

الفصل الرابع الأشعة السينية X-Rays

4-1: Discovery of X-Rays

٤-١: اكتشاف الأشعة السينية

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 اكتشف هذا عملياً من قبل رينتكين Roentgen في عام 1895. حيث وجد أنه عندما شغل أنبوب الأشعة الكاثودية فإن حزمة من الإلكترونات^١ عالية السرعة قد ضربت هدفاً معدنياً من سيانيد البلاتين والباريوم موضوعاً على مسافة من الأنبوب، وأنتجت نوعاً جديداً من الإشعاع ذا اختراق كبير جداً. وقد سماها رينتكين بالأشعة السينية x-rays (أي المجهولة) لأنه لم يكن يعرف طبيعتها. وبعد أشهر من اكتشاف رينتكين التقطت أولى الصور الطبية بواسطة الأشعة السينية. وخلال عدة سنوات أصبح من الواضح أن الأشعة السينية هي اهتزازات كهرومغناطيسية مشابهة للضوء ولكن بأطوال موجية قصيرة جداً وقدرة اختراق كبيرة. وأظهرت التقديرات التقريبية المستحصلة - بعد حين - من حيود الأشعة السينية بواسطة فتحة ضيقة أن الأطوال الموجية للأشعة السينية من رتبة تقارب $10^{-10} m$ ، وهي بنفس مرتبة قيمة المسافات الذرية في البلورات. ولما أدرك رينتكين أهمية اكتشافه استمر بدراسة خواص هذه الأشعة الجديدة، وتم التوصل إلى ميزات الأشعة السينية التالية:

- ١- تعتبر جميع المواد شفافة بدرجات متفاوتة بالنسبة للأشعة السينية، لأنها تستطيع النفاذ خلال المواد حسب طبيعة المادة.
- ٢- تنتقل بخطوط مستقيمة ولا تتأثر بالمجالين المغناطيسي والكهربائي، فهي ليست جسيمات مشحونة لأن جميع الإشعاعات الكهرومغناطيسية (ومنها السينية) متكونة من فوتونات، والفوتون عديم الشحنة.
- ٣- تستطيع الأشعة السينية تفريغ شحنة الأجسام المشحونة كهربائياً، سواء كانت الشحنة موجبة أو سالبة. كما إنها تستطيع أن تؤين الغازات عند مرورها خلالها.

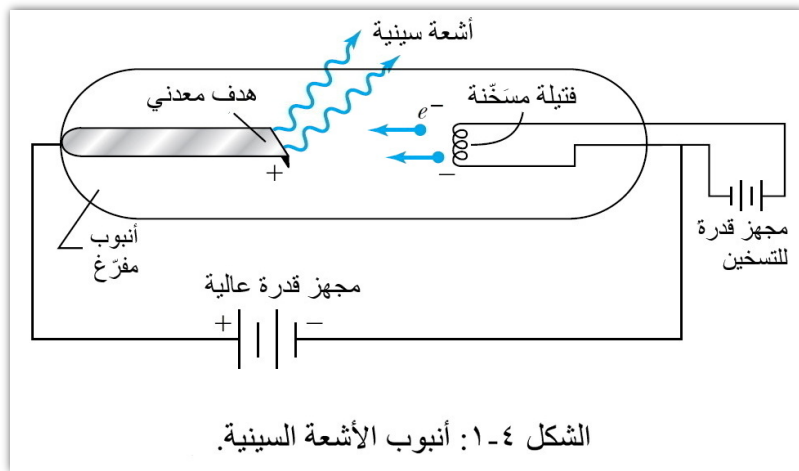
(١) كان هذا قبل اكتشاف تومسون للإلكترونات، أي إن رينتكين لم يكن يعرف أن الأشعة الكاثودية هي ما يسمى بالإلكترونات.

- ٤- تسبب الأشعة السينية توهج المواد الفسفورية ومواد أخرى، وتؤثر على لوح التصوير.
- ٥- 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.
- ٦- كلما زادت سرعة الإلكترونات المسببة لانبعاث الأشعة السينية زادت نفوذية الأشعة السينية المتولدة. وحين يزداد عدد تلك الإلكترونات تزداد شدة حزمة الأشعة السينية.
- وحاول رينتغن أن يُعرِّض الأشعة السينية للانعكاس والانكسار، ولكنه لم ينجح. وبعد ربع قرن تقريباً تبين أن الأشعة السينية يمكن أن تنعكس وتكسر. وأحد أسباب عدم تمكن رينتغن من هذا هو أن الأشعة السينية ذات طول موجي قصير جداً، ولهذا يكون معامل انكسارها صغيراً جداً وأقل قليلاً من واحد. وفي عام 1906 أثبت بار كلا Barkla عملياً امكانية استقطاب الأشعة السينية، وفي عام 1912 نجح لاوي Laue أن يثبت حيود الأشعة السينية بواسطة البلورات crystals. وقد أثبتت هكذا تجارب الطبيعة الموجية للأشعة السينية لأن الاستقطاب والحيود هما من صفات الموجات. ويقع طيف الأشعة السينية ضمن مدى يقارب $(0.01 \text{ nm} \rightarrow 10 \text{ nm})$ ، وهذه الحدود ليست حدية لأن الطول الموجي الأقصر للأشعة السينية يتداخل مع أشعة غاما بينما يتداخل الطول الموجي الأطول مع الأشعة فوق البنفسجية.

٤-٢: إنتاج الأشعة السينية

4-2: Production of X-Rays

تنبعث الأشعة السينية عندما يُقصف هدف معدني بجسيمات مشحونة عالية الطاقة سواء كانت إلكترونات أو غيرها. ففي تجربة رينتغن 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 ٤-١ مخططاً لجهاز مشابه من حيث المبدأ للجهاز الذي استخدمه رينتغن.

عندما يُسخن القطب السالب (الكاثود) إلى درجة حرارة عالية جداً بواسطة فتيلة

مصنوعة من التنجستن يمر خلالها تيار كهربائي فإنه يطلق إلكترونات في عملية تسمى الانبعاث الحراري thermionic emission. (كما هو الحال في التأثير الكهروضوئي، فإن الحد الأدنى

من الطاقة التي يجب أن يكتسبها إلكترون منفرد للهروب من سطح الكاثود يساوي دالة الشغل للسطح. وفي هذه الحالة تكتسب الإلكترونات الطاقة عن طريق الحرارة بدلاً من الضوء). ويُسلط فرق جهد عالٍ يبلغ آلاف الفولتات بين القطبين السالب والموجب يعمل على تعجيل الإلكترونات نحو الهدف كي تنبعث الأشعة السينية منه. ويتم تفريغ الجهاز إلى ضغط يقارب (10^{-7} atm) أو أقل، ولهذا يمكن للإلكترونات الانتقال من القطب السالب إلى القطب الموجب دون الاصطدام بجزيئات الهواء. ويُصنع الهدف من مادة ذات درجة انصهار عالية وعدد ذري كبير نسبياً ($Z \geq 12$) مثل النحاس والتنگستن والموليدنوم. ويشكل سطح الهدف زاوية مع اتجاه حزمة الإلكترونات الساقطة، وتمر الأشعة السينية المنبعثة من الهدف من خلال الجدار الجانبي للأنبوب.

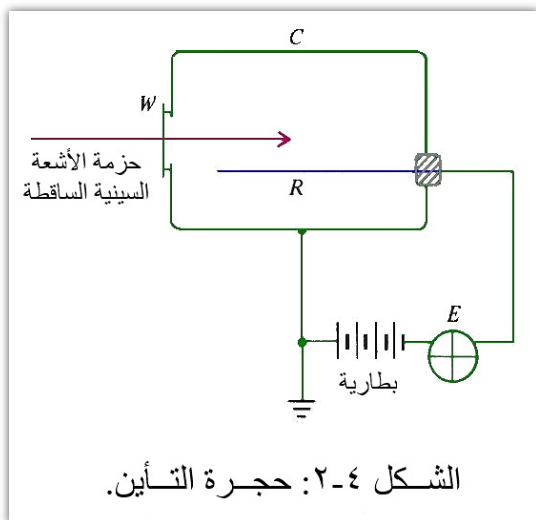
٤-٣: قياس شدة الأشعة السينية 4-3: Measurement of the Intensity of X-Rays

تقاس شدة الأشعة السينية بطرق متعددة مثل:

- ١- قياس شدة التوهج (الفلورة) الذي تحدثه الأشعة في بعض المواد.
- ٢- قياس مقدار تأثيرها على لوح التصوير.
- ٣- قياس مقدار ارتفاع درجة الحرارة لقطعة معدنية مثل الرصاص عند امتصاصها للأشعة.
- ٤- قياس مقدار التأين الذي تسببه الأشعة.

وقد وُجد أن شدة الأشعة السينية المنبعثة من أنبوب معين تعتمد على نوع مادة الهدف وفرق الجهد بين الهدف والكاثود.

ولحساب شدة الأشعة السينية تُستخدم حجرة التأين ionization chamber للاستفادة من ظاهرة



التأين. وفي الشكل ٤-٢ حجرة تأين نموذجية تتكون من اسطوانة معدنية C يخترقها قطب معدني R بموازية محورها ويكون معزولاً عنها. وتحتوي الاسطوانة على هواء أو غاز ملائم يقترب ضغطه من الضغط الجوي. وتدخل الأشعة السينية إلى الحجرة من خلال نافذة رقيقة W تُصنع عادة من المايكا أو الألمنيوم، وبعد دخولها تؤين الغاز الموجود في الحجرة. وتحافظ البطارية على فرق جهد بين C و R بحيث يتم تحديد حركة الأيونات باتجاه C و R بمجرد

تشكيلها، فيتحرك كل أيون نحو القطب المخالف له بالشحنة. ويتسبب هذا في مرور تيار كهربائي يقاس بواسطة الإلكتروميتر E . وقد وُجد أن تيار التآين يتناسب طردياً مع شدة الأشعة السينية الساقطة. ويُستخدم أيضاً عداد غايغر والعداد الومضي لقياس شدة الأشعة السينية.

٤-٤: أطيف الأشعة السينية

4-4: The Spectra of X-Rays

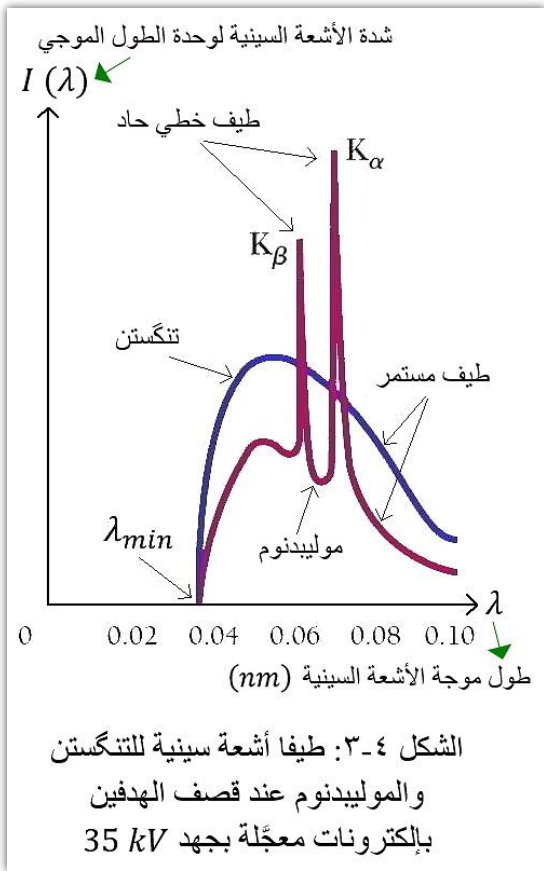
عندما قيسَت شدة الأشعة السينية المنبعثة من هدف كدالة لطول موجتها بواسطة مطياف بلوري crystal spectrometer وُجد بأن طيف الأشعة السينية النموذجي يتألف من نوعين من الأطياف ينشآن

عن أصليين مختلفين:

١- طيف مستمر (أي حزمة عريضة من الأطوال الموجية).

٢- طيف خطي مميز حاد مركب على الطيف المستمر.

وفي الشكل ٣-٤ وُضح طيفاً للأشعة 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 الموليبدنوم molybdenum فنتج عن ظروف مماثلة، ولكنه بخطين حادّين يميزان عنصر الموليبدنوم ومتراكبين على الطيف المستمر. ويُعرف هذان الخطان بخطي K_α و K_β للموليبدنوم. ولغرض الحصول على خطي K_α و K_β للتنكستن أيضاً يجب أن يعمل الأنبوب بجهد يقارب 70 kV.



