الأشعة السينية

الدكتور نبيل درغام

الأشعة السينية

X-rays

1- مدخل introduction

2- توليد الأشعة السينية Production of X-rays

3- إصدار الأشعة السينية Emission of X-rays

4- الطيف المستمر Continuous spectrum

5- قانون دوان وهانت Duane and hunt's law

6- الطاقة المشعة والاستطاعة المشعة لأنبوبة الأشعة السينية Radiant energy and radiant power for X-rays tube

7- مردود (عائدية) أنبوبة الأشعة السينية returns of X-rays tube

8- الطيف المميز أو طيف الخطوط Characteristic spectrum (lines spectrum)

9- تسمية الخطوط المميزة Naming of the characteristic lines

10- خواص الأشعة السينية Properties of X-rays

11- التأثير المتبادل للأشعة السينية (أو أشعة غاما) مع الأوساط المادية Interaction for gamma rays (or X-rays) photons with the material medium

11-1- المفعول الكهرضوئي Photoelectric effect

11-2- مفعول كومبتون Compton effect

11-3- مفعول إنتاج الأزواج Pair production effect

12- قوانين التوهين الأشعة السينية (أو أشعة غاما) في الأوساط المادية The laws of X-rays and gamma rays attenuation

12-1- التوهين في الهواء (الغازات)

12-2- التوهين في وسط مادي (صلب أو سائل)

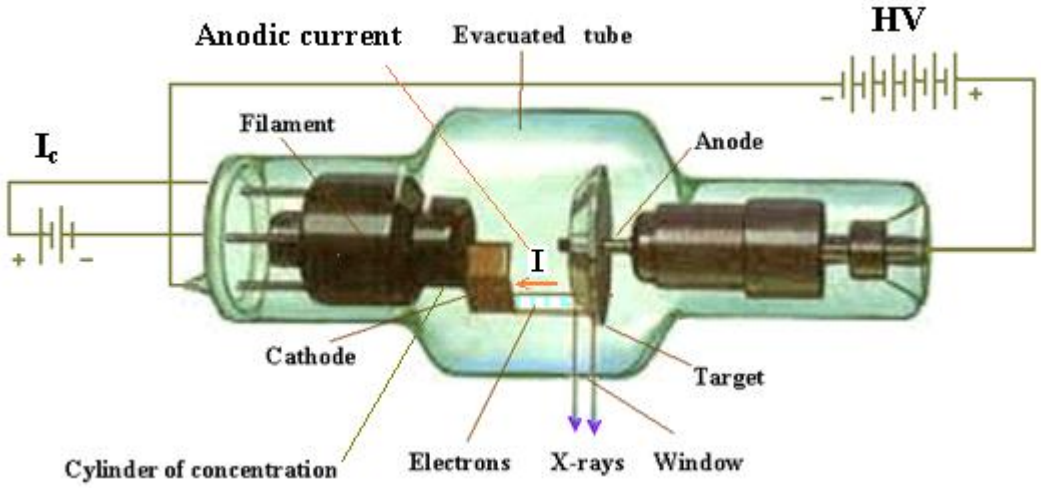
12-3- سماكة النصف half-thickness

1- مدخل introduction

اكتشفت الأشعة السينية عام 1895 على يد العالم روتنجن حيث وجد أنه تنبعث من الأنبوبة المولدة للأشعة المهبطية أشعة غير معروفة تخترق الزجاج وكذلك العديد من الأجسام غير الشفافة بالنسبة للضوء العادي. وتم تفسير خواص وطبيعة هذه الأشعة عام 1932 من قبل العلماء بيس، هيتلر وسوتي.

2- توليد الأشعة السينية Production of X-rays

يجري توليد الأشعة السينية في أنبوبة تعرف بأنبوبة كوليدج، وهي أنبوبة زجاجية مخلاة من الهواء إلى ضغوط منخفضة جداً $(10^{-3} - 10^{-4} mmHg)$ فيها قطبين كهربائيين يشكلان مهبطاً ومصعداً، انظر الشكل (١).



