

## 1- تمهيد

بعكس الجسيمات المشحونة، الفوتونات هي غير مشحونة كهربائيا ولا تخسر بانتظام الطاقة عندما تخترق المادة. تفاعلها مع المادة يكون عشوائيا، ونتيجة لذلك فإن آلية تفاعلها تختلف في الأساس مع تلك الخاصة بالجسيمات المشحونة. الإشعاعات الكهرومغناطيسية السينية (X) وغاما ( $\gamma$ ) تخسر طاقة عند التصادم المباشر مع جسيم (مشحون أو غير مشحون) و بسبب عدم امتلاكها لشحنة كهربائية ليس لها حاجز كولومي يجب عليها أن تتخطاه قبل التفاعل مع أنوية الذرات. وعليه فإن احتمالية تفاعلها النووي هي أكبر بكثير عن تلك الخاصة بالجسيمات المشحونة. بحكم عدم امتلاكها لكتلة، فإن الإشعاعات الكهرومغناطيسية لها قدرة اختراق عالية داخل المادة. وعليه فإن مداها سيكون معتبرا وهو بحدود عدة مئات من الامتار في الفراغ.

لا يوجد اختلاف كبير بين تفاعل الإشعاع السيني وإشعاع غاما مع المادة. تفاعلاتها مع المادة تشمل صنفين من الآليات على حسب التفاعل هل يكون مع الإلكترونات أو الانوية. فمثلا الفعل الكهروضوئي وفعل كومتون هي ناتجة من تفاعل مع الاكترونات، في حين أن إنتاج الأزواج إلكترون-بوزترون ( $e^-$ ,  $e^+$ ) مثلا هي ناتجة من التفاعل بين الإشعاع والنواة. في كل الحالات فإن طاقة الفوتون ستوزع بين طاقة نافذة وطاقة محولة وطاقة متشتتة.

في هذا الجزء سنهتم بتفاعل الإشعاع السيني وإشعاع غاما مع المادة.

## 2- آليات التفاعل

يحدث الإشعاع الكهرومغناطيسي المؤين عدة أفعال وآثار حسب طاقته. ففي مجال الطاقات الضعيفة الأثر الأكثر حدوثا هو ما يعرف بالفعل الكهروضوئي، أما في مجال الطاقات المتوسطة ففعل (تشتت) كومتون هو الأكثر حدوثا. أما في مجال الطاقات العالية فإن ظاهرة إنتاج الأزواج إلكترون-بوزترون ( $e^-$ ,  $e^+$ ) هي الأكثر حدوثا. وفيما يلي سنعرض شرحا وتحليلا لكل فعل من الأفعال الثلاثة المذكورة.

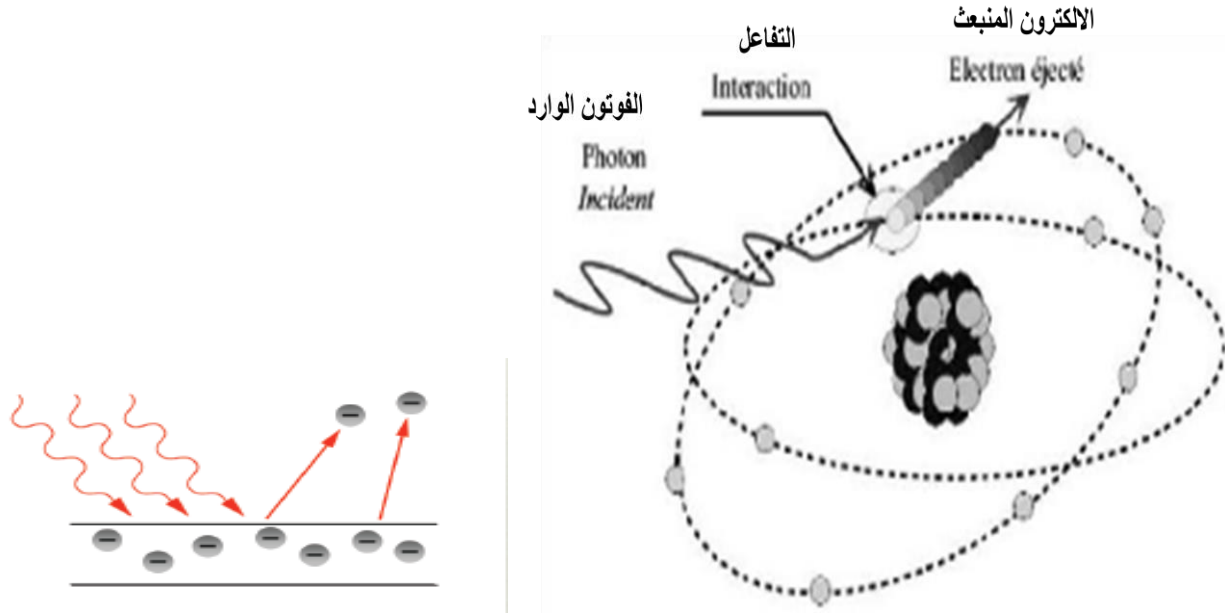
### 1-2 الفعل الكهروضوئي (photoelectric effect)

#### 1-1-2 تعريف الفعل الكهروضوئي

تم اكتشاف هذا الفعل سنة 1887م من طرف العالم "هرتز" عندما إشعاعا كهرومغناطيسيا على صفيحة من الزنك والذي لاحظ أن تيارا كهربائيا يسري في دارة كان قد ربطها بالأنبوبة المفرغة المتواجدة فيها الصفيحة.

