السينية	10
4-7: تأثير كومبتن	12
4-8: إنتاج الزوج	16
4-9: امتصاص الفوتون	18
أسئلـة	21
مسائل محلولة	22

مصادر الفصل الرابع

1- الفيزياء الذرية، د. طالب ناهي الخفاجي و د. عباس حمادي و د. هرمز موشي.
2- مفاهيم في الفيزياء الحديثة، آرثر بايزر، ترجمة الطبعة الثانية.
3- أساسيات الفيزياء، ف. بوش، ترجمة طبعة سنة 1977.
4- Concepts of Modern Physics, Arthur Beiser, 6th ed. 2003.
5- Fundamentals of physics- Halliday, Resnick, Walker—10th ed. 2014.
6- Introduction to Atomic and Nuclear Physics, Semat and Albright, 5th ed. 1972.
7- Modern Physics, A. Serway, J. Moses and A. Moyer, 3rd ed. 2005.
8- Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, Serway and Jewett, 9th ed. 2014.
9- Atomic and Laser Physics, A.M. FOX, 2015.