الشكل (١)

يتكون المهبط من مادة غنية بالإلكترونات ويدعى أيضاً فتيل التسخين الذي يصدر حزمة من الإلكترونات، يُصنّع الفتيل عادةً من مادة التنغستين على شكل لولب، وذلك لأن التنغستين ذو عدد ذري كبير (Z=74) ودرجة انصهار كبيرة (3370°C). يحاط فتيل التسخين باسطوانة مشحونة سلباً تدعى باسطوانة التركيز أو التمحرق، وذلك من أجل تجنب تباعد حزمة الإلكترونات. أما المصعد فهو عبارة عن صفيحة معدنية تصنع في أغلب الأحيان أيضاً من مادة التنغستين. تنتج الحزمة الإلكترونية عن طريق تسخين الفتيل وذلك بإمرار تيار تسخين شدته $\mathbf{I_c}$ تبلغ قيمتها بضع أمبيرات (المفعول الكهرحراري). بعد ذلك تسرع الحزمة الإلكترونية الصادرة عن الفتيل باتجاه المصعد تحت تأثير الحقل الكهربائي المتولد عن تطبيق الجهد العالي **HV** بين المصعد والمهبط، الذي يمكن أن يصل في بعض الأنابيب حتى **200KV**، وبنتيجة ذلك تصطدم حزمة الإلكترونات المسرعة بالمصعد، الذي يكون موضوع بشكل مائل بالنسبة لمسار الحزمة الالكترونية، مما يؤدي إلى اختراقه وحدوث جملة من التأثيرات المتبادلة بين الإلكترونات و ذرات مادة المصعد، وهذا يؤدي في نهاية المطاف إلى إصدار الأشعة السينية من منطقة محددة بالمصعد (وتدعى أيضاً بالمحرق أو البؤرة) عبر مسامت مخصص

لخروج الحزمة يدعى النافذة. يقابل تحرك حزمة الإلكترونات من المهبط باتجاه المصعد تيار عكسي من الأيونات الموجبة يدعى **بالتيار المصعدي** شدة **I** من رتبة الميلي أمبيري. يرتبط التيار المصعدي **بالجهد العالي المطبق V** وبدرجة حرارة الفتيل T وذلك قبل الوصول إلى درجة حرارة محددة مميزة لعتبة **تيار الإشباع I_s** (التيار الذي يصدر عنده أكبر كمية من الإلكترونات). تعطى شدة التيار المصعدي بحسب لانغموير بعلاقة من الشكل التالي:

$$I = k \times V^{3/2}$$

أما تيار الإشباع فيعطى بحسب ريتشاردسون بعلاقة من الشكل التالي:

$$I_s = \acute{k} \times A \times T^2 \times e^{-b/T}$$

حيث A تمثل مساحة الفتيل، T تمثل درجة حرارة تسخين الفتيل، $\acute{k}$ ، k و b عبارة عن ثوابت.

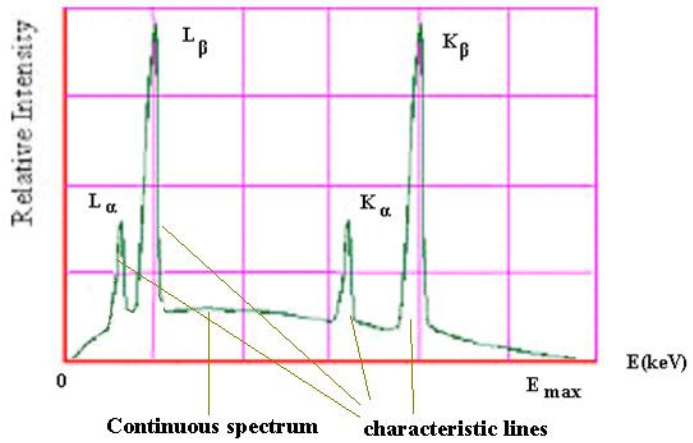
ملاحظات Remarks

1- يصمم فتيل التسخين بشكلٍ لولبي بهدف جعل مقاومته أكبر لكي يكون الارتفاع في درجة حرارته أكبر.

2- يرتبط عرض حزمة الأشعة بعرض المحرق، فإذا كان المحرق كبيراً (منطقة عريضة)، فإننا نحصل على معدل كبير من الأشعة السينية، أما إذا كان المحرق صغيراً (منطقة ضيقة) فنحصل على معدل صغير للأشعة السينية. إضافة لذلك يرتبط عرض المحرق بميل المصعد، حيث يكون صغيراً بقدر ما يكون الميل صغيراً.