## تفاعل الإشعاع الكهرومغناطيسي مع المادة

تعتمد هذه الآلية على الإمتصاص الكلي لطاقة الفوتون الابتدائية فيختفي بالتحويل الكلي لطاقته  $h\nu$  أثناء امتصاصها من طرف المادة المعرضة للإشعاع، يتبعها إنبعاث إلكترون نري يدعى الإلكترون الضوئي (photoelectron) كما هو مبين بالشكل (1).



الشكل 1: آلية الفعل الكهروضوئي

الإلكترون الضوئي سيمتلك طاقة حركية  $E_{ce}$  تعطى حسب مبدأ انحفاظ الطاقة بالعلاقة:

$$E_{ce} = h\nu - E_I$$

حيث تمثل  $E_I$  طاقة ربط الإلكترون المنبعث في الطبقة الذرية الأصلية (K, L, M...).

من الواضح أنه يجب أن يمتلك الفوتون طاقة أعلى من طاقة ربط الإلكترون لكي يحدث الفعل

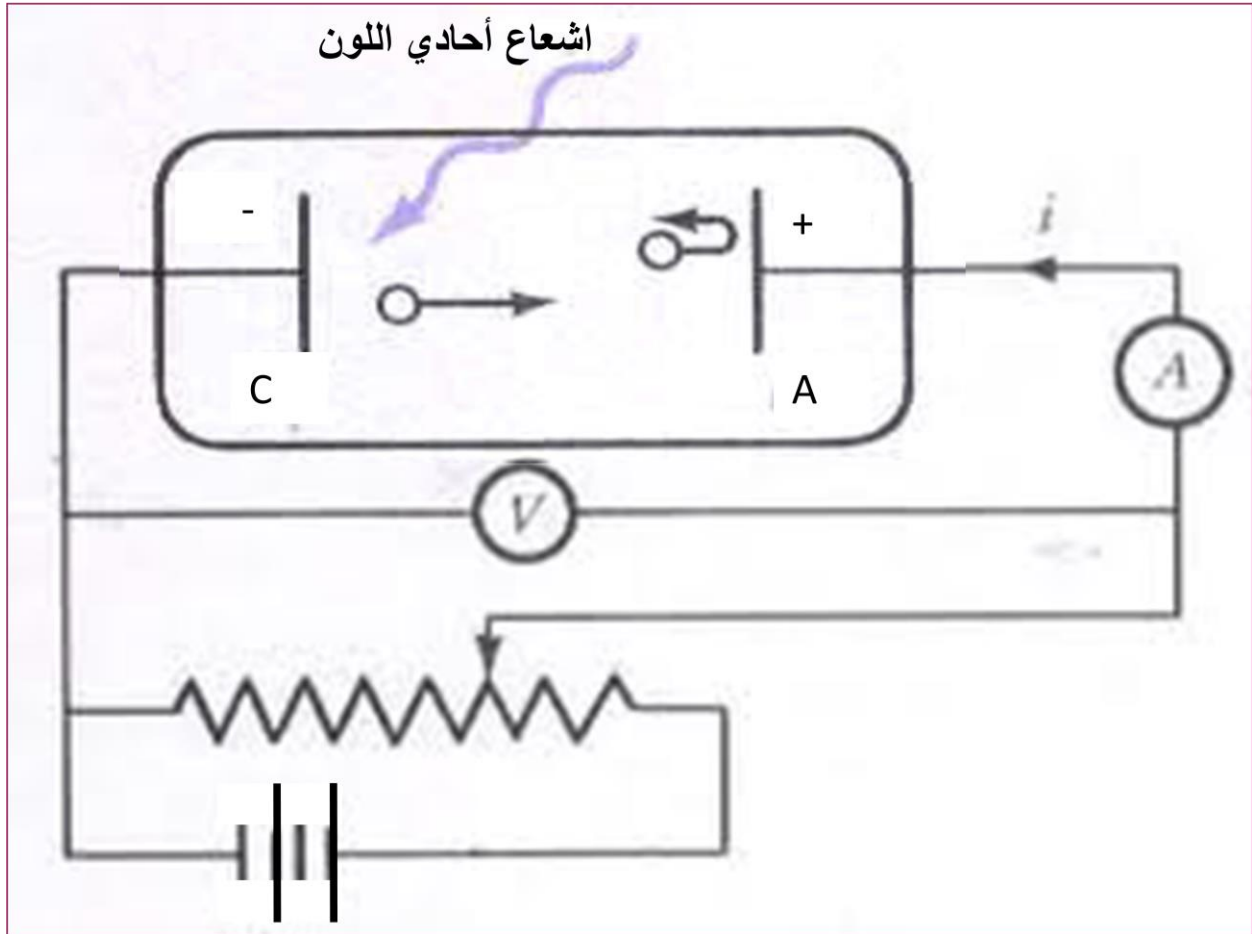
الكهروضوئي. نعتبر أن الإلكترون سيأخذ معظم طاقة الفوتون الوارد.