4-4-1: The Continuous X-Ray Spectrum

٤-٤-١: طيف الأشعة السينية المستمر

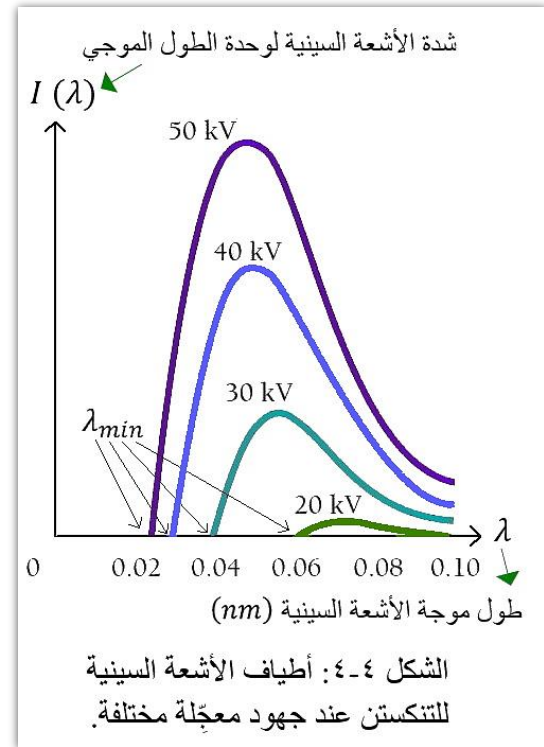
يُنتج الطيف المستمر للأشعة السينية الذي يمثله المنحنى المتصل في الشكلين ٣-٤ و ٤-٤ من الهدف المعدني (القطب الموجب أو الأنود) عندما تتباطأ الإلكترونات ذات الطاقة العالية نتيجة نقصان طاقتها الحركية بعد اصطدامها بجسيمات الهدف، وتحول هذه الطاقة الحركية إلى فوتونات. وبسبب أن الإلكترونات هنا تخضع لتعجيل كبير جداً يكسبها طاقة عالية عند انطلاقها بسبب تسليط جهد كهربائي كبير، فإنها بعد اصطدامها بالهدف وتباطؤها المفاجئ داخله تفقد طاقة كبيرة بصورة سريعة خلال زمن

قصير، وهذه الطاقة المفقودة تتحول إلى إشعاع ذي طاقة كبيرة، أي بأطوال موجية قصيرة في نطاق الأشعة السينية: حوالي 1 nm إلى 1 pm.

يمكن أن يختلف مقدار الطاقة الحركية المفقودة في أي تفاعل من صفر إلى الطاقة الحركية الكاملة للإلكترون. ويمكن أن تجري عدة تفاعلات لكل إلكترون مع ذرات الهدف قبل أن يفقد كل طاقته الحركية. وفي كل تصادم يتحول جزء فقط من طاقة الإلكترون إلى إشعاع كهرومغناطيسي. وبسبب التصادمات العشوائية للإلكترونات فإن ما يفقده الإلكترون في التصادم الواحد من طاقة ليس ثابتاً، كما إن عدد التصادمات متغير، ولهذا تصبح طاقة الإشعاعات المنبعثة متقاربة جداً وتظهر على شكل طيف مستمر. ويسمى الإشعاع الذي يولد الطيف المستمر bremsstrahlung، وهي كلمة ألمانية تعني أشعة الكبح أو التوقف braking radiation، حيث تتولد هذه الأشعة عندما تتباطأ حركة الإلكترونات القاصفة فجأة عند التفاعل والتصادم مع ذرات الهدف.

ورغم هذا التحليل لعملية التصادم فليس هناك توافق تام بين استنتاجات النظرية الكهرومغناطيسية التقليدية والنتائج العملية من بعض الجوانب. حيث تظهر المنحنيات ميزتين لا يمكن للنظرية الكهرومغناطيسية أن تفسرهما، وهما:

١- حدوث قمتي الشدة $K\alpha$ و $K\beta$ كما في حالة الموليبدنوم في الشكل ٤-٣، والتي تشير إلى إنتاج غزير للأشعة السينية عند أطوال موجية معينة، أي إن شدة الإشعاع عالية. وهذا تأثير غير تقليدي كما مبين في الموضوع القادم "طيف الأشعة السينية المميز".



٢- يجب وفق النظرية الكهرومغناطيسية التقليدية أن يكون للأشعة السينية المنتجة بواسطة أشعة الكبح طيف يشمل جميع الترددات، وبالتالي جميع الأطوال الموجية. بينما تظهر النتائج التجريبية كما في الشكل ٤-٤ (الذي يوضح أطياف أشعة الكبح التي تم الحصول عليها عند استخدام نفس الكاثود والأنود مع أربعة جهود معجلة مختلفة V_{acc}) أنه لا تنبعث جميع ترددات الأشعة السينية وأطوالها الموجية، فكل طيف له حد أدنى من الطول الموجي λ_{min} (أي: تردد أقصى f_{max}) لكل

جهود معجل V_{acc} ، وعند زيادة V_{acc} (accelerating voltage) للمعدن الواحد تنقص λ_{min}

وعند نفس فرق الجهد تأخذ λ_{min} نفس القيمة لكل من الهدفين التنگستن والموليدنوم كما في الشكل ٤-٣ لأنها لا تعتمد على مادة الهدف وإنما تعتمد على الجهد المسلط V_{acc} . إن النموذج الموجي للإشعاع الكهرومغناطيسي لا يمكنه شرح هذه النتائج التجريبية، وإنما يمكن هذا باستعمال نموذج الفوتون. حيث تكون الطاقة الحركية العظمى للإلكترون المعجل عندما يصطدم بالذرة مساوية لـ eV_{acc} . ويتولد الفوتون الأعلى طاقة (الأعلى تردداً والأقصر طولاً موجياً) إذا تم إيقاف الإلكترون دفعة واحدة عند اصطدامه بالقطب الموجب، بحيث تتحول كل طاقته الحركية لإنتاج فوتون واحد، وسيُعطى تأثير أشعة الكبح وفق نموذج الفوتون (فرضية بلانك-آينشتاين الكمية) كما يلي:

$$\begin{aligned}
 E_{kmax} &= eV_{acc} = hf_{max} = \frac{hc}{\lambda_{min}} \quad \dots \dots 4.1 \\
 &= \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{\lambda_{min}} \\
 &= \frac{1.9878 \times 10^{-25} \text{ J.m}}{\lambda_{min}} = \frac{1.24 \times 10^{-6} \text{ eV.m}}{\lambda_{min}} \\
 \lambda_{min} &= \frac{1.24 \times 10^{-6} \text{ V.m}}{V_{acc}}
 \end{aligned}$$

يُلاحظ في هذه المعادلة إهمال دالة الشغل للهدف (القطب الموجب) والطاقة الحركية الابتدائية للإلكترونات الانبعاث الحراري من فتيلة القطب السالب لأن هذه الطاقات صغيرة جداً مقارنة بالطاقة الحركية eV_{acc} المكتسبة بسبب فرق الجهد الكبير. ولو كان جزء من الطاقة الحركية للإلكترون (وليس كلها) يذهب إلى إنتاج فوتون فإن طاقة الفوتون ستكون أقل من eV_{acc} وسيكون الطول الموجي أطول من λ_{min} . وقد قادت العلاقة 4.1 إلى أولى الطرق الموثوقة لحساب ثابت بلانك من قبل دوين وهانت Duane and Hunt.

ويمكن أن يُعد إنتاج الأشعة السينية، باستثناء القمم المذكورة في الميزة الأولى أعلاه، ظاهرة معاكسة للظاهرة الكهروضوئية لأن الطاقة الحركية للإلكترون القاصف تتحول إلى إشعاع، بينما في الظاهرة الكهروضوئية تتحول طاقة الإشعاع الساقط إلى طاقة حركية للإلكترون المنبعث.

تخضع معظم الإلكترونات التي تضرب الهدف للعديد من التصادمات الخاطفة، وتتحول طاقتها إلى حرارة. (هذا هو السبب في أن الأهداف في أنابيب الأشعة السينية مصنوعة من معادن ذوات درجات انصهار عالية مثل التنگستن، وعادة ما يتم استخدام وسيلة لتبريد الهدف). وتفقد بعض الإلكترونات معظم أو كل

طاقاتها في تصادم واحد مع الذرات المستهدفة. وهذه هي الطاقة التي تصبح أشعة سينية، لأن فقدان القليل فقط من طاقة الإلكترون ينتج فوتوناً ذا طاقة أقل مما لفوتونات الأشعة السينية.

ومن الميزات الأخرى لمنحنيات الطيف المستمر للأشعة السينية:

- ١- تزداد شدة الطيف المستمر عند زيادة فرق الجهد المسلط على الأنبوب كما في الشكل ٤-٤. وتتناسب قدرة الأشعة السينية المنبعثة طردياً تقريباً مع مربع الجهد المسلط V_{acc} والعدد الذري Z لمادة الهدف.
- ٢- عند زيادة فرق الجهد المسلط في أنبوب الأشعة السينية فإن طول الموجة لأعظم شدة تقترب باتجاه أطوال الموجات القصيرة كما في الشكل ٤-٤.

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

مثال ٤-١: جد التردد المقابل لأقصر طول موجي في إشعاع آلة أشعة سينية لها جهد معجل مقداره 50 kV .

$$\lambda_{min} = \frac{1.24 \times 10^{-6} \text{ V.m}}{V_{acc}} = \frac{1.24 \times 10^{-6} \text{ V.m}}{50000 \text{ V}} = 2.48 \times 10^{-11} \text{ m} \quad \text{الحل :}$$

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

مثال ٤-٢: تتعجل إلكترونات في أنبوب الأشعة السينية من خلال فرق جهد مقداره 10 kV قبل أن تصيب الهدف. فإذا أنتج إلكترون فوتوناً واحداً عند الاصطدام بالهدف فما هو الطول الموجي الأدنى للأشعة السينية الناتجة؟ أوجد الإجابة بالتعبير عن الطاقات بوحدات النظام الدولي SI والإلكترون فولت.

الحل: لإنتاج فوتون أشعة سينية بطول موجة أدنى - وبالتالي طاقة قصوى - يجب أن تذهب كل الطاقة الحركية للإلكترون إلى إنتاج فوتون أشعة سينية واحد. وسنستخدم المعادلة 4.1 لحساب الطول الموجي.

١- بوحدات النظام الدولي:

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eV_{acc}} = \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{(1.602 \times 10^{-19} \text{ C})(10 \times 10^3 \text{ V})} = 1.24 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.124 \text{ nm}$$

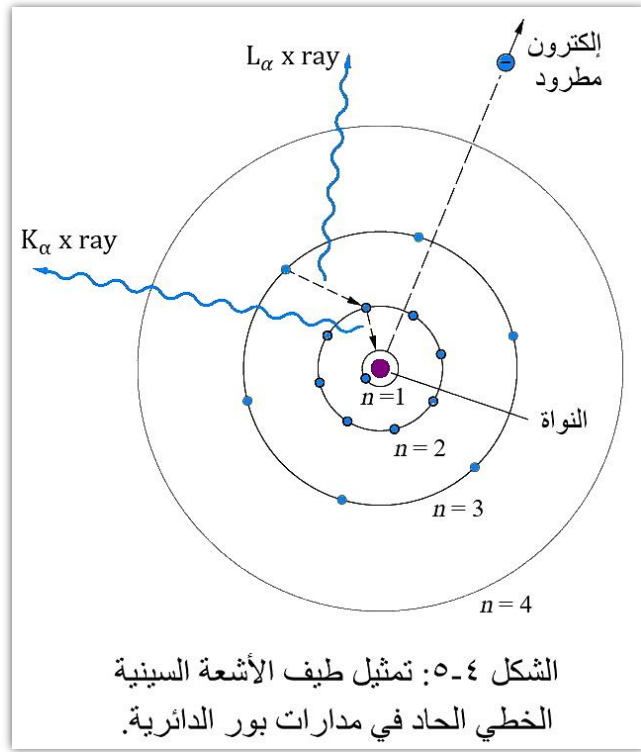
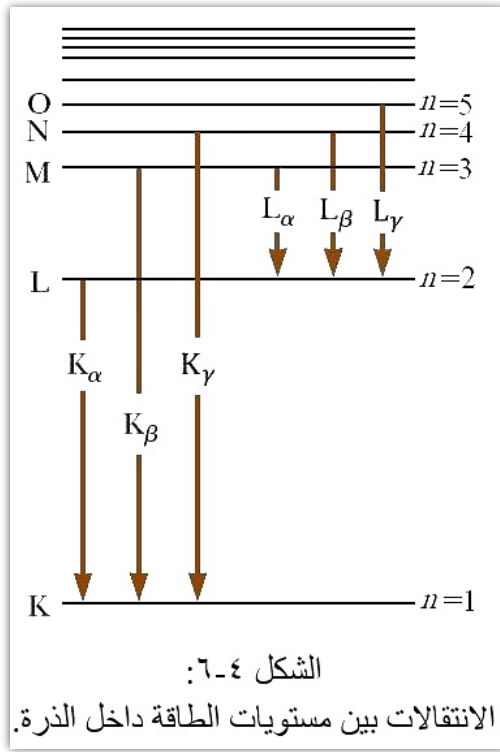
٢- بالإلكترون فولت:

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eV_{acc}} = \frac{(4.136 \times 10^{-15} \text{ eV.s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{e(10 \times 10^3 \text{ V})} = 1.24 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.124 \text{ nm}$$

4-4-2: The Characteristic X-Ray Spectrum

٤-٤-٢: طيف الأشعة السينية المميز

ينشأ الطيف الخطي الحاد المميز الموضح في الشكل ٤-٣ من تغيرات الطاقة بسبب إعادة ترتيب الإلكترونات في المستويات الإلكترونية المختلفة في الذرة بعد نقل الطاقة إلى الذرة بواسطة الإلكترون القاصف، حيث تبدأ الخطوة الأولى لحدوثه عندما يصطدم الإلكترون القاصف مع ذرة الهدف، ويجب أن يمتلك هذا الإلكترون طاقة كافية لإزالة الإلكترون الموجود في الغلاف الداخلي من الذرة. ويتم ملء المكان الشاغر للإلكترون المطرود من الغلاف الداخلي بالإلكترون نازل من مستوى أعلى، فينبعث فوتون ذو طاقة محددة تساوي الفرق بين طاقتي المستويين، ويظهر بشكل خط حاد في الطيف كما في الشكل ٤-٣. ولمعرفة كيفية هذه العملية لاحظ الشكل ٤-٥ الذي يمثل مدارات بور الدائرية. والفترة الزمنية لهذه الانتقالات الذرية قصيرة جداً تقل عن 10^{-9} s، وتكون طاقة هكذا انتقالات عادة أكبر من 1 keV ، وتمتلك فوتونات الأشعة السينية المنبعثة عندها طولاً موجياً ضمن المدى $(0.01 \text{ nm} \rightarrow 1 \text{ nm})$. ويُعتبر وجود الخطوط المميزة في طيف الأشعة السينية دليلاً مباشراً آخر على تكميم الطاقة في الأنظمة الذرية.