3- إصدار الأشعة السينية Emission of X-rays

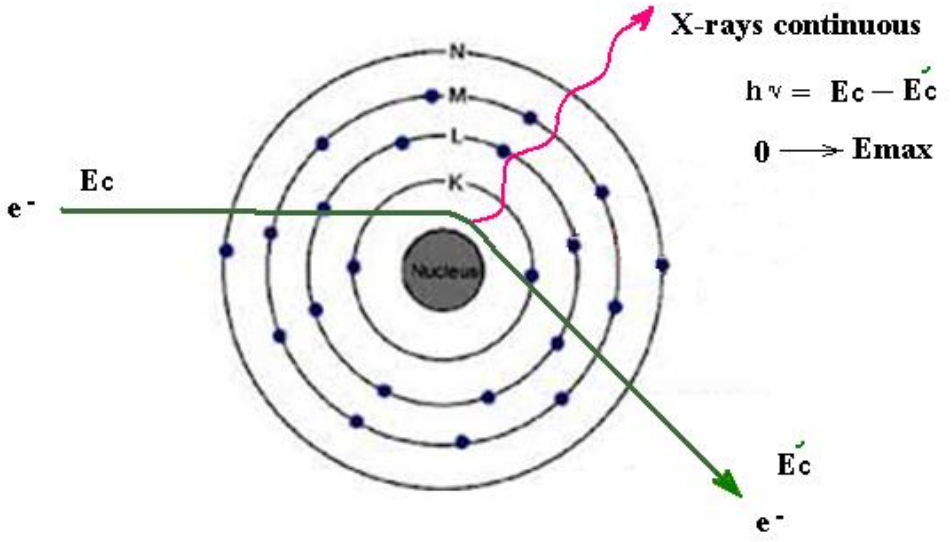
يعزى طيف إصدار الأشعة السينية المتولد في أنبوبة كوليدج إلى وجود حالتين هما: التأين أو التهيج (الإثارة) وينتج عنه طيف مميز characteristic يدعى بطيف الخطوط، وطيف الكبح الذي هو طيف مستمر يدعى. من ذلك نستنتج بأن طيف إصدار الأشعة السينية الناتج هو عبارة عن مجموع طيفين: طيف مستمر يدعى بطيف الكبح وطيف متقطع discontinuous يدعى بالطيف المميز (أو الخطوط) (انظر الشكل -2).



الشكل (٢):

4- الطيف المستمر Continuous spectrum:

بفرض أن أحد الإلكترونات الصادرة عن فتيل التسخين يمتلك طاقة حركية قدرها E_c تمكنه من الوصول إلى جوار النواة، عندئذٍ سوف ينجذب هذا الإلكترون إلى النواة تحت تأثير القوة الكولونية التجاذبية، إلا أنه عندما يقترب بشكل كافٍ من النواة سوف ينحرف عن مساره فاقداً جزءاً من طاقته الحركية لأن القوى النووية تعيق حركته فهي التي تعمل على فرملته. لتكن طاقته بعد الفرملة $\acute{E_c}$ (انظر الشكل – 3).

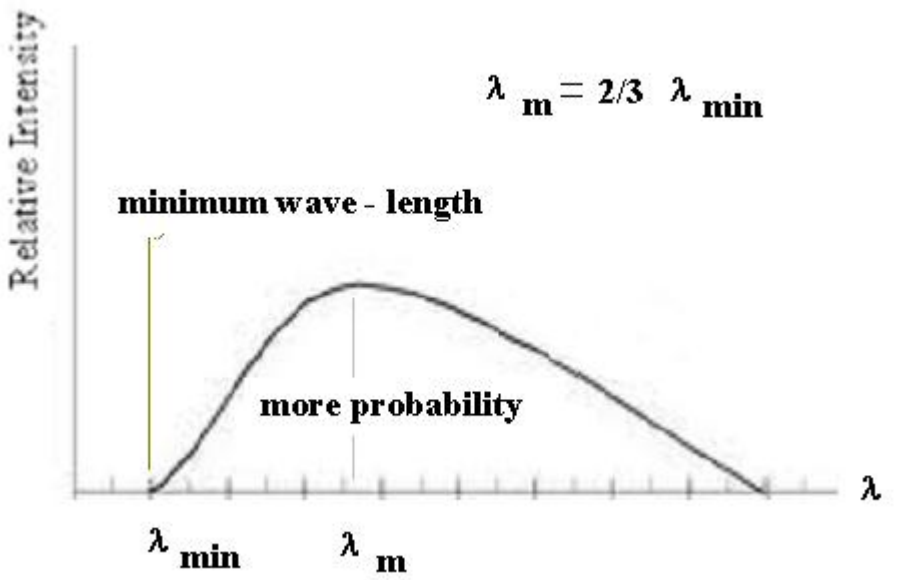


الشكل (٣)