ملاحظة: عموماً يتبع الفعل الكهروضوئي فعل ثانوي، لأنه يحدث ذرة مثبنة (أيون) مع وجود فراغ ناتج من تحرير الإلكترون الضوئي في أحد طبقاته والذي سيثقل سريعاً بالإلكترون حر من الوسط أو بإعادة ترتيب الكتروني من الطبقات الأخرى. وعليه سيتولد فوتون أو أكثر ذو طبيعة سينية (X) مميز، والتي بدورها يمكنها بالفعل الكهروضوئي انتزاع إلكترون آخر من الطبقات الخارجية للذرة والذي يعرف "بالإلكترون أوجيه" (Auger Electron).

## 2-1-2 بعض النتائج التجريبية للفعل الكهروضوئي

### • التركيب التجريبي للفعل الكهروضوئي

لدراسة الفعل الكهروضوئي تحقق التجربة الموضحة في الشكل (2) أدناه. مبدأ التجربة هو تسليط إشعاعا كهرومغناطيسيا أحادي اللون على صفيحة مطلية بمعدن معين موضوع داخل أنبوبة مفرغة ورمربوطة بدارة كهربائية.



الشكل 2: التركيب التجريبي لدراسة الفعل الكهروضوئي

تنتج هذه الدراسة بعض النتائج التي نستعرضها كما يلي:

### • النتيجة الأولى: جهد الإيقاف $V_s$

## تفاعل الإشعاع الكهرومغناطيسي مع المادة

عند زيادة فرق الجهد فإن عدد الإلكترونات التي ستسري في الدارة الكهربائية سينخفض إلى أن نصل إلى انقطاع تيار الإلكترونات الضوئية توافق قيمة معينة للجهد. هذه الأخيرة تدعى بجهد الإيقاف وقيمتها تعطى بالعلاقة:

$$eV_s = E_{ce(max)}$$

حيث:  $e$  هي شحنة الإلكترون.

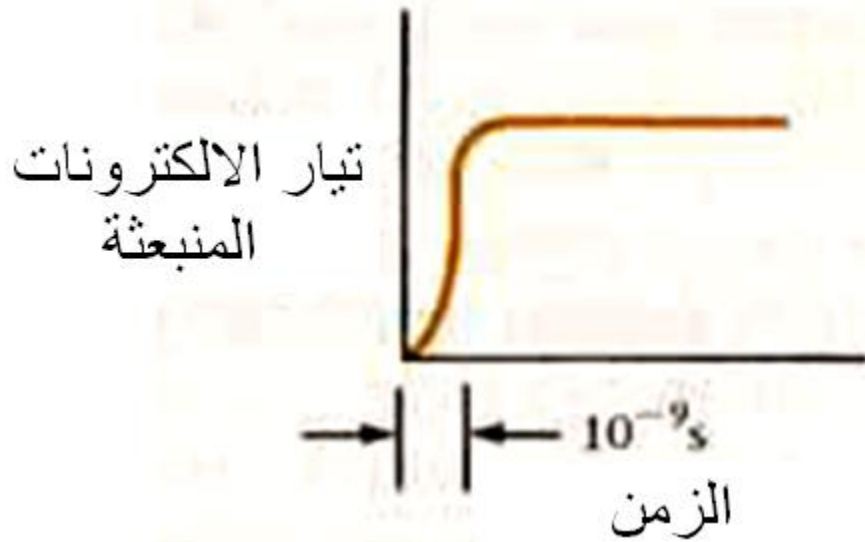
$E_{ce(max)}$  الطاقة الحركية العظمى للإلكترون الضوئي

$V_s$  جهد الإيقاف.

- النتيجة الثانية: (آنية الفعل الكهروضوئي)

عند تثبيت التردد وشدة الإشعاع الكهرومغناطيسي الوارد فإننا سنحصل على تغير التيار

الكهروضوئي بدلالة الزمن كما يبينه الشكل (3)



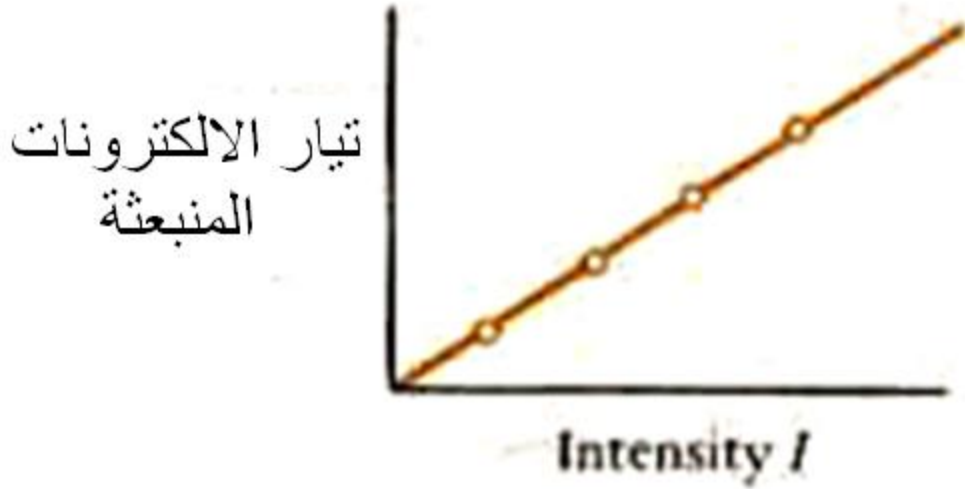
الملاحظ من الشكل أن التيار الكهروضوئي سيبلغ قيمته الأعظمية خلال زمن قصير جدا ( $10^{-9}$  s)

وهذا يعني أن الفعل الكهروضوئي هو فعل آني.