ويوجد عدة احتمالات للانتقالات الإلكترونية داخل الذرة كما في الشكلين ٤-٥ و ٤-٦، وهي:

- ١- 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 المميز K_α في الشكل ٤-٣.

٢- إذا ملئ المكان الشاغر في المدار الأول K بإلكترون ساقط من المدار الثالث M فسينتج الخط المميز K_{β} في الشكل ٤-٣. وإذا تم ملئ الشاغر بإلكترون من المدار الرابع N فسينتج الخط K_{γ} .

٣- 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 .

وتجريبياً تكون شدة الخط K_{α} أكبر من شدة الخط K_{β} لأن احتمالية ملئ الفراغ في المدار الأول من قبل إلكترون من المدار الثاني هي أكبر من احتمالية ملئه من قبل إلكترون من المدار الثالث.

٤-٥: تطبيقات الأشعة السينية 4-5: Applications of X-Rays

للأشعة السينية العديد من التطبيقات العملية في الطب والصناعة. ونظراً لأن فوتونات الأشعة السينية ذات طاقة عالية فيمكنها اختراق عدة سنتيمترات من المادة الصلبة. ومن ثم يمكن استخدامها لتصوير الأجزاء الداخلية للمواد غير الشفافة، مثل العظام المكسورة أو عيوب الهياكل الفولاذية. ويتم وضع الجسم المراد تصويره بين مصدر الأشعة السينية وكاشف إلكتروني (مثل ذلك المستخدم في الكاميرا الرقمية). وتعتبر العظام أكثر فاعلية في امتصاص الأشعة السينية من الأنسجة الرخوة، لذلك تظهر العظام كمناطق فاتحة اللون. ويسمح الشق أو الفقاعة الهوائية بنفاذية أكبر للأشعة ويظهر كم منطقة معتمة.

ومن إحدى تقنيات الأشعة السينية المستخدمة على نطاق واسع والتي تم تحسينها إلى حد كبير هي التصوير المقطعي المحوسب $computed\ tomography$ ، وتسمى الأداة المستخدمة فيه ماسح التصوير المقطعي المحوسب $CT\ scanner$ أو "المفراس". ويُنتج مصدر الأشعة السينية الموجود في الجهاز حزمة رفيعة يتم تسجيلها على الجانب الآخر من الجسم بواسطة المئات من أجهزة الكشف المصطفة. ويتم تدوير الجهاز بأكمله حول الجسم في مستوى الحزمة، ويتم التسجيل رقمياً لمعدلات عد الفوتونات. ويعالج الحاسوب هذه المعلومات ويعيد بناء صورة الامتصاص عبر مقطع عرضي كامل للجسم، حيث تظهر أعضاء الجسم حسب قدرتها على منع مرور الأشعة السينية عبرها. ويمكن اكتشاف فروق صغيرة في الامتصاص مثل 1% أو أقل من خلال التصوير المقطعي المحوسب، ويمكن اكتشاف الأورام والتشوهات الأخرى التي تكون صغيرة جداً بحيث لا يمكن رؤيتها باستخدام تقنيات الأشعة السينية القديمة.

تسبب الأشعة السينية في تلف الأنسجة الحية. ونظراً لامتصاص فوتونات الأشعة السينية في الأنسجة فإن طاقتها تكسر الروابط الجزيئية وتنتج جذوراً حرة شديدة التفاعل (مثل H و OH)، والتي بدورها يمكن

أن تسبب اضطراباً في التركيب الجزيئي للبروتينات وخاصة المادة الجينية. وتعتبر الخلايا الشابة والخلايا سريعة النمو أكثر حساسية، وهذا هو السبب في أن الأشعة السينية مفيدة للتدمير الانتقائي للخلايا السرطانية. وعلى العكس من ذلك قد تتضرر الخلية بسبب الإشعاع، ولكنها تبقى على قيد الحياة وتستمر في الانقسام وتنتج أجيالاً من الخلايا المعيبة، ولهذا يمكن أن تسبب الأشعة السينية السرطان.

٤-٦: طبيعة وحيود الأشعة السينية 4-6: Nature and Diffraction of X-Rays

لم ينجح رينتغن في تحديد طبيعة الأشعة السينية تماماً، ولكنه استنتج أنها ليست جسيمات مشحونة ولا تتأثر بالمجال المغناطيسي أو الكهربائي ولا تشبه الضوء الاعتيادي في طبيعتها الموجية بسبب عدم انكسارها أو حيودها حسب اعتقاده. ولدراسة حيود الأشعة السينية نستحضر معادلة محرز الحيود diffraction grating:

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad \dots \dots 4.2$$

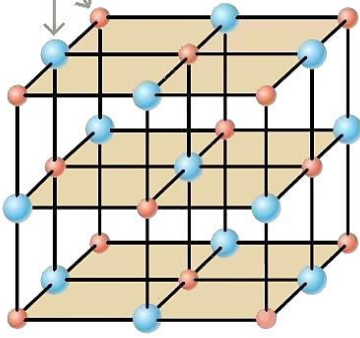
$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{d}$$

حيث m : مرتبة أعلى شدة للطيف، و λ : طول الموجة، و d : فاصلة المحرز، و θ : زاوية الحيود. 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. وعندما تكون m كبيرة (أي في المراتب العليا) تصبح الشدة ضعيفة ويصعب تحسس الأشعة. لذا فإن افتراض λ صغيرة جداً يعني عدم امكانية الحصول على حيود محسوس للأشعة السينية. وكمثال على هذا لو استعملنا محرز حيود بصرياً نموذجياً له فاصلة مقدارها $1 \mu m$ بين كل حزين من حروزه، وكان طول موجة الأشعة السينية $1 \text{ \AA}$ ، فإنه لأول مرتبة ($m = 1$) لأعلى شدة للطيف الناتج بعد عبور الأشعة لمحرز الحيود ستكون زاوية الحيود:

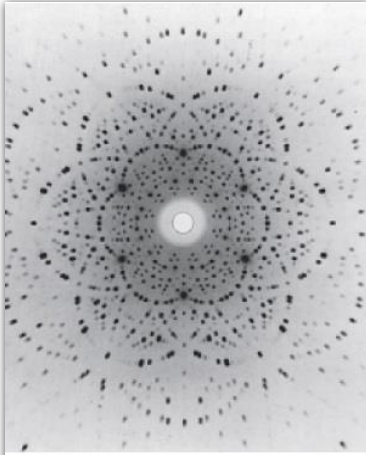
$$\theta = \sin^{-1} \frac{m\lambda}{d} = \sin^{-1} \frac{(1)(1 \times 10^{-10} \text{ m})}{1 \times 10^{-6} \text{ m}} = 0.0057^\circ$$

وهذا المقدار صغير جداً يصعب تحسسه، خاصة في زمن رينتغن. ولحل هذه المشكلة يجب تصغير فاصلة المحرز بحيث تكون قيمتها مقاربة للطول الموجي للأشعة السينية الساقطة كي تحيد الأشعة بزوايا أكبر، ولكن هذا التصغير صعب عملياً. وفي سنة 1912 اقترح لاوي استخدام البلورات ذات التركيب الذري أو الجزيئي المنتظم لتحل محل المحرز الاعتيادي لإحداث الحيود في مثل هكذا أطوال موجية قصيرة، فالتباعد بين هذه الذرات أو الجزيئات كان معروفاً أنه من مرتبة الأنغستروم (10^{-10} m). وتختلف البلورة عن محرز الحيود الاعتيادي بأن مراكز الحيود في البلورة ليست جميعاً في مستوى هندسي واحد، فالبلورة

تمثل الكرات الزرقاء أيونات Cl^-
وتمثل الكرات الحمراء أيونات Na^+



الشكل ٧-٤: التركيب البلوري
للكلوريد الصوديوم NaCl .



الشكل ٨-٤: نمط لاوي لبلورة
من البريل المعدني (البريليوم
الألمنيوم السليكات)، وتمثل كل
نقطة سوداء تداخلاً بناءً.

تؤثر كمحز كمحز مجسم (بثلاثة أبعاد) كما في الشكل ٤-٧ وليست كمحز بمستوى ذي بعدين. 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 ٤-٨

وقد اقترح براگ Bragg طريقة بسيطة لتحليل استطارة الأشعة

السينية من مستويات بلورية متوازية بافتراض مستويين متعاقبين من الذرات كما في الشكل ٤-٩، حيث تسقط حزمة أشعة سينية بطول موجي أحادي مقداره λ على بلورة بزاوية θ مع المستوى العلوي A الذي يبعد مسافة d عن المستوى الأوطأ المجاور له B . وسيصطدم

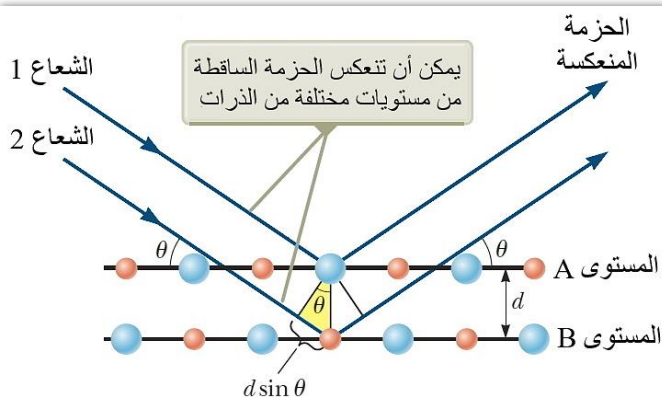
شعاع من الحزمة الساقطة بذرة في المستوى الأول وشعاع آخر بذرة أخرى في المستوى الثاني مما يؤدي إلى استطارة الشعاعين الساقطين. وسيقطع الشعاع الذي ينعكس من المستوى الأوطأ B مسافة أكبر من الشعاع الذي ينعكس من المستوى الأعلى A . وفرق المسار الفعال هو $2d \sin \theta$ (كيف هذا؟). وسيُقَوَّى الشعاعان بعضهما البعض ويحدث تداخل بناءً عندما يساوي فرق المسار هذا عدداً صحيحاً m مضروباً بـ λ . وينطبق الأمر نفسه على الانعكاس من جميع المستويات المتوازية الأخرى داخل البلورة.

ولهذا فإن التداخل البناء للأشعة السينية المنعكسة سوف يحدث

بشرطين:

١- تساوي زاويتي السقوط والانعكاس للأشعة مع المستويات.

٢- التقاء الأشعة المنعكسة بنفس الطور. وهذا يحدث إذا كان فرق طول المسار للشعاعين ١ و ٢ في مستويين متعاقبين A و B عدداً صحيحاً من الأطوال الموجية $m\lambda$ أي:



الشكل ٩-٤: استطارة براگ للأشعة السينية
من مستويين متعاقبين من الذرات.

$$2d \sin \theta = m\lambda , \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad \dots \dots 4.3$$

وهذه المعادلة تسمى قانون براك، وقد استخدمها لتحديد مواقع الذرات في البلورة. فإذا كانت λ معلومة يمكن حساب d ، ومن معرفة قيم متعددة لـ d يمكن معرفة تركيب البلورة. وبالمقابل إذا أجريت الحسابات بعد معرفة d يمكن حساب شدة الأشعة السينية وطولها الموجي λ وفحص طيف انبعاث الأشعة السينية.

مثال ٤-٣: وجه شعاع سيني طول موجته 0.154 nm على مستويات معينة من بلورة السيليكون. وعند زيادة زاوية سقوط الشعاع عن الصفر حدث الحد الأقصى للتداخل القوي الأول عندما صنع الشعاع زاوية 34.5° مع المستويات. (أ) كم تبعد مستويات البلورة عن بعض؟ (ب) هل ستجد قمماً أخرى للتداخل من هذه المستويات عند زوايا سقوط أكبر؟ (ج) ناقش النتيجة.

الحل: (أ) باستخدام المعادلة 4.3 وجعل $(m = 1)$ نحسب المسافة بين المستويات المتجاورة في البلورة:

$$d = \frac{m\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{(1)(0.154 \text{ nm})}{2 \sin 34.5^\circ} = 0.136 \text{ nm}$$

(ب) لحساب زوايا أخرى نحل المعادلة 4.3 بالنسبة لـ $\sin \theta$:

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{2d} = m \frac{0.154 \text{ nm}}{2(0.136 \text{ nm})} = m(0.566)$$

إن قيم m بقيمة 2 أو أكبر سيعطي قيماً لـ $\sin \theta$ أكبر من 1، وهذا مستحيل (لماذا؟). ولهذا فلن توجد زوايا أخرى للتداخل الأقصى لهذه المجموعة المحددة من المستويات البلورية.