في هذه الحالة تصدر الطاقة الحركية التي يتخلى عنها الإلكترون أثناء مساره وبشكل مستمر على شكل أشعة سينية طاقتها $h\nu = E_c - \acute{E_c}$ وهي تمثل طاقة الإعاقة (الفرملة). باعتبار أن المسافات الفاصلة بين النواة ومسار الإلكترون المار بجوارها كلها ممكنة، فإن طاقة الأشعة السينية الصادرة تكون غير مكممة وتأخذ قيمتها من الصفر 0 وحتى قيمة عظمى $E_{\max}$ وذلك عندما يتخلى الالكترون عن كامل طاقته الحركية لتصدر على شكل فوتون سيني، يدعى الطيف الصادر بهذه الطريقة بالطيف المستمر أو بشعاع الإعاقة.

5- قانون دوان وهانت Duane and hunt's law:

بفرض أن كامل الطاقة الحركية للإلكترون قد تحولت إلى إشعاع سيني مستمر (انظر الشكل-4).



الشكل (٤)

للشعاع السيني الصادر عن الأنبوبة $\lambda_{\min}$في هذه الحالة يمكننا أن نحدد الطول الموجي الأصغري بالصيغة الرياضية التالية:

$$\lambda_{\min} = \frac{h \times c}{e \times V}$$

حيث hتمثل شحنة الإلكترون.e تمثل سرعة الضوء في الخلاء و c يمثل ثابت بلانك،

بالتعويض عن هذه الثوابت نجد أن:

$$\lambda_{\min}(A°) = \frac{6.62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{1.6 \times 10^{-19} \times V(KV)} = \frac{12.4}{V(KV)}$$

تدعى هذه العلاقة بقانون **دوان وهانت**.

<u>ملاحظات *Remarks*</u>:

1- يعتبر طيف الإصدار السيني المستمر مستقل عن طبيعة مادة المصعد (الهدف)، ولا يرتبط سوى بالجهد المسرع، ويستفاد منه في المجال الطبي بالتصوير والمعالجة الإشعاعية.

2- تدعى الأشعة السينية الناتجة عن الإعاقة (الفرملة) بالأشعة المستمرة (البيضاء)، أو أشعة برامستراهلنغ.

3- يعتمد الشعاع السيني المستمر على الشحنة النووية أي على Z، بحيث يكون أكبر في العناصر الثقيلة (كالرصاص والتنغستين) من العناصر الخفيفة (كالنحاس والألمنيوم).

4- يكون شعاع الإعاقة معامد لاتجاه الالكترونات من أجل الطاقات الضعيفة، ويكون موازٍ من أجل الطاقات المرتفعة.

5- من أجل جهد مُسرع محدد فإن الطول الموجي الأكثر احتمالاً للتدفق الصادر هو λ_{m} ويدعى بالطول الموجي الحامل للعدد الأكبر من الفوتونات في وحدة الزمن. يتم الحصول عليه تجريبياً بالعلاقة التالية: $\lambda_m = \frac{2}{3}\lambda_{\min}$

6- تدعى الأشعة السينية ذات الطول الموجي القصير وقدرة الاختراق الكبيرة بالأشعة السينية القاسية، وهي تصدر عن الذرات الثقيلة، أما الأشعة السينية ذات الطول الموجي الكبير وقدرة الاختراق غير الكبيرة فتدعى بالأشعة السينية اللينة. يتم التحكم بقساوة أو ليونة الأشعة السينية بتغيير قيمة الجهد المُسرع V. وكلما كانت الأشعة السينية أكثر قساوة كلما كان امتصاصها أضعف وكانت نفوذيتها أكبر من خلال الأوساط التي تجتازها.

6- <u>الطاقة المشعة والاستطاعة المشعة لأنبوبة الأشعة السينية:</u>

<u>Radiant energy and radiant power for X-rays tube:</u>

تتناسب **الطاقة** المُشعة بالجول طرداً مع: زمن التشغيل t، العدد الذري Z لمادة المصعد، مربع الجهد المُسرع V وعدد الالكترونات الصادرة بواحدة الزمن I (يسمى أيضاً بشدة التيار المصعدي)، وذلك على فرض إهمال التوهيين الذي يسببه زجاج الأنبوبة المولدة للأشعة السينية وإهمال الامتصاص الذاتي للأشعة السينية الصادرة من قبل المصعد، ويعبر عن ذلك بالصيغة الرياضية التالية:

$$R(J) = k \times I \times Z \times V^2 \times t$$

وبالتالي فإن **الاستطاعة** المشعة بالواط تعطى بالعلاقة:

$$R(watts) = \frac{dR}{dt} = k \times I \times Z \times V^2$$

حيث k يمثل ثابت مميز للأنبوبة ويرتبط بجمل الوحدات المستخدمة.