- النتيجة الثالثة:

عند تثبيت التردد والجهد وتتبع تغير شدة التيار الكهروضوئي بدلالة شدة الإشعاع الكهرومغناطيسي

فإننا سنلاحظ تناسبا طرديا بينهما كما يبينه الشكل (4)

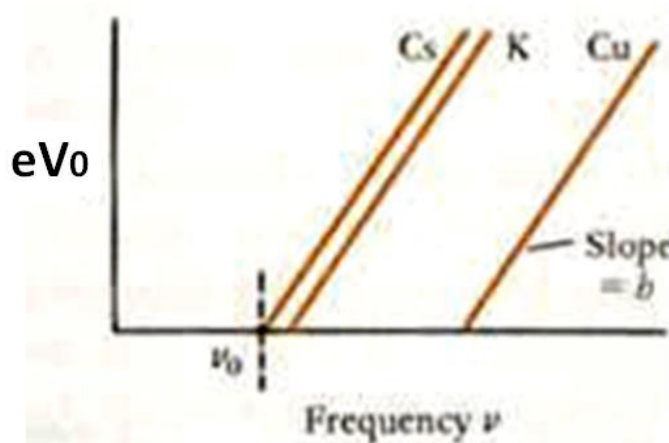


الشكل 4: تغير شدة التيار الكهروضوئي بدلالة شدة الإشعاع

يمكن أن نستنتج من خلال هذا البيان أن عدد الإلكترونات المنبعثة يتناسب طرديا مع عدد الفوتونات الواردة.

• النتيجة الرابعة: تردد العتبة  $\nu_0$

عند تثبيت شدة الإشعاع الكهرومغناطيسي وتغيير التردد وتتبع المقدار  $eV_s$  فإنه سيظهر أن قيمة هذا الأخير سيختلف عن الصفر إلا عندما يبلغ التردد قيمة معينة نرمز لها بالرمز  $\nu_0$  يختلف من مادة إلى أخرى كما يبينه الشكل (5)



الشكل 5: تغير المقدار  $eVs$  بدلالة تردد الإشعاع

## تفاعل الإشعاع الكهرومغناطيسي مع المادة

يمكن الاستنتاج أن الإلكترونات الضوئية لن تنبعث من الصفيحة إلا إذا بلغ تردد قيمة معينة. تسمى هذه الأخيرة بتردد العتبة  $\nu_0$ .

ملاحظة:

1- يمكن حساب طاقة الربط للإلكترون الضوئي انطلاقاً من العلاقة:

$$E_l = h\nu_0$$

2- في الجدول (1) التالي عرض لبعض طاقات الربط لبعض المواد:

الجدول 1: طاقات الربط لبعض المواد

المادة	طاقة الربط
الصوديوم	2,7 eV
الفضة	4,3 eV
السلكون	4,8 eV
الكربون	5,0 eV
الذهب	5,1 eV

من كل ما سبق يمكن أن نستنتج المعادلة الطاقوية للفعل الكهروضوئي بصيغ مختلفة كما يلي:

$$h\nu = E_l + E_{ce(max)}$$

أو

$$h\nu = h\nu_0 + eV_s$$

### 3-1-2 المقطع الفعال للفعل الكهروضوئي

الفعل الكهروضوئي هو نمط التفاعل الغالب في حالة الإشعاعات السينية و غاما ذات الطاقات الضعيفة نسبيا (أقل من 0.1MeV). هذه الآلية تظهر خاصة في المواد الماصة الثقيلة، أي أنها تمتلك عددا ذريا Z كبير. المقطع الفعال للامتصاص الكهروضوئي لإلكترون واحد يعطى بالعلاقة:

$$\sigma_{ph} = \frac{16\pi\sqrt{2}}{3} \frac{Z^5}{137^4} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{e^4}{m_e^2 c^2} \left(\frac{m_e c^2}{h\nu}\right)^7$$

هنا المعادلة اكتب  $\left(\frac{m_e c^2}{h\nu}\right)^7$

حيث  $e$  و  $m_e$  هما شحنة وكتلة الإلكترون في السكون على الترتيب، و  $\epsilon_0$  نفاذية الفراغ و  $c$  هي سرعة الضوء في الفراغ.

المقطع الفعال  $\sigma$  يزداد بشكل سريع مع زيادة العدد الذري  $Z$  ويقل مع قيمة الطاقة  $(h\nu)^{-7/2}$ . يمكن إذن القول أن المقطع الفعال للفعل الكهروضوئي يتناسب مع المقدار  $Z^5/(h\nu)^{3.5}$ . في ذرة تملك الكثير من الإلكترونات، المقطع الفعال الكلي للامتصاص بالفعل الكهروضوئي ستكون هو مجموع المقاطع الفعالة الجزئية لكل الإلكترونات الطبقات الإلكترونية.