(ج) تظهر نتيجة الفرع "ب" أنه سيكون هناك حد أقصى للتداخل الثاني ($m = 2$) إذا كانت الكمية $(2\lambda/2d = \lambda/d)$ أقل من 1، أي عندما يكون طول موجة الأشعة السينية أقل من $(d = 0.136 \text{ nm})$.

سؤال ١: كم يجب أن يكون قصر الطول الموجي لتظهر قمة تداخل ثالث ($m = 3$) في فرض المثال السابق - فرع ب؟

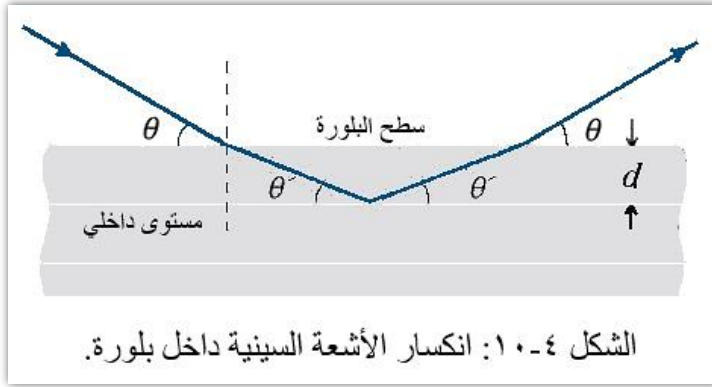
4-7: Refraction of X-Rays

٤-٧: انكسار الأشعة السينية

لم تُكتشف ظاهرة انكسار الأشعة السينية حتى عام 1919 عندما لاحظ ستينستروم Stenstrom أن قانون براك لم يُسفر عن نفس القيمة للطول الموجي في مراتب مختلفة من انعكاس حزمة أحادية الطول الموجي من البلورة. وتفسير هذا الفشل في قانون براك هو أن الأشعة السينية تنكسر عند اختراقها للبلورة. وبسبب الانكسار سيختلف الطول الموجي داخل 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:

$$n = \frac{\lambda}{\lambda'} \quad \dots \dots 4.4$$

وبالإضافة لهذا فإن زاوية السقوط على السطوح البلورية الداخلية ليست نفس الزاوية بين الحزمة الساقطة وسطح البلورة، وإنما تساوي الزاوية المحصورة بين الشعاع المنكسر داخل البلورة والمستويات الذرية الداخلية. وسيكون الاختلاف عن قانون براگ هو أن زاوية الانكسار θ' تقل عن زاوية السقوط θ بحيث



أن الأشعة السينية تبتعد عن العمود المقام على موضع دخول الشعاع لسطح البلورة كما في الشكل ٤-١٠. وهذا يعني أن معامل الانكسار للأشعة السينية يقل عن 1. وسأأخذ قانون سنيل Snell للانكسار الشكل التالي:

$$n = \frac{\cos \theta}{\cos \theta'} \quad \dots \dots 4.5$$

ولا تُعد 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:

$$m\lambda' = 2d \sin \theta' \quad \dots \dots 4.6$$

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 بعد استحضار العلاقة المثلثية:

$$\sin^2 \theta' + \cos^2 \theta' = 1 \quad \rightarrow \quad \sin \theta' = \sqrt{1 - \cos^2 \theta'}$$

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

$$\begin{aligned} \frac{m\lambda}{n} &= 2d\sqrt{1 - \cos^2 \theta'} = 2d\sqrt{1 - \frac{\cos^2 \theta}{n^2}} \\ m\lambda &= 2d\sqrt{n^2 - \cos^2 \theta} = 2d\sqrt{n^2 - 1 + \sin^2 \theta} \\ m\lambda &= 2d \sin \theta \sqrt{\frac{n^2 - 1}{\sin^2 \theta} + 1} \quad \dots \dots 4.7 \end{aligned}$$

وإخراج $\sin \theta$ من الجذر :

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

$$\left(1 + \frac{n^2 - 1}{\sin^2 \theta}\right)^{1/2} = 1 + \frac{n^2 - 1}{2 \sin^2 \theta} - \frac{1}{8} \left(\frac{n^2 - 1}{\sin^2 \theta}\right)^2 + \dots \approx 1 + \frac{n^2 - 1}{2 \sin^2 \theta}$$

ويلاحظ هنا أننا أهملنا الحدود التي تلي الحد الثاني لأن قيمة $(n^2 - 1)$ صغيرة جداً يمكن إهمالها إذا تضاعف الأس لأن قيمة n قريبة من واحد كما أثبتت التجربة، ولهذا يمكن التقريب $(n + 1 \approx 2)$.
وحينئذ تكتب المعادلة السابقة بالشكل:

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

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

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

إن الطريقة الشائعة للتعبير عن النتائج هي التمثيل بالمقدار $(\delta = 1 - n)$ الذي يوضح كيف يختلف معامل الانكسار عن واحد. وكمثال فإن معامل الانكسار للكالسيت calcite لطول الموجة $(\lambda = 0.708 \text{ \AA})$ يختلف عن الواحد بالمقدار $(\delta = 1 - n = 1.85 \times 10^{-6})$.

ويمكن استخلاص نتيجتين مهمتين من حقيقة أن معامل انكسار الأشعة السينية في الأوساط المادية هو أقل من واحد:

* إحداها هي أنه عندما تنتقل الأشعة السينية من الفراغ إلى وسط مادي ستنكسر مبتعدة عن العمود كما في الشكل ٤-١٠ (بعكس ما يحدث للضوء الاعتيادي).

* والأخرى هي أنه في زاوية حرجة معينة θ_c سوف لا تنكسر الأشعة السينية في الوسط المادي بل تنعكس كلياً، وستكون عندها $(\theta' = 0)$ أي $(\cos \theta' = 1)$ ، وسيصبح معامل الانكسار في المعادلة 4.5:

$$n = \cos \theta_c \quad \dots \dots 4.9$$

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

4-8: Compton Effect

٤-٨: تأثير كومبتن

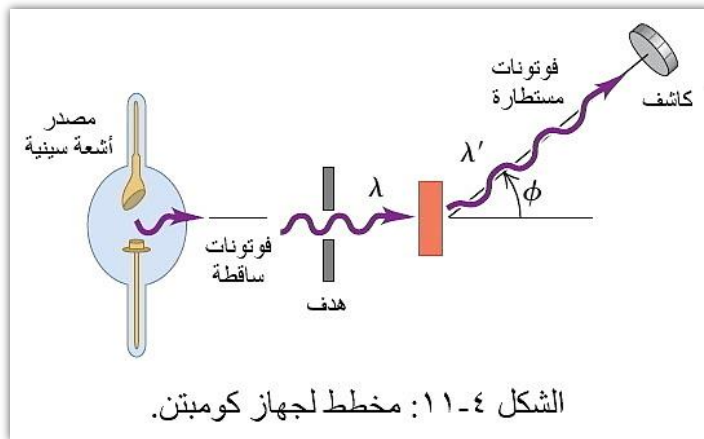
في عام 1919 وسع آينشتاين مفهومه لكمّات الضوء (الفوتونات) من خلال اقتراح أن كم الضوء الذي يمتلك طاقة E يحمل زخماً خطياً مقداره

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad \text{where} \quad \left(E = hf = \frac{hc}{\lambda}\right) \quad \dots \dots 4.10$$

ولمعرفة الفرق بين تنبؤ نموذج ماكسويل الموجي ونموذج فوتون آينشتاين لكيفية تصرف الشعاع عندما يتعرض للاستطارة بواسطة إلكترون منفرد، مثل إلكترون داخل ذرة، فإن النموذج الموجي يتوقع أن الإستطارة الحادثة في العملية هي عبارة عن عملية امتصاص وإعادة إشعاع، أي سيمتص الإلكترون جزءاً

من طاقة الموجة الساقطة، وسيتذبذب الإلكترون استجابةً للمجال الكهربائي المتذبذب للموجة. وسيعمل عند تذبذبه مثل هوائي antenna مصغر، ويعيد إشعاع طاقته المكتسبة على شكل موجات مستطارة في اتجاهات مختلفة. وسيكون التردد الذي يتذبذب عنده الإلكترون هو نفسه تردد الشعاع الساقط، وسيكون للشعاع الموجي المعاد إشعاعه نفس تردد تذبذبات الإلكترون. ولذلك سيكون للشعاع المستطار والشعاع الساقط في النموذج الموجي نفس التردد ونفس الطول الموجي.

أما وفق نموذج الفوتون فإن النظرية الكمية للضوء تفترض أن الفوتونات يمكن أن تسلك سلوك الجسيمات رغم أنها بلا كتلة سكونية. وعلى هذا الأساس يمكن معالجة تصادم الفوتون مع الإلكترون بنفس الطريقة التي يُعالج بها تصادم بين جسيمين. وسوف يتخلى الفوتون الساقط عن جزء من طاقته وزخمه للإلكترون الذي سوف يرتد نتيجة لهذا التصادم. ويمكن للفوتون المتبقي أن يستطار بمختلف الزوايا ϕ نسبة لاتجاه السقوط، لكنه يمتلك طاقة أقل وزخماً أقل من الفوتون الساقط (لاحظ الشكل ٤-١٢). وتُحسب طاقة وزخم الفوتون وفق المعادلة 4.10. ولذلك سيكون للشعاع المستطار تردد f أقل وطول موجي λ أطول من الشعاع الساقط.

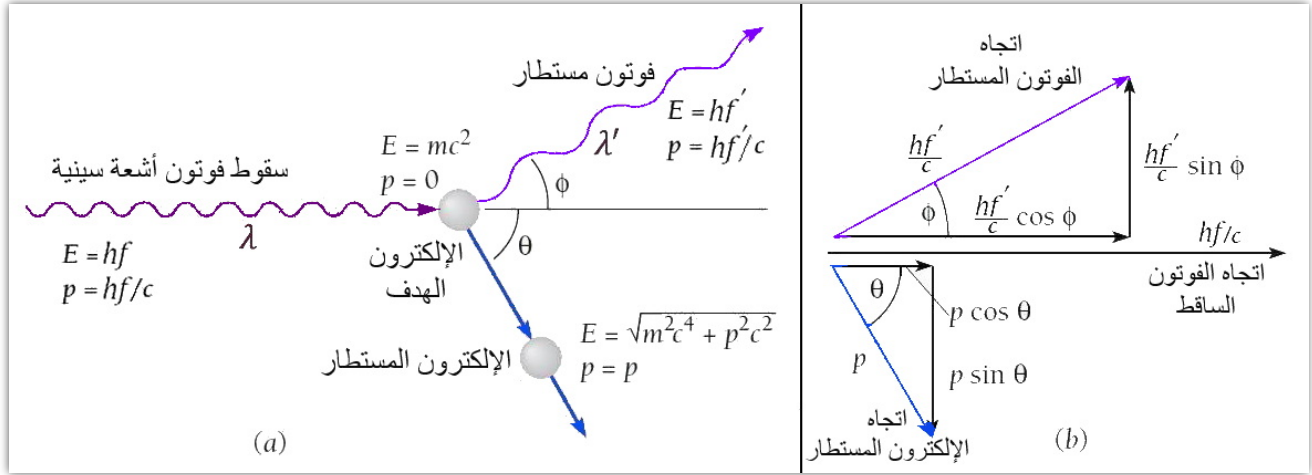


في عام 1922 قام كومبتن بتجربة وجّه فيها شعاعاً سنياً بطول موجي λ إلى هدف مصنوع من الكربون كما موضح في الشكل ٤-١١. وباستخدام قانون براگ قاس الأطوال الموجية للأشعة السينية المستطارة باتجاهات مختلفة من الهدف الكربوني.

يوضح الشكل ٤-١٢ فوتون أشعة سينية يصدم إلكترونًا (نفترض أنه كان في البداية ساكنًا وفق احداثيات المختبر)، وسوف ينحرف الفوتون عن مساره الأصلي بزاوية ϕ ، بينما يندفع الإلكترون منحرفاً عن اتجاه الفوتون الساقط بزاوية θ . ويمكن القول إن 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:

$$E_k = hf - hf' \quad \dots \dots 4.11$$

ومن الفصل الأول اتضح أن العلاقة بين زخم الجسيم عديم الكتلة (كالفوتون) وطاقته هي $(E = pc)$ ومن المعادلة 4.10: $(p = hf/c)$.



الشكل ٤-١٢: (a) استطارة كومبتن، (b) مخطط اتجاهي لزخم الفوتون المستطار والإلكترون المستطار.