7- <u>مردود (عائدية) أنبوبة الأشعة السينية returns of X-rays tube:</u>

المردود بالتعريف هو عبارة عن **حاصل قسمة الطاقة المشعة R إلى الطاقة المستهلكة E** ضمن أنبوبة الأشعة السينية أو المسرعات الخطية (في حالة المعالجة الإشعاعية). أو هو عبارة عن حاصل قسمة **الاستطاعة المشعة $\dot{R}$ إلى الاستطاعة الكهربائية المستهلكة P** ضمن أنبوبة الأشعة السينية أو المسرعات الخطية. يرمز للمردود بالرمز r ويحدد وفق العلاقة التالية:

$$r = \frac{R}{E} = \frac{\dot{R}}{P} = \frac{k \times I \times Z \times V^2}{V \times I} = k \times Z \times V$$

يعتبر مردود الأشعة السينية المتولدة بواسطة أنابيب كوليدج ضعيف جداً ولا يتجاوز في أفضل الأحوال نسبة **2%** وهذا يؤدي إلى تحرير كمية كبيرة من الحرارة من الممكن أن تسبب خلل في أداء الجهاز وتسبب أيضاً تلف مادة المصعد. ومن أجل تلافي ذلك يستخدم مصعد دوار.

8- <u>الطيف المميز أو طيف الخطوط (Characteristic spectrum (lines spectrum:</u>

عندما يصبح الجهد العالي المطبق كافياً نلاحظ ظهور خطوط تتوضع (تتراكب) على الطيف المستمر، وهذه الخطوط تكون مميزة لذرات مادة المصعد (انظر الشكل -2). يمكن تفسير ذلك كما يلي: عندما

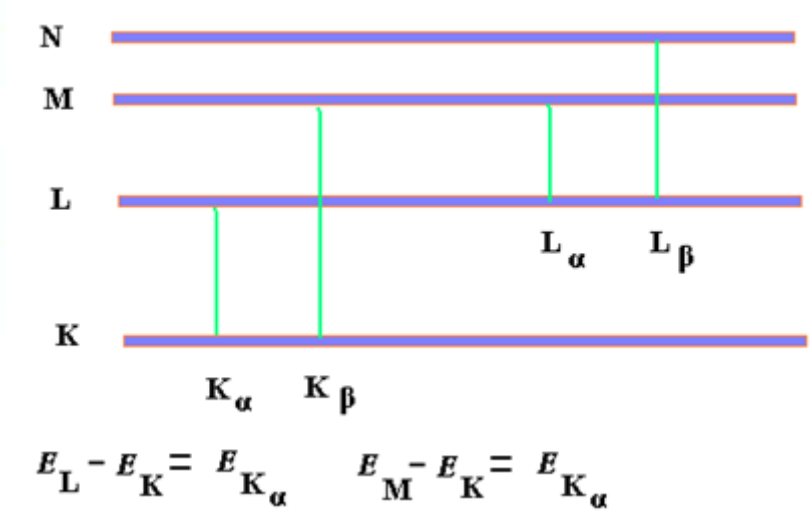
تصل الالكترونات المُسرعة إلى ذرات المصعد فإنها تعمل على اقتلاع إلكترون أو أكثر من الطبقات الداخلية للذرة وذلك تبعاً لطاقتها الحركية المكتسبة. بعد ذلك تصبح الذرة مثارة (حالة غير مستقرة) وكي تعود إلى استقرارها السابق يحصل إعادة ترتيب إلكتروني، وذلك بملء الفراغ بإلكترون يهبط من الطبقات الأعلى أو بواسطة إلكترون حر. إن الاختلاف في طاقة الرابطة لهذا الأخير يظهر على شكل شعاع (خط) سيني مميز أحادي الطاقة ذات تردد ν تعطى بالعلاقة التالية:

$$\Delta E = -b_0 \times Z^2 \times \left(\frac{1}{n_f} - \frac{1}{n_i}\right) = h \times \nu$$

9- تسمية الخطوط المميزة *Naming of the characteristic lines*:

اتفق على تسمية الخطوط المميزة بنفس الحروف اللاتينية العائدة للمستويات الذرية الرئيسية التي يسقط عليها الإلكترون الشاغل للفراغ، أما منشأ هذه الإلكترون (أي الطبقة التي أتي منها) فيستدل عليه بإحدى الحروف اليونانية $\alpha, \beta, \gamma, \ldots$ وتكتب على شكل دليل يستدل من خلاله على أن الإلكترون المالئ للفراغ قد أتى من الطبقة الأعلى مباشرة أو من الطبقات التالية (انظر الشكل -5). لنفرض مثلاً أن إلكترون أتى من الطبقة L ليملئ الفراغ الالكتروني المُحدث في الطبقة K فسوف يفقد نتيجة لذلك تظهر على شكل شعاع (خط) سيني مميز K_α ذات طاقة قدرها E_{K_α} حيث:

$$E_{\mathrm{K}_\alpha} = \mathrm{h}\nu = \mathrm{E_L} - \mathrm{E_K}$$



الشكل (٥)

ملاحظات *Remark*:

1- تستخدم الأشعة السينية المميزة في الغالب في المجال العلمي في علم البلورات *crystallography*.

2- من الممكن للفوتون السيني الصادر عن ذرة الهدف أن يقتلع إلكترون محيطي تابع لنفس الذرة يطلق عليه اسم إلكترون أوجيه *Auger's electron*. لنفرض على سبيل المثال أن إلكترون أوغر اقتلع من الطبقة الرئيسية M بواسطة فوتون K_α في هذه الحالة يملك هذا الإلكترون طاقة حركية مساوية إلى:

$$E_{e_{Auger}} = h\nu_{K_\alpha} - E_M$$

إذاً يؤدي ذلك إلى إصدار إلكترون أحادي الطاقة وذلك على عكس إصدارات β^+ و β^-.

3- من أجل المواد الخفيفة (أعدادها الذرية صغيرة)، يكون هناك تنافس ما بين الإصدار الذري وإصدار إلكترون أوجيه. أما من أجل المواد التي تميز بعدد ذري أكبر من *70* فإن أثر أوجيه يكون مهملاً.

4- لا يشاهد طيف الخطوط المميز عند جهد أصغري، ولكن تبدأ هذه الخطوط بالظهور عند جهود تسريع أعلى، وبالتالي فإن أول خط طيفي يظهر بنتيجة زيادة جهد التسريع يقابل حالة التأين للطبقة السطحية لذرات المصعد.

10- خواص الأشعة السينية *Properties of X-rays*:

1- ذات طبيعة كهرطيسية.

2- طاقتها محصورة بين $10^2 - 10^5 \text{eV}$ وأطوالها الموجية محصورة بين $10^{-9}\text{m} - 10^{-12}$.

3- تنتشر في الفراغ بسرعة الضوء وفق خطوط مستقيمة وفي سائر المناحي.

4- لا تنحرف تحت تأثير الحقلين الكهربائي والمغناطيسي.

5- تؤدي إلى تأين الغازات التي تعبرها، ويستفاد من ذلك في قياس كمية الأشعة السينية باستخدام حجرة التأين.

6- تؤدي إلى فلورة بعض ألأملاح المعدنية ويستفاد منها في الدريئات المستخدمة في التنظير الإشعاعي والدريئات الداعمة التي تكون على تماس مع أفلام التصوير الإشعاعي.

7- قادرة على اختراق جسم الإنسان ويكون ذلك أسهل بقدر ما تكون نفوذيتها أكبر.

8- تتوهين ذاتياً بشكل طردي مع مقلوب مربع بعدها عن المنبع.

9- تتوهين لدى اختراقها للمادة، ويزداد توهينها بقدر ما تكون كل من ثخانة المادة وكثافتها كبيرة.

10- تحدث تفاعلات كيميائية وحيوية ضمن الأنسجة الحية مما يؤدي إلى تأين وانحراف الاستقلاب الخلوي.

11- تتسبب في اسوداد مستحلبات التصوير الضوئي.

11- الاستخدام الطبي للأشعة السينية (أو أشعة غاما) في التصوير الشعاعي:

Mutual effect for gamma rays and X-rays photons with the material medium:

يقوم الاستخدام الطبي لكل من الأشعة السينية وأشعة غاما في التصوير الإشعاعي على التأثيرات المتبادلة بين فوتونات الأشعة السينية أو الغاماوية مع الوسط المادي الذي تجتازه وكذلك فيلم التصوير الإشعاعي، إذ تسيطر ثلاثة أنواع رئيسية من التأثيرات المتبادلة وهي:

11-1- المفعول (الأثر) الكهرضوئي *Photoelectric effect*:

يحدث المفعول الكهرضوئي عند الطاقات المنخفضة، وغالباً ما يكون مع الإلكترون الأكثر ارتباطاً بالذرة (الكتروني الطبقة K أو الكترونات الطبقة الأعلى من ذلك). بموجب هذا المفعول يفقد الفوتون السيني (أو الغاماوي) كامل طاقته نتيجة للتصادم المباشر مع أحد الالكترونات المرتبطة بذرة من ذرات الوسط المادي الذي يجتازه، ليفنى بنتيجة ذلك الفوتون الساقط، وليطلق الإلكترون المصدوم ليحمل اسم الإلكترون الضوئي. تتصف احتمالية التأثير المتبادل بواسطة المفعول الكهرضوئي بمعامل توهين كتلي $(\mu_m)_{Phel}$. لقد تمكن كلاً من العالمان براغ وبيرس من وضع قانون يربط معامل التوهين الكتلي $(\mu_m)_{Phel}$ بطاقة أو طول الموجة للإشعاع الوارد، وبطبيعة الوسط المادي، بالشكل التالي:

$$(\mu_m)_{Phel} = k \times \frac{Z^3}{E^3}$$
$$= \acute{k} \times Z^3 \times \lambda^3$$

حيث

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

11-2- <u>مفعول كومبتون Compton effect:</u>

يحدث مفعول كومبتون عند الطاقات العالية، وغالباً ما يحدث مع الإلكترونات الأقل ارتباطاً بالذرة (الكترونات الطبقات الخارجية) أو الإلكترونات الحرة. ويتلخص هذا المفعول في أنه عندما يسقط الفوتون ذات الطاقة العالية على إلكترون حر يكتسب هذا الإلكترون جزء من طاقة الفوتون فينطلق بسرعة مبتعداً بينما يفقد الفوتون هذا الجزء من الطاقة ويحدث نتيجة لذلك تشتت لكل من الإلكترون والفوتون الوارد. تتصف احتمالية التأثير المتبادل بواسطة مفعول كومبتون بمعامل توهين كتلي $(\mu_m)_C$.

11-3- <u>مفعول إنتاج الأزواج Pair production effect:</u>

يحدث مفعول إنتاج الأزواج إذا تجاوزت طاقة الفوتون الوارد ضعف طاقة الإلكترون في حالة السكون (أي أكبر من 1.02MeV)، وفي حال اجتاز هذا الفوتون المجال القريب من نواة الذرة فإن ذلك يؤدي إلى فناء الفوتون في المجال الكهربائي الشديد لنواة الذرة مع إنتاج زوج من الجسيمات المشحونة وهي عبارة عن "إلكترون وبوزيترون" يساوي مجموع طاقتيهما في حالة السكون 1.02MeV. وتعتبر هذه الطاقة أصغر طاقة يجب أن يمتلكها الفوتون لإنتاج هذا الزوج من الجسيمات. أما إذا كانت طاقة الفوتون أكبر من ذلك، فإن الطاقة الزائدة يكتسبها كلاً من الجسيمين على شكل طاقة حركية تمكنهما من الانتقال باتجاهين متعاكسين. تتصف احتمالية التأثير المتبادل بواسطة مفعول إنتاج الأزواج بمعامل توهين كتلي $(\mu_m)_P$.

<u>ملاحظات Remarks:</u>

1- يلعب المفعول الكهرضوئي دوراً أكثر أهمية في المواد الثقيلة منها في المواد الخفيفة.

2- من أجل الطاقات العالية يكون مفعول كومبتون هو المسيطر، أما من أجل الطاقات المنخفضة فيعتبر المفعول الكهرضوئي هو المسيطر.

3- لا يأخذ مفعول كومبتون بالاعتبار العدد الذري للأوساط المادية الماصة ولكن فقط كثافتها الالكترونية.

4- تجدر الإشارة أيضاً إلى أن المفعول الكهرضوئي يحدث في نفس وقت حدوث مفعول كومبتون من دون أن يكون هناك أي ترابط بين هذين المفعولين.

5- في حال كان الوسط المادي مكون من عناصر ذرية مختلفة، يجب أن نأخذ في هذه الحالة العدد الذري الفعال Z_{eff} للوسط المادي وذلك انطلاقاً من الأعداد الذرية للعناصر البسيطة المكونة لهذا الوسط وبحسب نسبة وجودها فيه.