### 4-1-2 تفسير الفعل الكهروضوئي حسب النظرية الموجية والكمية:

نلخص في الجدول (2) أهم الاختلافات بين تفسير النظرية الموجية والنظرية الكمية للفعل

الكهروضوئي

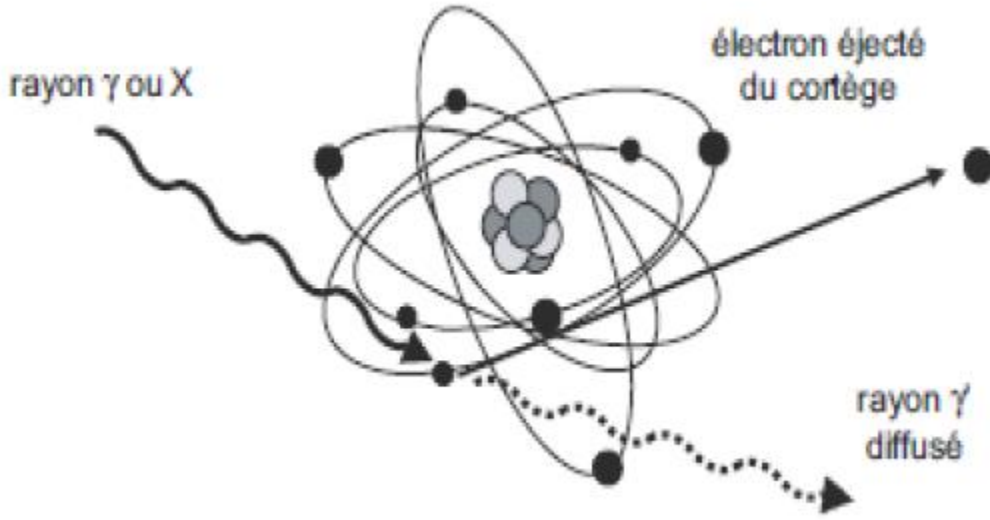
النظرية الموجية	التجربة العملية	نظرية الفوتون لأينشتاين
زيادة شدة الضوء يؤدي إلى زيادة عدد الإلكترونات المنبعثة وطاقتها الحركية.	زيادة شدة الضوء زادت من عدد الإلكترونات المنبعثة ولم تغير في طاقة الحركة العظمى.	الضوء عبارة عن فوتونات وزيادة شدة الضوء تؤدي إلى زيادة عدد الفوتونات، كل فوتون يصطدم مع إلكترون واحد ويعطيه كامل طاقته، أي أن زيادة عدد الفوتونات يؤدي زيادة عدد الإلكترونات المنبعثة.
لا يؤثر تردد الضوء الساقط على طاقة حركة الإلكترونات المنبعثة.	بزيادة تردد الضوء الساقط زادت طاقة حركة الإلكترونات المنبعثة.	جميع فوتونات الضوء الاحادي اللون تمتلك نفس الطاقة وتزيد طاقة الفوتون بزيادة التردد، وبما أن كل فوتون يعطي كل طاقته إلكترون واحد فإن طاقة حركة الإلكترون تزيد بزيادة تردد الضوء الساقط.

## 2-2 فعل كومتون (تشتت كومتون) – Compton effect

### 1-2-2 اكتشافه وتعريفه

تم اكتشاف هذه الآلية من طرف العالم "آرثر كومتون" عام 1923م. وبعكس الفعل الكهروضوئي فإن آلية فعل كومتون تعتمد على امتصاص جزء فقط من طاقة الفوتون الابتدائية ( $X$  أو  $\gamma$ ) الذي يتفاعل عن طريق اصطدام غير مرن مع إلكترون نري: هذا الإلكترون مرتبط بالذرة ولكن بطاقة مهملة أمام طاقة الفوتون الوارد. يفقد هذا الأخير إذن جزء من طاقته الابتدائية  $h\nu$  ومنحاه بعد التفاعل سيصنع زاوية  $\theta$  مع منحاه الابتدائي. هذا الجزء الممتص من الطاقة سيحول إلى الإلكترون الذي يمكن طرده من السحابة الإلكترونية وفق منحى يصنع زاوية  $\varphi$ . هذا الإلكترون يسمى الإلكترون التأخير أو الكترون كومتون.

يبين الشكل (6) نمودجا لآلية كومتون.



الشكل 6: آلية تشتت كومتون

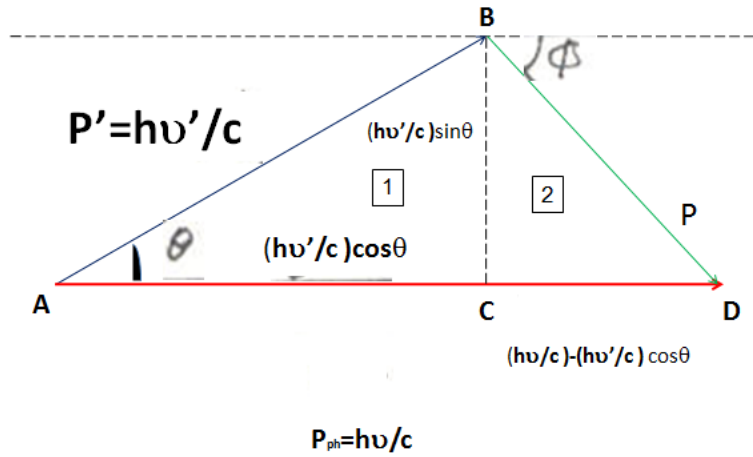
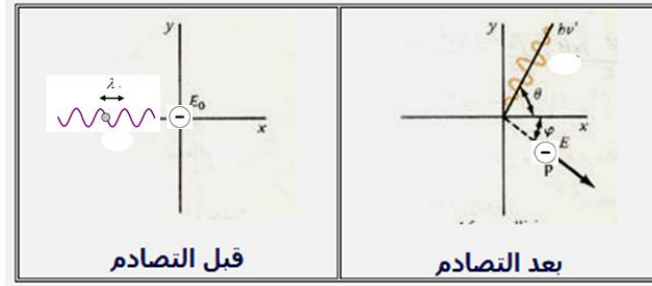
### تجريبيا:

- طاقة الإشعاع المنحرف  $E'$  تكون أقل من الإشعاع الابتدائي  $E$  ( $E > E'$ ) ما ينجر عنه أن طول موجة الإشعاع المنحرف  $\lambda'$  تكون أكبر من طول الموجة الابتدائي  $\lambda$  ( $\lambda' > \lambda$ ).
- التغير في الطول الموجي  $\Delta \lambda$  يتعلق بالزاوية  $\theta$ .



### 2-2-2 التغير في الطول الموجي $\Delta\lambda$ – طول موجة كومبتون

سنعتمد على الشكل (7) لإيجاد علاقة التغير في الطول الموجي  $\Delta\lambda$ .



الشكل 7: التمثيل الهندسي لتشتت كومبتون

وانطلاقاً من مبدأ إنحفاظ الطاقة وكمية الحركة قبل وبعد التصادم.

من المثلث 2 لدينا:

$$BD^2 = BC^2 + CD^2 \Rightarrow P^2 = \left(\frac{hv'}{c} \sin\theta\right)^2 + \left(\frac{hv}{c} - \frac{hv'}{c} \cos\theta\right)^2$$

نضرب الطرفين في  $c^2$  فنحصل على:

$$P^2 c^2 = \left(\frac{hv'}{c}\right)^2 + \left(\frac{hv}{c}\right)^2 - 2\left(\frac{h}{c}\right)^2 vv' \cos\theta \dots\dots\dots (1)$$

لدينا:  $h\nu + E_0 = h\nu' + E$  حيث  $E_0$  هي طاقة السكون للإلكترون.

$$E - E_0 = h\nu - h\nu' \Rightarrow E^2 + E_0^2 - 2EE_0 = (h\nu)^2 + (h\nu')^2 - 2h^2\nu\nu' \dots\dots\dots(2)$$

من جهة أخرى:

$$E^2 = E_0^2 + P^2c^2 \dots\dots\dots(3)$$

بتعويض العلاقة (3) في العلاقة (2) نجد:

$$(h\nu)^2 + (h\nu')^2 = 2E_0^2 + P^2c^2 - 2EE_0 + 2h^2\nu\nu' \dots\dots\dots(4)$$

نقوم الآن بتعويض العلاقة (4) في (1) فنجد:

$$P^2c^2 = 2E_0^2 + P^2c^2 - 2EE_0 + 2h^2\nu\nu' + 2h^2\nu\nu' \cos\theta$$

$$\Rightarrow 2h^2\nu\nu'(1 - \cos\theta) = 2EE_0 - 2E_0^2 = 2E_0(E - E_0)$$

من معادلة انحفاظ الطاقة:  $E - E_0 = h\nu - h\nu'$  و  $E_0 = m_0c^2$  نجد:

$$2h^2\nu\nu'(1 - \cos\theta) = 2m_0c^2(h\nu - h\nu')$$

$$\Rightarrow 2 \frac{h^2c^2}{\lambda\lambda'} (1 - \cos\theta) = 2hm_0c^3 \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right)$$

$$\Rightarrow \frac{h}{\lambda\lambda'} (1 - \cos\theta) = m_0c \left( \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda\lambda'} \right), \text{ و } \Delta\lambda = \lambda' - \lambda$$

$$\Rightarrow \Delta\lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta)$$

وهي علاقة التغير في الطول الموجي الناتج عن فعل كومبتون.