يعتبر الزخم كمية اتجاهية تتضمن اتجاهًا ومقدارًا، وهو ليس كالطاقة التي هي كمية غير اتجاهية. ويجب أن يكون الزخم خلال التصادم محفوظاً في كل اتجاهين متقابلين (على محور x أو على محور y)^١ وفق مبدأ حفظ الزخم الخطي. وسيكون زخم الفوتون الابتدائي (hf/c) وزخم الفوتون المستطار (hf'/c). ويكون زخم الإلكترون الابتدائي صفرًا وزخمه النهائي p . وبتطبيق قانون حفظ الزخم الخطي باتجاه الفوتون الأصلي (المحور السيني):

الزخم النهائي = الزخم الابتدائي

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

وعمودياً على هذا الاتجاه (أي المحور الصادي):

الزخم النهائي = الزخم الابتدائي

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

ويمكن إيجاد صيغة تربط بين الفرق في طول موجة الفوتون الابتدائي والفوتون المستطار وبين

الزاوية ϕ . والخطوة الأولى هي ضرب كل من المعادلتين (4.12) و (4.13) بـ c وإعادة ترتيبهما لنتج:

$$pc \cos \theta = hf - hf' \cos \phi \quad \dots \dots 4.14$$

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

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

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

(١) لو كانت الأجسام المتصادمة متعددة وضمن ثلاثة أبعاد فيجب أن يكون الزخم محفوظاً في كل المحاور الثلاثة: x, y, z .

وعندنا من الفصل الأول علاقتان لطاقة الجسيم الكلية هما:

$$E = E_o + E_k = m_o c^2 + E_k \quad \dots \dots 1.39$$

$$E^2 = p^2 c^2 + m_o^2 c^4 \quad \dots \dots 1.43$$

وبتربيع المعادلة 1.39 ثم مساواتها مع المعادلة 1.43 ينتج:

$$(m_o c^2 + E_k)^2 = p^2 c^2 + m_o^2 c^4$$

$$p^2 c^2 = m_o^2 c^4 + 2m_o c^2 E_k + E_k^2 - m_o^2 c^4$$

$$p^2 c^2 = 2m_o c^2 E_k + E_k^2 \quad \dots \dots 4.17$$

بإدخال المعادلة 4.11 ($E_k = hf - hf'$) في المعادلة 4.17 ينتج:

$$p^2 c^2 = 2m_o c^2 (hf - hf') + (hf)^2 - 2(hf)(hf') + (hf')^2 \quad \dots \dots 4.18$$

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

$$2m_o c^2 (hf - hf') = 2(hf)(hf')(1 - \cos \phi) \quad \dots \dots 4.19$$

ويمكن كتابة هذه المعادلة بدلالة طول الموجة بدل التردد بعد تقسيمها على $(2h^2 c^2)$:

$$\frac{m_o}{h} (f - f') = \frac{f f'}{c c} (1 - \cos \phi) \quad \text{or} \quad \frac{m_o c}{h} \left(\frac{f}{c} - \frac{f'}{c} \right) = \frac{f f'}{c c} (1 - \cos \phi)$$

$$f/c = 1/\lambda \quad \text{and} \quad f'/c = 1/\lambda'$$

$$\frac{m_o c}{h} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right) = \frac{1 - \cos \phi}{\lambda \lambda'} \rightarrow \frac{m_o c}{h} \left(\frac{\lambda' - \lambda}{\lambda \lambda'} \right) = \frac{1 - \cos \phi}{\lambda \lambda'}$$

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

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_o c} (1 - \cos \phi) \quad \dots \dots 4.20$$

$$\lambda_C = \frac{h}{m_o c} \quad \dots \dots 4.21$$

يسمى المقدار λ_C طول موجة كومبتن للجسيم المستطار. وستصبح المعادلة 4.20 بدلالة λ_C :

$$\Delta \lambda = \lambda_C (1 - \cos \phi) \quad \dots \dots 4.22$$

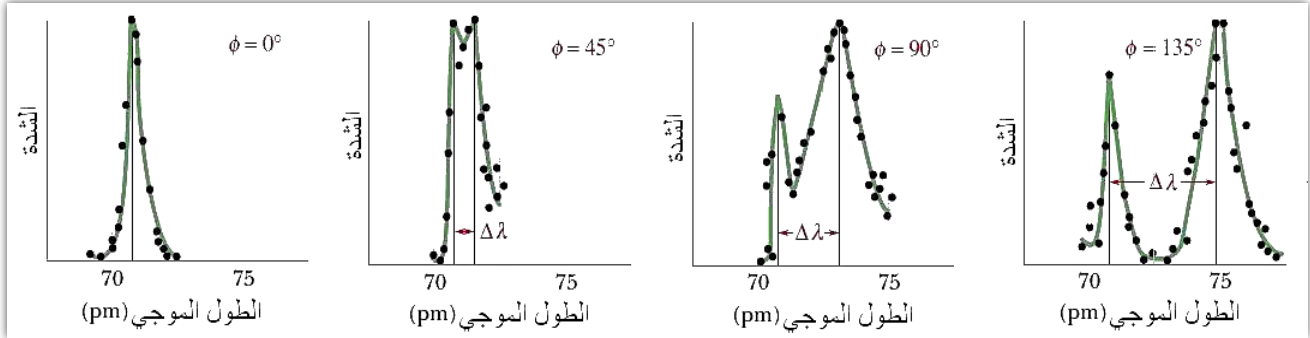
ويسمى $\Delta \lambda$: انزياح كومبتن Compton shift، وتعطي المعادلة 4.20 التغير في الطول الموجي لفوتون مستطار بزاوية ϕ بواسطة جسيم كتلته السكونية m_o ، وتمثل تأثير كومبتن الذي اشتقها بالإستناد إلى أسس كمية وحققها عملياً. وهذا يشكل دليلاً قوياً لدعم النظرية الكمية للإشعاع، (لماذا؟). وبتطبيق المعادلة 4.21 على الإلكترون لحساب طول موجة كومبتن له ينتج: ($\lambda_C = 2.427 \times 10^{-12} \text{ m}$) أي (2.427 pm)^١.

(^١) $1 \text{ pm} = 1 \text{ picometer} = 10^{-12} \text{ m}$

ويلاحظ من المعادلة 4.22 أن أكبر تغير في الطول الموجي يحدث عند زاوية استطارة ($\phi = 180^\circ$)، وسيكون هذا التغير ضعف طول موجة كومبتن λ_C لأن

$$\cos 180 = -1 \rightarrow \Delta\lambda = 2\lambda_C$$

ولما كان طول موجة كومبتن للإلكترون هو 2.427 pm فسنجد أن أكبر تغير للطول الموجي في ظاهرة كومبتن هو 4.854 pm ، حيث أن باقي الجسيمات لها λ_C أصغر مما للإلكترون بسبب كبر كتلتها السكونية نسبة له.



الشكل ٤-١٣: نتائج كومبتن لأربع قيم لزاوية الاستطارة ϕ .

يوضح الشكل ٤-١٣ مخططات شدة الأشعة السينية مقابل الطول الموجي التي لاحظها كومبتن تجريبياً لأربع زوايا استطارة (المقابلة لـ ϕ في الشكل ٤-١٢) مستخدماً خط الأشعة السينية المميز ذا الطول الموجي الأحادي ($0.0711 \text{ nm} = 71.1 \text{ pm}$) من مادة الموليبدنوم. وتستطار هذه الفوتونات الساقطة من قبل الإلكترونات في هدف من الكرافيت. ويلاحظ في الشكل أن انزياح كومبتن $\Delta\lambda$ يزداد بزيادة زاوية الاستطارة ϕ ، (لماذا؟)، وأنه على الرغم من وجود طول موجي واحد فقط في حزمة الأشعة السينية الساقطة فإننا نرى أن الأشعة السينية المستطارة تحتوي على مدى من الأطوال الموجية بذروتين بارزتين للشدة، إحداهما تتمركز حول الطول الموجي الساقط λ ، والأخرى حول الطول الموجي λ' الذي هو أطول من λ بالمقدار $\Delta\lambda$. وتتوافق الذروة الأولى عند كل زاوية استطارة مع حالة استطارة بلا انزياح في الطول الموجي ($\phi = 0$)، وهذه الحالة تحدث بسبب الأشعة السينية المستطارة من الإلكترونات الداخلية للكربون لأنها مرتبطة بإحكام بذرات الهدف، حيث إن الذرة بأكملها هي التي ترتد بدلاً من الإلكترونات الفردية. وتتوقع المعادلة 4.20 هذه الذروة غير المترحزة إذا تم استبدال كتلة الإلكترون بكتلة ذرة كربون، والتي تعادل 23000 ضعف كتلة الإلكترون تقريباً (كيف نتج هذا الرقم؟)، وبالتالي فإن هذا الانزياح سوف يُهمل.

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

$$\cot \frac{\phi}{2} = (1 + \alpha) \tan \theta \quad \dots \dots 4.23, \quad \text{where } \alpha = \frac{hf}{m_0 c^2}$$

مثال ٤-٤: سقطت أشعة سينية طولها الموجي 10 pm على هدف واستطارت منه. (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 4.22:

$$\lambda' = \lambda + \lambda_c(1 - \cos 45)$$

$$= 10 \text{ pm} + 0.293 \lambda_c = 10 \text{ pm} + 0.293 \times 2.427 \text{ pm} = 10.71 \text{ pm}$$

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

$$\lambda' = \lambda + 2\lambda_c = 10 \text{ pm} + 4.854 \text{ pm} = 14.854 \text{ pm}$$

(ج) إن أكبر طاقة حركية ارتدادية تساوي الفرق بين طاقة الفوتونات الساقطة والمستطارة إذا كانت زاوية الإستطارة 180° ,

$$E_k = h(f - f') = hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right)$$

$$E_{k_{max}} = (6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3 \times 10^8 \text{ m/s}) \left(\frac{1}{10 \times 10^{-12} \text{ m}} - \frac{1}{14.854 \times 10^{-12} \text{ m}} \right)$$

$$= 6.49 \times 10^{-15} \text{ J}$$

مثال ٤-٥: أسقطت أشعة سينية طولها الموجي $(\lambda = 0.2 \text{ nm})$ على كتلة كربونية، وقد شوهدت الأشعة السينية المستطارة عند الزاوية 30° بالنسبة للحزمة الساقطة. احسب طول موجة الأشعة السينية المستطارة عند هذه الزاوية.

الحل: يُعطى التغير في الطول الموجي للأشعة السينية المستطارة بالمعادلة 4.20،

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \phi) = \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}}{(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})} (1 - \cos 30)$$

$$= 3.25 \times 10^{-13} \text{ m} = 0.325 \text{ pm}$$

ولهذا سيكون الطول الموجي للأشعة السينية المستطارة عند الزاوية 30° :

$$\lambda' = \Delta\lambda + \lambda = 0.325 \text{ pm} + 200 \text{ pm} = 200.325 \text{ pm}$$

4-9: The Pair Production

٤-٩: إنتاج الزوج

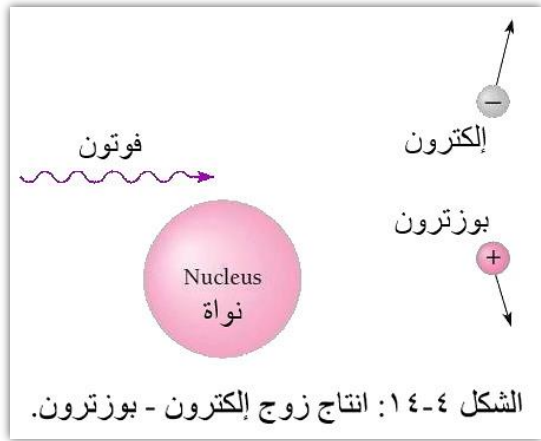
يمكن أن تتحول الطاقة إلى مادة تحت ظروف ملائمة، وتبقى حينئذ مبادئ حفظ الكتلة والطاقة وحفظ الزخم وحفظ الشحنة فعّالة. لذا لا بدّ أن تكون الجسيمات الوليدة (سواء كانت إلكترونات أو بروتونات أو نيوترونات) متكونة من أزواج متكافئة من الجسيمات وأضدادها particle-antiparticle pairs. ووفق هذا إذا أُطلق فوتون طاقته عالية بشكل كافٍ على هدفٍ فقد لا تحدث استطارة للفوتون، وبدلاً من ذلك قد

يختفي تماماً ويُستبدل بجسيمين جديدين: إلكترون وبوزترون^١ بعملية تُدعى إنتاج الزوج، تتحول فيها الطاقة الكهرومغناطيسية للفوتون إلى مادة. ولأجل إنتاج زوج إلكترون - بوزترون يلزم وجود فوتون لا تقل طاقته عن 1.022 MeV لأن قيمة الطاقة السكونية لكل من الإلكترون أو البوزترون هي 0.511 MeV وفق معادلة النظرية النسبية الخاصة ($E_0 = m_0 c^2$):

$$E_{min} = 2m_0 c^2 = 2(9.109 \times 10^{-31} \text{ kg})(2.998 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ = 1.637 \times 10^{-13} \text{ J} = 1.022 \text{ MeV}$$

ويجب أن يكون طول موجة الفوتون أقصر من 1.213 pm :

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{E_{min}} = \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s})(2.998 \times 10^8 \text{ m/s})}{1.637 \times 10^{-13} \text{ J}} \\ = 1.213 \times 10^{-12} \text{ m} = 1.213 \times 10^{-3} \text{ nm} = 1.213 \text{ pm}$$



هذا الطول الموجي قصير جداً، حوالي $\frac{1}{1000}$ من أطوال موجات الأشعة السينية التي استخدمها كومبتن في تجارب الإستطارة. ويجب أن تتواجد بعض الجسيمات الأخرى (نواة الذرة أو إلكترون مثلاً) أثناء التحول (لاحظ الشكل ٤-١٤) كي يتحقق مبدأ حفظ الطاقة والزخم الخطي. وبما أن التفاعل بين الفوتون والجسيم المجاور ليس مباشراً باصطدام بينهما بل هو تفاعل خارجي، فإنه