12- قوانين توهين الأشعة السينية (أو أشعة غاما) في الأوساط المادية:

The laws of X-rays and gamma rays attenuation:

12-1- التوهين في الخلاء:

ترتبط شدة الإشعاع ببعدها عن المنبع النقطي المشع الذي يصدر الإشعاع في جميع الاتجاهات وبشكل متجانس، وهي تتناسب عكساً مع مربع البعد عن هذا المنبع النقطي أي أن:

$$I = \frac{I_0}{d^2}$$

حيث: I_0 تمثل شدة حزمة المنبع النقطي و I تمثل شدة الحزمة على بعد d من المنبع النقطي.

12-2- التوهين في وسط مادي (صلب أو سائل)

إذا سقطت حزمة من الأشعة السينية (أو الغاماوية) شدتها I_0 على وسط مادي يلاحظ ما يلي: قسم صغير من حزمة الأشعة الواردة (الساقطة) إلى الوسط المادي ينعكس عن ذلك الوسط، أو يعبر (يجتاز) ذلك الوسط دون أن تتبادل التأثير معه، أما القسم الأكبر فينفذ إلى أعماق الوسط المادي حيث يتبادل التأثير مع إلكترونات ذرات ذلك الوسط. عند ذلك يمكن أن تحدث الأفعال التالية: المفعول الكهرضوئي، مفعول كومبتون ومفعول إنتاج الأزواج، ويحصل نتيجة لذلك تأين وإثارة لذرات وجزيئات الوسط المادي، وتظهر بالتالي الأشعة الثانوية ذات الطول الموجي الكبير. بناءً على ذلك، وضع العالم بور قانونه الذي ينص على ما يلي: ترتبط الشدة I_x لحزمة من الأشعة (X, γ) وحيدة اللون متوازية والواصلة إلى الطبقة الواقعة على عمق x من سطح المادة المتجانسة بالشدة I_0 للأشعة الساقطة على سطح المادة وتعطى بإحدى العلاقتين التاليتين:

$$I_x = I_0 \times e^{-\mu \times x}$$
$$I_x = I_0 \times e^{-\mu_m \times X}$$

حيث: μ يمثل معامل التوهين الخطي linear attenuation coefficient للمادة ويقدر حسب الجملة الدولية بالـ m^{-1} أو بالـ cm^{-1} حسب الجملة السغثية و $\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$ يمثل معامل التوهين الكتلي mass

attenuation coefficient الإجمالي للمادة ويقدر حسب الجملة الدولية بالـ $m^2 \times Kg^{-1}$ أو بالـ $cm^2 \times g^{-1}$ حسب الجملة السغثية، و x تمثل سماكة المادة وتقدر حسب الجملة الدولية بالـ m أو بالـ cm حسب الجملة السغثية، و $X = x \times \rho$ تمثل الكتلة السطحية للمادة وتقدر بالجملة الدولية بالـ $Kg \times m^{-2}$ أو بالـ $g \times cm^{-2}$ بالجملة السغثية.

13- سماكة النصف *half-thickness* :

سماكة النصف لوسط مادي ماص للأشعة (X, γ) بالتعريف هي: عبارة عن السماكة التي يمكنها خفض شدة الإشعاع الوارد عليه إلى النصف. بكلام آخر هي عبارة عن السماكة التي تجعل نسبة شدة الإشعاع النافذ إلى الإشعاع الوارد مساوياً إلى النصف. يرمز لها بأحد الرمزين التاليين: HVL أو $x_{1\backslash 2}$ وتحدد قيمتها اعتماداً على العلاقة (1) بالصيغة الرياضية التالية:

$$x_{1/2} = \frac{Log2}{\mu}$$

تقدر السماكة النصف حسب الجملة الدولية بالـ m أو بالـ cm حسب الجملة السغثية.

ملاحظات *Remarks*:

1- إذا كان الإشعاع وحيد الطاقة، تكون السماكات النصفية المتتالية مماثلة للسماكة النصفية الأولى.

2- إذا كانت الحزمة تضم الإشعاع اللين والإشعاع القاسي فإن السماكة النصفية للأول تخفض نسبة الأشعة اللينة ومن ثم تكون السماكة النصفية للإشعاع الثاني أكبر.

3- تعتبر السماكة النصفية من المعاملات المهمة في مجال الوقاية من الأشعة.

4- يمكن أن نحدد عدد السماكات النصفية في المادة اعتماداً على الشدة الإشعاعية (أو عدد الفوتونات) وذلك وفق العلاقتين التاليتين:

$$I = \frac{I_0}{2^n}$$

$$N = \frac{N_0}{2^n}$$

حيث $n = \frac{x}{x_{1/2}}$ تمثل عدد سماكات النصف للمادة.