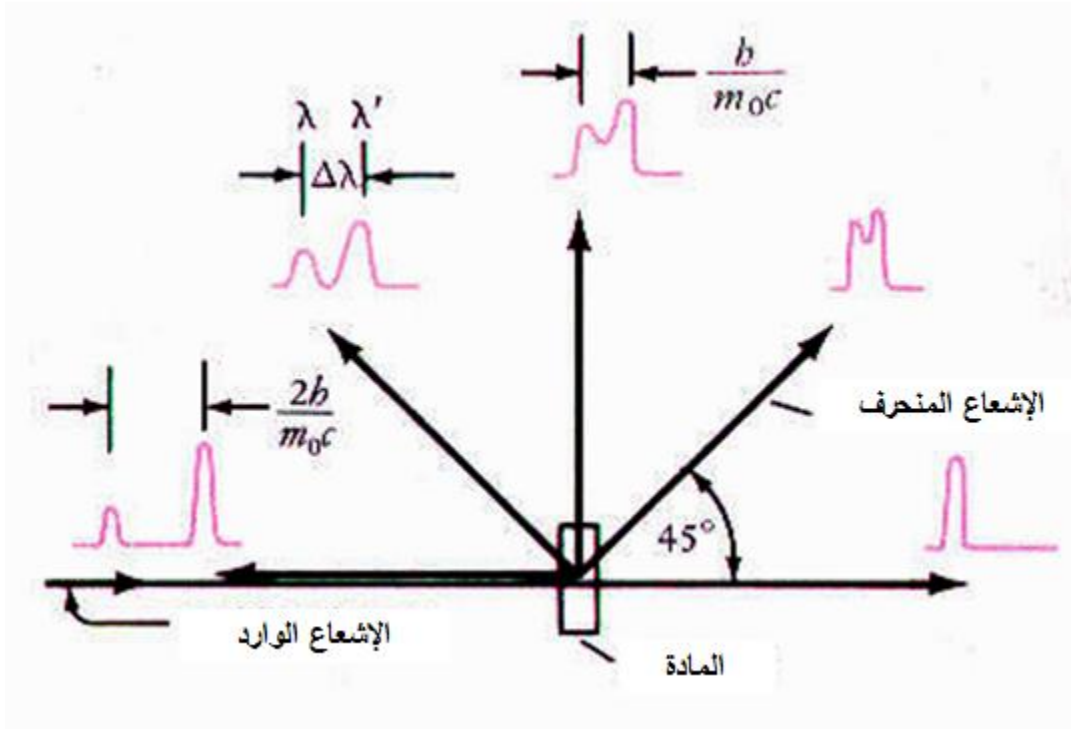
نتيجة: تظهر علاقة التغير في الطول الموجي أن هذا الأخير يتعلق بزاوية التشتت  $\theta$ .

## تفاعل الإشعاع الكهرومغناطيسي مع المادة

يسمى المقدار الثابت  $\left(\frac{h}{m_0c}\right)$  بطول موجة كومتون ويرمز لها بالرمز  $\lambda_c$  ولها قيمة محددة هي:

$$\lambda_c = 0.024 \text{ \AA}$$

يمثل الشكل (8) التالي بعض الحالات الخاصة لتشتت كومتون أين يظهر قيم التغير في الطول الموجي  $\Delta\lambda$  حسب قيم معينة لزاوية التشتت.



الشكل 8: بعض الحالات الخاصة لفعل كومتون

يمكن أيضا استنتاج أن :

$$hv' = \frac{hv}{1 + \frac{hv}{m_0c^2} (1 - \cos\theta)}$$

نلاحظ أيضا هنا أن طاقة الفوتون المتشتت تتعلق بزاوية التشتت  $\theta$ .

## تفاعل الإشعاع الكهرومغناطيسي مع المادة

- إذا كان  $\theta = 0^\circ$  : التحويل الطاقوي يكون معدوماً، والفوتون المتشتت سيكون له أعلى طاقة وهي نفس مقدار الطاقة الابتدائية.
- إذا كان  $\theta = 180^\circ$  : الفوتون المتشتت يترد إلى الخلف والتحويل الطاقوي يكون أعظمية. وتكون الطاقة المتشتتة أقل ما يمكن ومقدارها يعطى بالعلاقة:

$$hv' = \frac{hv}{1 + \frac{2hv}{m_0c^2}}$$

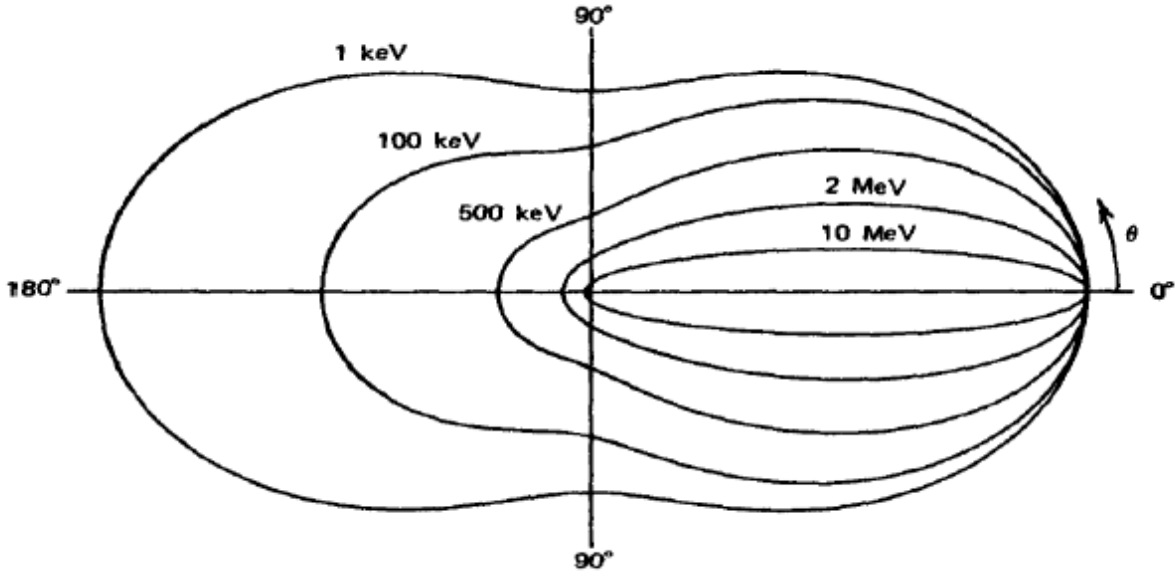
باستعمال أيضا معادلة الطاقة يمكن استنتاج طاقة الالكترن المتحرر والتي تعطى بالعلاقة:

$$E_{e^-} = hv - hv' = \frac{hv(1 - \cos\theta)}{\frac{m_0c^2}{hv} + (1 - \cos\theta)}$$