يتم نقل طاقة قليلة جداً إلى الجسيم المجاور. لذا فالحد الأدنى المطلوب من طاقة الفوتون في الواقع أعلى قليلاً من 1.022 MeV ، لذلك يجب أن يكون الطول الموجي للفوتون أقصر قليلاً من 1.213 pm . والسبب هو أنه عندما يصادف الفوتون الساقط نواة ذرية في الهدف فإن بعض طاقة الفوتون تتحول إلى طاقة حركية للنواة المرتدة. وكما هو الحال بالنسبة للتأثير الكهروضوئي فلا يمكن للنموذج الموجي للإشعاع الكهرومغناطيسي أن يفسر سبب حدوث إنتاج الزوج عند استخدام أطوال موجية قصيرة جداً فقط. يجب أن تحدث عملية إنتاج الزوج بسرعة كبيرة لأن الفوتون الذي يتحرك بسرعة c ينتقل عبر منطقة بحجم الذرة خلال 10^{-19} s تقريباً، (كيف نتج هذا الرقم؟). وسوف لن يحدث خرق لمبادئ الحفظ عندما يتولد الزوج الجسيمي قرب جسيم آخر، حيث:

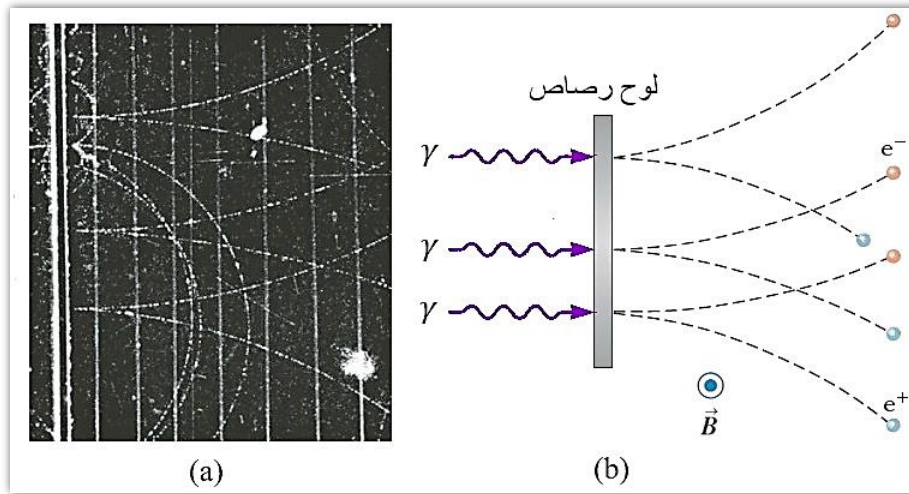
(١) البوزترون هو ضديد الإلكترون، وله نفس كتلته ونفس شحنته ولكنها موجبة. وتتولد البوزترونات بشكل طبيعي بواسطة الأشعة الكونية في الغلاف الجوي العلوي للأرض، وكذلك كنتيجة لتحلل بعض النوى المشعة.

* يتحقق مبدأ حفظ الشحنة، لأن مجموع شحنتي الإلكترون ($-e$) والبوزترون ($+e$) يساوي صفراً مثل شحنة الفوتون،

* ويتحقق مبدأ حفظ الطاقة، لأن الطاقة الكلية النهائية التي تتضمن الطاقين السكونية والحركية لكل من الإلكترون والبوزترون والطاقة القليلة جداً المنتقلة للجسيم المجاور ستساوي طاقة الفوتون،

* ويكون الزخم الخطي محفوظاً بمساعدة الجسيم الآخر كالنواة التي تأخذ ما يكفي من زخم الفوتون كي تحدث العملية.

ولذلك فإن الفوتون لا يمكن أن يتحول إلى إلكترون منفرد أو إلكترونين أو بوزترون منفرد أو بوزترونين لأن هذا يخالف مبدأ حفظ الشحنة الكهربائية. وستصبح الزيادة عن 1.022 MeV في طاقة الفوتون الساقط طاقة حركية للإلكترون والبوزترون. وتسمى الموجات الكهرومغناطيسية التي تمتلك هكذا طاقة عالية "أشعة غاما gamma rays" ويرمز لها بـ γ ، وتتواجد في الطبيعة كإحدى الانبعاثات من النوى النشطة إشعاعياً وفي الأشعة الكونية cosmic rays. (ما هي الأشعة الكونية ولماذا لا توجد ضمن الطيف الكهرومغناطيسي؟).



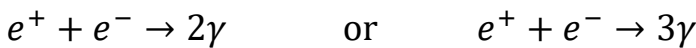
الشكل ٤-١٥: (a) صورة فوتوغرافية لمسارات جرة الفقاعة لأزواج إلكترون - بوزترون نتجت عندما ضربت فوتونات طاقتها 300 MeV لوح رصاص من الجهة اليسرى. (b) مخطط يبين عملية توليد فوتونات غاما لثلاثة أزواج إلكترون - بوزترون.

يوضح الشكل ٤-١٥ حدث إنتاج الزوج داخل غرفة الفقاعة^١. حيث يدخل فوتون غاما الغرفة من الجهة اليسرى في الشكل ويتحول عند نقطة ما بعد ضربه للوح الرصاص إلى إلكترون e^- وبوزترون e^+ . وقد سُلِّطَ مجال مغناطيسي باتجاه خارج الصورة أدّى إلى انحراف البوزترونات والإلكترونات باتجاهين متعاكسين، (لماذا؟). ولأن هذه الجسيمات الجديدة مشحونة ومتحركة فسوف يترك كل منها أثر خط منحني من الفقاعات (وهذا الانحناء هو بسبب تسليط المجال المغناطيسي). ولم يترك شعاع غاما أي أثر لأنه

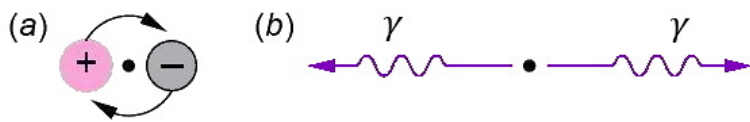
(١) غرفة الفقاعة: هي جهاز يصبح فيه السائل فجأة أكثر سخونة من نقطة الغليان. وإذا مر جسيم مشحون عبره تتكون فقاعات بخار صغيرة على طول مسار الجسيم.

غير مشحون كهربائياً. ومع ذلك يمكن معرفة موضع توليد الفوتون للزوج بالضبط، وهو عند طرف المنحنى ذي الشكل < حيث يبدأ عنده مسار الإلكترون والبوزترون الوليدين.

توجد عملية أخرى تُسمى فناء الزوج pair annihilation، وهي معكوس إنتاج الزوج، حيث يمكن للإلكترون أن يدور لفترة وجيزة مع ضديده (البوزترون) ويقعان معاً تحت تأثير شحنتيهما الكهربائيتين المتعاكستين. وقد يتصادمان وتتلاشى مادة كل من الجسيمين في وقت واحد، وتصبح الكتلة المفقودة طاقة على شكل فوتونين أو ثلاثة فوتونات من أشعة غاما.



وربما يحدث التصادم ثم الفناء بغير هذه الصورة. وإذا كانت سرعة كل من الإلكترون والبوزترون أقل بكثير من سرعة الضوء ($u \ll c$) فإن الطاقة الكلية لكل جسيم ستساوي الطاقة السكونية له تقريباً، أي ($E \approx E_0 = m_0 c^2 = 0.511 \text{ MeV}$). ولهذا فإن الطاقة الكلية للنظام قبل الفناء لا تقل عن ($2m_0 c^2 = 1.022 \text{ MeV}$). وحينئذ ففي حالة تولد فوتونين فقط فإن مبدأ حفظ الطاقة يتطلب أن تكون طاقة كل فوتون 0.511 MeV على الأقل. وإذا كان الزخم الابتدائي لنظام إلكترون - بوزترون يساوي صفرًا كما في الشكل ٤-١٦ فإن الفوتونين الوليدين يتجهان باتجاهين متعاكسين كي يكون الزخم النهائي



الشكل ٤-١٦: (a) بوزترون يدور مع إلكترون حول مركز كتلتهما المشترك المبتن بنقطة بينهما، (b) بعد وقت قصير يقارب 10^{-10} s يفنى الجسيما ويتولد اثنان من الفوتونات ينطلقان باتجاهين متعاكسين.

للعلمية صفرًا أيضاً، وبالتالي سيتحقق مبدأ حفظ الزخم لنظام معزول. ويمكن أن تحدث عملية فناء الزوج في الفراغ بلا حاجة لتواجد نواة أو جسيم آخر.

إن البوزترون قد ينشأ من انحلال بيتا النووي أو من غيره. وهناك احتمالية تقدر بحوالي 2% فقط أن يضرب البوزترون إلكترونًا ويفنيان معاً، ولكن النتيجة الأكثر ترجيحاً هي أن البوزترون سينجذب إلى إلكترون وتشكل منهما ذرة تُسمى بوزترونيوم positronium يدور فيها الإلكترون والبوزترون حول بعضهما.

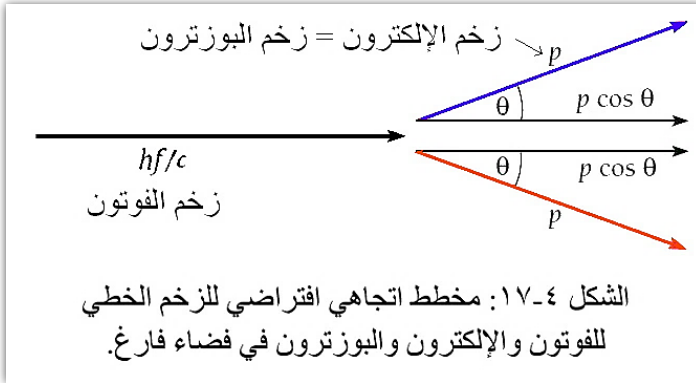
يُستخدم فناء الزوج في تقنية التشخيص الطبي التي تسمى التصوير المقطعي بانبعاث البوزترون positron-emission tomography (PET). حيث يمكن من خلال هذه التقنية تحديد مواقع الأورام

(١) هذا الفرض ليس لازماً للعملية، ولكنه يجعل الحساب التالي أكثر وضوحاً.

السرطانية في الجسم، كما يمكن أن تشير الصور من مسح PET إلى مجموعة متنوعة من الاضطرابات في الدماغ، بما في ذلك مرض الزهايمر Alzheimer's disease.

مثال ٤-٦: بين أن إنتاج الزوج لا يمكن أن يحدث في فضاء فارغ.

الحل: من مبدأ حفظ الطاقة ينتج $(hf = 2Km_0c^2)$ ، حيث hf : طاقة الفوتون، و Km_0c^2 : الطاقة الكلية للإلكترون = الطاقة الكلية للبوزترون. ويوضح الشكل ٤-١٧ المخطط الاتجاهي



للزخم الخطي للفوتون والإلكترون والبوزترون، وتكون الزاويتان θ متساويتين كي يكون الزخم محفوظاً في اتجاه المحور السيني. وحينئذ:

$$hf/c = 2p \cos \theta$$

$$hf = 2pc \cos \theta = 2Km_0uc \cos \theta$$

حيث أن الزخم $(p = Km_0u)$ هو لكل من الإلكترون والبوزترون.

$$hf = 2Km_0c^2(u/c) \cos \theta$$

وبضرب الطرف الأيمن بـ (c/c) ينتج:

$$hf < 2Km_0c^2$$

ولأن $(u/c < 1)$ و $(\cos \theta \leq 1)$ فإنه:

ولكن حفظ الطاقة يتطلب أن يكون $(hf = 2Km_0c^2)$. ولهذا فمن غير الممكن أن يحافظ إنتاج الزوج على كلا مبدئي حفظ الطاقة والزخم ما لم يكن هنالك جسيم آخر في العملية ليحمل جزءاً من زخم الفوتون الابتدائي.

مثال ٤-٧: إلكترون وبوزترون كانا بعيدين عن بعض، ثم تحركا باتجاه بعضهما بنفس السرعة، ثم تصادما رأساً برأس وأفنى أحدهما الآخر ونتاج فوتونان. جد الطاقة والطول الموجي والتردد للفوتونين إذا كانت الطاقة الحركية الابتدائية للإلكترون والبوزترون (أ) مهملة، (ب) 5 MeV لكل منهما.

توضيح: كما هو الحال في التصادمات المرنة يكون الزخم والطاقة محفوظين في عملية فناء الزوج. وبما أن الإلكترون والبوزترون كانا متباعدين في البداية فإن الطاقة الكامنة الكهربائية الابتدائية تساوي صفراً، **(لماذا؟)**، والطاقة الكلية الابتدائية هي مجموع الطاقات الحركية والسكونية للزوج. ويمتلك كل من الإلكترون والبوزترون قبل الاصطدام طاقة $(E = E_k + m_0c^2)$ ، حيث E_k هي طاقته الحركية و $(m_0c^2 = 0.511 \text{ MeV})$ هي طاقته السكونية. والطاقة النهائية هي الطاقة الكلية للفوتونين الناتجين. كما إن الزخم الابتدائي الكلي للزوج يساوي صفراً، **(لماذا؟)**، ولذا يجب أن يكون الزخم الكلي للفوتونين

النتائج صفرًا أيضاً، وهذا يستلزم أن يكون لزوجيهما مقداران متساويان p واتجاهان متعاكسان. ومن العلاقة $(E = pc = hf = hc/\lambda)$ يتبين وجوب أن يكون للفوتونين نفس الطاقة والطول الموجي والتردد.

الحل: (أ) في هذه الحالة تكون الطاقة الحركية للإلكترون والبوزترون مهملة مقارنة بالطاقة السكونية m_0c^2 . ولهذا فإن كل فوتون سيمتلك طاقة $(E = m_0c^2 = 0.511 \text{ MeV})$. وسيكون الطول الموجي والتردد لكل فوتون كما يلي:

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{(0.511 \times 10^6 \text{ eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} = 2.43 \times 10^{-12} \text{ m} = 2.43 \text{ pm}$$

$$f = \frac{E}{h} = \frac{(0.511 \times 10^6 \text{ eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})}{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s})} = 1.23 \times 10^{20} \text{ Hz}$$

$$\text{or } c = f\lambda \rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.43 \times 10^{-12} \text{ m}} = 1.23 \times 10^{20} \text{ Hz}$$

(ب) في هذه الحالة $(E_k = 5 \text{ MeV})$ ، لذا فإن كل فوتون سيمتلك طاقة:

$$E = 5 \text{ MeV} + 0.511 \text{ MeV} = 5.511 \text{ MeV}$$

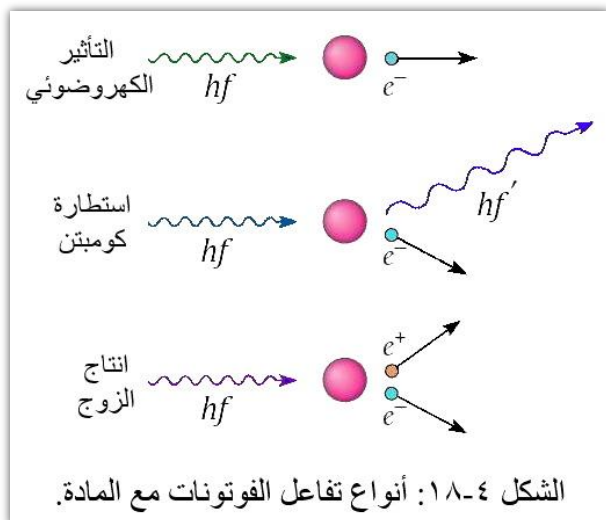
$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{(5.511 \times 10^6 \text{ eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} = 2.25 \times 10^{-13} \text{ m} = 0.225 \text{ pm}$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.25 \times 10^{-13} \text{ m}} = 1.33 \times 10^{21} \text{ Hz}$$

4-10: Photon Absorption

٤-١٠: امتصاص الفوتون

بسبب أن الفوتونات غير مشحونة فهي ليست فعالة كالجسيمات المشحونة في إنتاج التأين أو التهيج في المادة. ومع هذا توجد ثلاثة أنواع رئيسة تتفاعل فيها فوتونات الضوء والأشعة



السينية وأشعة غاما مع المادة كما لُخصت في الشكل ٤-١٨. وفي جميع الحالات يتم نقل طاقة الفوتونات إلى الإلكترونات التي بدورها تفقد طاقة لحساب الذرات الموجودة في المواد الممتصة. وخلال تصادم الفوتون مع الإلكترون يمكن أن يُعطي الفوتون الساقط كل طاقته للإلكترون (الظاهرة الكهروضوئية)، أو بعض طاقته فقط (تأثير كومبتن)، ويمكن أن يتحول

كلياً إلى مادة كما في توليد الزوج. وتمتص المواد ذات العدد الذري الكبير الأشعة السينية أو أشعة غاما أكثر من المواد ذات العدد الذري الصغير.

إن الشدة I لحزمة الأشعة السينية أو أشعة غاما تساوي معدل نقل الطاقة لوحدة مساحة المقطع العرضي للحزمة. وقد وُجد أن السُمك 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 :

$$-\frac{dI}{I} = \mu dx \quad \dots \dots 4.24$$

حيث يدعى ثابت التناسب μ بمعامل الامتصاص الخطي linear absorption coefficient، وتعتمد قيمته على طاقة الفوتونات وعلى طبيعة المادة الماصة للإشعاع. والاشارة السالبة تعني نقصان شدة الإشعاع عند مروره في المادة. وإذا كانت شدة الحزمة الساقطة I_0 على طبقة من المادة سمكها x فيمكن إيجاد شدة الحزمة النافذة بتكامل المعادلة 4.24:

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = - \int_0^x \mu dx \rightarrow \ln I - \ln I_0 = -\mu x \rightarrow \ln \frac{I}{I_0} = -\mu x \quad \dots \dots 4.25$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \dots \dots 4.26$$

ويتبين من هذه المعادلة أن شدة الإشعاع تقل أسياً بزيادة سمك المادة الماصة x ومن المعادلة 4.24 يمكن حساب السُمك الذي يتم عنده امتصاص الإشعاع.

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 ($I_0/I = 2$)، ويرمز له بالرمز $x_{1/2}$. ولهذا نستنتج من المعادلة 4.25 ما يلي:

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

مثال ٤-٨: 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} .

$$x_{1/2} = \frac{0.693}{\mu} = \frac{0.693}{55 \text{ cm}^{-1}} = 0.0126 \text{ cm} = 0.126 \text{ mm} \quad \text{الحل :}$$

وهذا يعني أن الرصاص ماص جيد جداً للأشعة السينية لأنه قلل شدة الأشعة النافذة إلى النصف عند مسافة تقارب عُشر مليمتر فقط.

مثال ٤-٩: إذا كان معامل الامتصاص الخطي في الماء لأشعة غاما ذات طاقة 2 MeV هو 4.9 m^{-1} فجد: (أ) الشدة النسبية لحزمة من هذا الإشعاع بعد قطعها مسافة 10 cm في الماء، (ب) سمك النصف في هذه الحالة، (ج) المسافة التي يجب أن تقطعها هذه الحزمة في الماء قبل أن تقل شدتها إلى 1% من قيمتها الأصلية.

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

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

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

(ب) $x_{1/2} = \frac{0.693}{\mu} = \frac{0.693}{4.9 \text{ m}^{-1}} = 0.141 \text{ m} = 14.1 \text{ cm}$

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

$$x = \frac{\ln(I_0/I)}{\mu} = \frac{\ln 100}{4.9 \text{ m}^{-1}} = 0.94 \text{ m} = 94 \text{ cm}$$

أسئلة

- ١- كيف تكون جميع المواد شفافة بالنسبة للأشعة السينية، ولماذا؟
- ٢- لماذا تكون العناصر الثقيلة كالبلاتين أكثر كفاءة من العناصر الخفيفة كالألومنيوم عند استعمالها في أنبوب الأشعة السينية؟
- ٣- لماذا يُصنع الهدف المستخدم في أنبوب إنتاج الأشعة السينية من مادة ذات درجة انصهار عالية وعدد ذري كبير؟
- ٤- 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. علّل هذا.
- ٥- لماذا كلما زادت سرعة الإلكترونات المسببة لانبعاث الأشعة السينية زادت نفوذية الأشعة السينية المتولدة؟
- ٦- في الجهاز الموضح في الشكل ٤-١، افترض أنك زدت عدد الإلكترونات المنبعثة لكل ثانية من القطب السالب مع الحفاظ على ثبات فرق الجهد V_{acc} . كيف سيؤثر هذا على الشدة I والحد الأدنى من الطول الموجي λ_{min} للأشعة السينية المنبعثة؟ ولماذا؟
- ٧- لماذا لم يتمكن رينتغن من معرفة انعكاس وانكسار الأشعة السينية؟
- ٨- عند الكشف بأشعة الصدر في المستشفى، تمر الأشعة السينية عبر مجموعة من الأضلاع المتوازية في صدر المريض. هل تعمل الأضلاع كمحزز حيود للأشعة السينية؟ ولماذا؟
- ٩- بيّن مع الرسم كيفية إنتاج الأشعة السينية.
- ١٠- لماذا يكون أنبوب إنتاج الأشعة السينية مفرغاً من الهواء؟
- ١١- وفق أي ظاهرة تعمل حجرة التأين؟
- ١٢- لماذا يتناسب تيار التأين طردياً مع شدة الأشعة السينية الساقطة في حجرة التأين؟
- ١٣- كيف ينتج الطيف المستمر للأشعة السينية؟
- ١٤- ما الذي يجعل الطيف الناشئ بسبب الإلكترونات المعجلة مستمراً وليس خطياً؟
- ١٥- لماذا تزداد شدة الطيف المستمر للأشعة السينية عند زيادة فرق الجهد المسلط على الأنبوب؟
- ١٦- ما هي أشعة الكبح $bremsstrahlung$ ؟ وكيف تتولد؟
- ١٧- ناقش وجود λ_{min} في النتائج التجريبية في كل من الشكلين ٤-٣ و ٤-٤.
- ١٨- لماذا يقترب طول الموجة لأعظم شدة باتجاه أطوال الموجات القصيرة عند زيادة فرق الجهد المسلط في أنبوب الأشعة السينية؟
- ١٩- لماذا تُعد ظاهرة إنتاج الأشعة السينية معاكسة للظاهرة الكهروضوئية؟
- ٢٠- كيف ينشأ طيف الأشعة السينية المميز؟
- ٢١- لماذا تكون شدة الخط K_{α} من طيف الأشعة السينية أكبر من شدة الخط K_{β} ؟
- ٢٢- إذا زادت طاقة الإلكترونات التي تضرب الهدف المعدني في أنبوب الأشعة السينية، فهل إن أطوال موجات الأشعة السينية المميزة: (أ) تزداد، (ب) تقل، (ج) تظل ثابتة؟
- ٢٣- هل من الممكن أن يظهر طيف الأشعة السينية المستمر دون وجود للطيف المميز معه؟
- ٢٤- ما هما شرطا التداخل البناء للأشعة السينية الساقطة على بلورة؟ وضّح مع الرسم.

٢٥- ما هو العدد الكمي الأساسي n للحالة الابتدائية لذرة تبعث الخط $M\beta$ في طيف الأشعة السينية؟ أي: من أي قشرة سيهبط الإلكترون إلى المدار M في هذه الحالة؟ وما هو العدد الكمي الأساسي للحالة النهائية لهذا الانتقال؟

٢٦- ما هو الفشل في قانون براگ؟ وما هو تفسيرك لهذا الفشل؟

٢٧- استطار فوتون أشعة سينية بعد سقوطه على إلكترون ثابت. فهل سيكون تردد الفوتون المستطار:

(أ) أدنى من تردد الفوتون الساقط، (ب) أعلى منه، (ج) ثابتاً دون تغيير؟

٢٨- إذا استعملت ضوءاً مرئياً في التجربة المبينة في الشكل ٤-١١ بدل الأشعة السينية، هل ستخضع الفوتونات لإزاحة في الطول الموجي بسبب الإستطارة؟ وإذا كان الأمر كذلك، فهل من الممكن اكتشاف الإزاحة بالعين البشرية؟

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

٣٠- لماذا تمتص المواد ذات العدد الذري الكبير الأشعة السينية أكثر من المواد ذات العدد الذري الصغير؟

٣١- احسب مقدار أكبر تغير في الطول الموجي للفوتون المستطار في ظاهرة كومبتن إذا كان الجسم المستطار هو البروتون.

٣٢- احسب مقدار $\Delta\lambda$ في الشكل ٤-١٣ للقيم الأربعة لزاوية الاستطارة ϕ .

٣٣- هل يمكن أن تكون قيمة λ' في المعادلة 4.20 أصغر من λ ؟ ولماذا؟

٣٤- لو كان الإلكترون القاصف في أنبوب الأشعة السينية ذا طاقة عالية جداً فما هي احتمالية إنتاج أشعة غاما عالية الطاقة؟ ولماذا؟

مسائل محلولة

(١) 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 .

$$E_{k_{max}} = Ve = 10^5 \text{ Ve} = 0.1 \text{ MeV}$$

الحل:

$$E = E_o + E_{k_{max}} \quad \text{الطاقة الكلية = الطاقة السكونية + الطاقة الحركية}$$

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

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

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

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

سؤال ٢: هل يصح استعمال العلاقة التقليدية ($E_k = \frac{1}{2} mu^2$) لحساب سرعة الإلكترون في المسألة "١" ولماذا؟

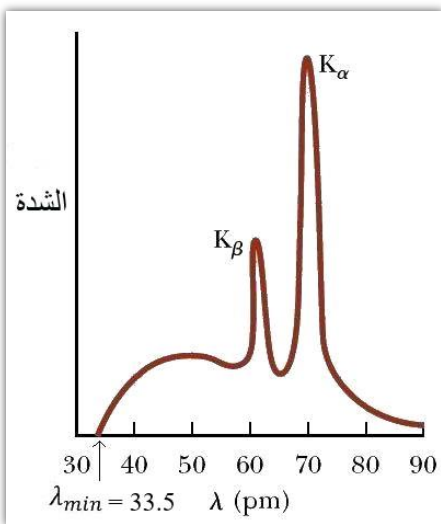
(٢) جد الجهد المعجل اللازم لإنتاج أشعة سينية بأدنى طول موجي 70 pm .

الحل: يتم إنتاج فوتون ذي طاقة عظمى أو طول موجي أدنى عندما يتخلى الإلكترون عن كل طاقته الحركية في تصادم منفرد داخل الهدف. ولذلك:

$$E_{k_{max}} = \frac{hc}{\lambda_{min}} = eV_{acc}$$

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

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



(أ) ما هو فرق الجهد الأدنى V_{acc} الذي يجب أن تتعجل الإلكترونات خلاله كي يمكن إنتاج أشعة سينية ذات طول موجي λ ؟

(ب) كيف يتناسب فرق الجهد المطلوب مع الطول الموجي؟

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

(د) بين ما إذا كانت نتيجتك تتوقع الطول الموجي الأدنى الصحيح λ_{min} في الشكل المجاور الناتج بعد قصف إلكترونات ذات جهد 37 kV لهدف من الموليبدنوم؟

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

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

الحل: (أ) تتجه كل الطاقة الحركية للإلكترون بعد تعجيله خلال جهد V_{acc} إلى إنتاج فوتون واحد.

$$E_k = \frac{hc}{\lambda} = eV_{acc} \rightarrow V_{acc} = \frac{hc}{e\lambda} = \frac{1.24 \times 10^{-6} \text{ eV.m}}{e\lambda} = \frac{1.24 \times 10^{-6} \text{ V.m}}{\lambda}$$

(ب) يتناسب فرق الجهد عكسياً مع الطول الموجي.

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

(د) ($\lambda_{min} = 33.5 \text{ pm}$) كما في الشكل عندما يكون الجهد المعجل 37 kV . واللازم أن تعطي الحسابات الرياضية التالية نفس النتيجة:

$$\lambda_{min} = \frac{1.24 \times 10^{-6} \text{ V.m}}{V} = \frac{1.24 \times 10^{-6} \text{ V.m}}{37000 \text{ V}} = 3.35 \times 10^{-11} \text{ m} = 33.5 \text{ pm}$$

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

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

(٤) (أ) جد طول الموجة التي يحدث لها انعكاس براگ في المرتبة الأولى بزاوية 20° مع مستويات بلورة الكالسايت التي تبلغ الفاصلة بين ذراتها $3.0357 \text{ \AA}$. (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 $0.707 \text{ \AA}$ ؟

الحل: (أ) بتطبيق قانون براگ لـ ($m = 1$):

$$2 \times 3.0357 \text{ \AA} \times \sin 20 = 1 \times \lambda \rightarrow \lambda = 2.076 \text{ \AA}$$

(ب) ($m = 2$):

$$2 \times 3.0357 \text{ \AA} \times \sin \theta = 2 \times 2.076 \text{ \AA} \rightarrow \sin \theta = 0.684 \rightarrow \theta = 43.16^\circ$$

(ج)

$$2 \times 3.0357 \text{ \AA} \times \sin \theta = 1 \times 0.707 \rightarrow \sin \theta = 0.116 \rightarrow \theta = 6.687^\circ$$

(٥) أشعة سينية أحادية الطول الموجي ($\lambda = 0.166 \text{ nm}$) 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 توجه الحزمة كي يظهر الحد الأقصى للمرتبة الثانية؟

الحل: بتطبيق قانون براگ:

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

(٦) 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 للحد الأقصى للتداخل عند هذا الطول الموجي؟

الحل: (أ) بتطبيق قانون براگ لـ ($m = 1$):

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

(ب) للحصول على رقم الرتبة:

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

وبما أن رقم الرتبة يجب أن يكون عدداً صحيحاً فإن أكبر قيمة هي 4، أي يمكن مشاهدة أربع رتب.

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

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

$$\cot \frac{\phi}{2} = (1 + \alpha) \tan \theta \rightarrow \cot 15 = (1 + \alpha) \tan 30 \rightarrow 3.732 = (1 + \alpha) 0.577$$

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

$$\alpha = \frac{hf}{m_0 c^2} = \frac{E}{m_0 c^2} \rightarrow E = \alpha m_0 c^2 = 5.468 (9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}) (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$= 4.478 \times 10^{-13} \text{ J} \left(\frac{1 \text{ eV}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) = 2.799 \times 10^6 \text{ eV} = 2.799 \text{ MeV}$$

(٨) سقطت فوتونات أشعة سينية بطول موجي 0.124 nm في تجربة استطارة كومبتن. (أ) في أي زاوية يكون طول موجة الأشعة السينية المستطارة أطول بـ 1% مما للأشعة الساقطة؟ (ب) في أي زاوية يكون أطول بـ 0.05%؟ (ج) ناقش النتائج. مع العلم أن ($h/m_0 c = 2.426 \times 10^{-12} \text{ m}$).

الحل: (أ) يراد لقيمة ($\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$) في المعادلة 4.20 أن تكون بنسبة 1% من 0.124 nm ، أي ($0.00124 \text{ nm} = 1.24 \times 10^{-12} \text{ m} = 1.24 \text{ pm}$)

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \phi) = (2.426 \times 10^{-12} \text{ m}) (1 - \cos \phi)$$

$$\cos \phi = 1 - \frac{\Delta\lambda}{2.426 \times 10^{-12} \text{ m}} = 1 - \frac{1.24 \times 10^{-12} \text{ m}}{2.426 \times 10^{-12} \text{ m}} = 0.4889$$

$$\phi = 60.7^\circ$$

(ب) هنا تكون $\Delta\lambda$ بنسبة 0.05% من 0.124 nm ، أي $6.2 \times 10^{-14} \text{ m}$:

$$\cos \phi = 1 - \frac{6.2 \times 10^{-14} \text{ m}}{2.426 \times 10^{-12} \text{ m}} = 0.9744 \rightarrow \phi = 13^\circ$$

(ج) تُظهر النتائج أن زوايا الإستطارة الأصغر تعطي فروقات أصغر في الطول الموجي. لذا فإنه في حالة التصادم الخفيف المشابه للخدش يكون فقدان طاقة الفوتون وطاقة الارتداد للإلكترون أصغر مما لو كانت زاوية الاستطارة أكبر. وهذا هو المتوقع من تصادم مرّن، سواء في العالم المجهرى كما بين الفوتون والإلكترون أو في العالم الجهرى مثلما بين كرات البليارد.

(٩) احسب التغير في الطول الموجي الناتج في تجربة كومبتن بسبب استطارة شعاع K_α صادر من هدف موليبدنوم، والذي يحدث عند الطول الموجي $0.707 \text{ \AA}$. وكانت زاوية استطارة الشعاع 90° بعد وقوعه على: (أ) إلكترون، (ب) ذرة كربون. ثم احسب طول موجة الشعاع المستطار في كلا الحالتين، وناقش النتيجة.

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

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \phi) = \frac{h}{m_0 c} (1 - 0) = \frac{h}{m_0 c}$$

(أ) للإلكترون:

$$\Delta\lambda = \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}}{(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})} = 2.42 \times 10^{-12} \text{ m} = 0.024 \text{ \AA}$$

* وسيكون الطول الموجي للشعاع المستطار في هذه الزاوية:

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

(ب) لذرة الكربون:

$$\Delta\lambda = \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}}{(12 \times 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})} = 1.1 \times 10^{-16} \text{ m} = 1.1 \times 10^{-6} \text{ \AA}$$

* وسيكون الطول الموجي للشعاع المستطار في هذه الزاوية:

$$\lambda' = \Delta\lambda + \lambda = 1.1 \times 10^{-6} \text{ \AA} + 0.707 \text{ \AA} \approx 0.707 \text{ \AA}$$

ويلاحظ 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 حسب ما تعطيه قيمة المقدار $(h/m_0 c)$.

(١٠) 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) الطاقة الحركية للإلكترون المرتد.

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \phi) \quad (\text{أ}) \quad \text{الحل:}$$

$$= \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}}{(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})} (1 - \cos 37) = 4.89 \times 10^{-13} \text{ m} = 0.489 \text{ pm}$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})(1 \text{ eV}/1.6 \times 10^{-19} \text{ J})}{300 \times 10^3 \text{ eV}} \quad (\text{ب})$$

$$= \frac{1.24 \times 10^{-6} \text{ eV.m}}{300 \times 10^3 \text{ eV}} = 4.14 \text{ pm}$$

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = 4.14 \text{ pm} + 0.489 \text{ pm} = 4.629 \text{ pm}$$

طاقة الفوتون المستطار:

$$E' = hf' = \frac{hc}{\lambda'} = \frac{1.24 \times 10^{-6} \text{ eV.m}}{4.629 \times 10^{-12} \text{ m}} = 2.68 \times 10^5 \text{ eV} = 268 \text{ keV}$$

(ج) طاقة الإلكترون المستطار الحركية:

$$E_e = E - E' = 300 \text{ keV} - 268 \text{ keV} = 32 \text{ keV}$$

(١١) بروتون وضديده كانا في وضع سكون ثم قنّيا وفق التفاعل $(pp^- \rightarrow \gamma\gamma)$. جد طاقة وطول موجة الفوتونين الناتجين.

الحل: بما أن البروتون وضديده كانا في حالة سكون فإن حفظ الزخم يتطلب أن يكون للفوتونين الناتجين زخمان متساويان ومتعاكسان كي تكون محصلة الزخم صفراً، وبالتالي سيكون لهما طاقتان متساويتان. وبما أن الطاقة

الكلية على الجانب الأيسر من صيغة التفاعل هي $2m_p c^2$ ، فإن طاقة كل فوتون ستكون مساوية لطاقة البروتون السكونية:

$$E_\gamma = m_p c^2 = 938 \text{ MeV}$$

وسيكون طول موجة كل فوتون:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{hf} = \frac{hc}{E_\gamma}$$

$$= \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{(938 \times 10^6 \text{ eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} = 1.32 \times 10^{-15} \text{ m} = 1.32 \text{ fm}$$

(١٢) إذا كان معامل الامتصاص الخطي للألمنيوم 0.693 cm^{-1} وللنحاس 13.9 cm^{-1} للخط K_α من طيف الأشعة السينية للتنگستن فاحسب: (أ) النسبة المئوية لشدة هذا الشعاع عند مروره خلال صفيحة سمكها 5 mm من الألمنيوم وأخرى بنفس السمك من النحاس، (ب) سمك الألمنيوم المكافئ لامتصاص 5 mm من النحاس لشعاع بهذا الطول الموجي.

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

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

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

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

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

$$(-13.9 \text{ cm}^{-1})(0.5 \text{ cm}) = -0.693 \text{ cm}^{-1} x \rightarrow x = 10.02 \text{ cm}$$

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

الحل: يُعطى معامل الامتصاص الكتلي بالعلاقة $(\mu_m = \mu/\rho)$

$$5 \text{ cm}^2/\text{gm} = \frac{\mu}{2.7 \text{ gm/cm}^3} \quad \text{لألمنيوم :}$$

$$\mu = 13.5 \text{ cm}^{-1}$$

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

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

$$50 \text{ cm}^2/\text{gm} = \frac{\mu}{8.93 \text{ gm/cm}^3} \quad \text{لنحاس :}$$

$$\mu = 446.5 \text{ cm}^{-1}, \quad x = \frac{1.386}{446.5 \text{ cm}^{-1}} = 0.0031 \text{ cm}$$

فهرست الفصل الرابع

الصفحة	الموضوع
١	١-٤ : اكتشاف الأشعة السينية
٢	٢-٤ : إنتاج الأشعة السينية
٣	٣-٤ : قياس شدة الأشعة السينية
٤	٤-٤ : أطيف الأشعة السينية
٤	١-٤-٤ : طيف الأشعة السينية المستمر
٨	٢-٤-٤ : طيف الأشعة السينية المميز
٩	٥-٤ : تطبيقات الأشعة السينية
١٠	٦-٤ : طبيعة وحيود الأشعة السينية
١٢	٧-٤ : انكسار الأشعة السينية
١٤	٨-٤ : تأثير كومبتن
١٩	٩-٤ : إنتاج الزوج
٢٤	١٠-٤ : امتصاص الفوتون
٢٧	أسئلة
٢٩	مسائل محلولة

مصادر الفصل الرابع

- ١- الفيزياء الذرية، د. طالب ناهي الخفاجي و د. عباس حمادي و د. هرمز موشي، 1980.
- ٢- مفاهيم في الفيزياء الحديثة، آرثر بايزر، ترجمة الطبعة الثانية.
- ٣- أساسيات الفيزياء، ف. بوش، ترجمة طبعة سنة 1977.
- 4- Atomic and Laser Physics, A.M. FOX, 2015.
- 5- Concepts of Modern Physics, Arthur Beiser, 6th ed. 2003.
- 6- Fundamentals of physics- Halliday, Resnick, Walker—10th ed. 2014.
- 7- Introduction to Atomic and Nuclear Physics, Semat and Albright, 5th ed. 1972.
- 8- Modern Physics for Scientists and Engineers, 4th ed, Thornton & Rex, 2013
- 9- Modern Physics, A. Serway, J. Moses and A. Moyer, 3rd ed. 2005.
- 10- Modern Physics, Paul A. Tipler and Ralph A. Llewellyn, 6th Edition, 2012.
- 11- Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, Serway and Jewett, 10th ed. 2019.
- 12- University Physics with modern physics, Young & Freedman , 15th ed. 2020.