يوص التوزيع الزاوي للفوتونات المتشتتة بعلاقة "كلاين-نيشيكا" (Klein-Nishika) التي تعبر عن تغير المقطع الفعال التفاضلي حول الإتجاه  $\theta$  في وحدة الزاوية الصلبة  $\Omega$  :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left( \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right)^2 \left( \frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right) \left( 1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos^2\theta)}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right)$$

حيث  $\alpha$  هي الثابت  $hv/m_0c^2$  و  $r_0$  هو نصف قطر الالكترن. بالتكامل على كامل الفضاء نجد المقطع الفعال الكلي لتشتت كومتون لالكترن واحد  $\sigma_c$ . المقطع الفعال الاجمالي للذرة يحسب بضرب  $\sigma_c$  بالعدد الذري  $Z$ . نبين على الشكل (9) أدناه التوزيع الزاوي لفوتونات كومتون بصفة هندسية ويوضح التوجه المفضل للتشتت إلى الأمام بالنسبة للإشعاع غاما ( $\gamma$ ) ذو الطاقة العالية.



الشكل 9: التوزيع الزاوي للفوتونات المنتشرة بفعل كومبتون (حالة الإشعاع غاما بطاقة عالية)

ملاحظة:

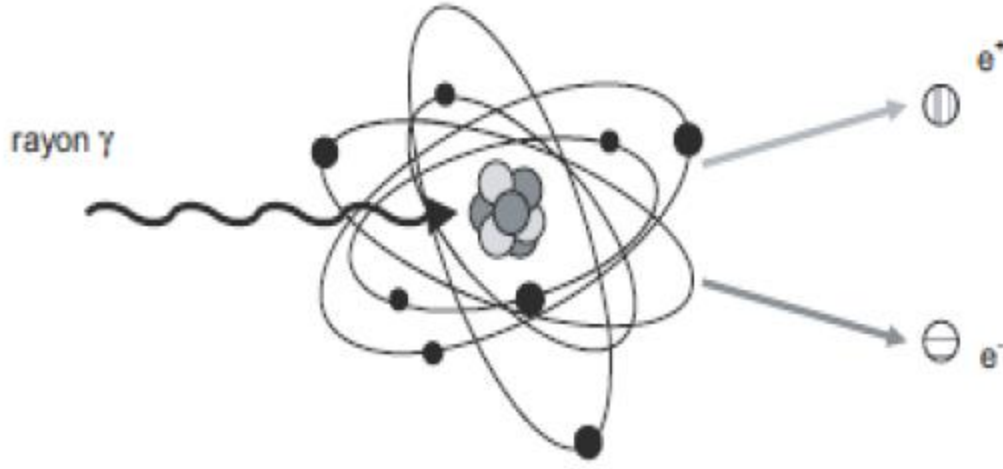
هناك أيضا تأثير آخر وهو فعل كومبتون العكسي Inverse Compton effect

### 3-2 إنتاج الأزواج ( $e^-$ , $e^+$ )

#### 1-3-2 تعريف

تحدث آلية إنتاج الأزواج "الالكترون-بوزيترون" عندما يخترق فوتون وارد ذو طاقة عالية المجال الكهربائي للنواة أو لالكترون. إنتاج الأزواج تسمى أيضا "تجسيم" تعتمد على إختفاء فوتون لإعطاء أو إنتاج زوج مكون من إلكترون وبوزيترون. كل جسيم يتم انتاجه له طاقة تتعلق بكتلته السكونية  $m_e$  والتي تساوي  $m_e c^2$  وعليه إنتاج هذا الزوج يتطلب عتبة طاقة تساوي  $2m_e c^2 = 1.022 \text{ Mev}$ .

على الشكل (10) مثلنا آلية هذا التفاعل.

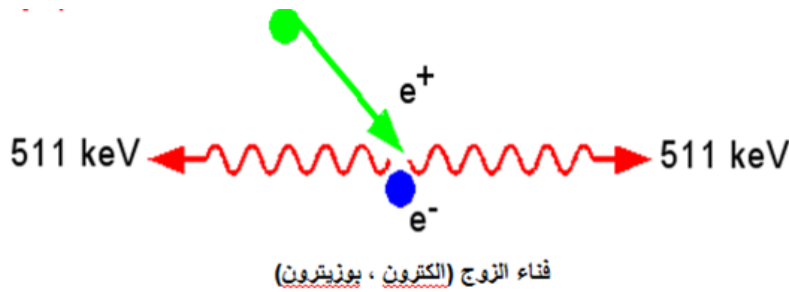


الشكل 10: آلية إنتاج زوج الكترون-بوزيترون ( $e^-, e^+$ )

بالقرب من المجال الكهربائي للنواة فإن هذا النوع من الفاعل يفرض أن تكون طاقة الفوتون الوارد أكبر من  $2m_e c^2 = 1.022 \text{ Mev}$  ، في حين أنه بالجوار من المجال الكهربائي للاكترون فإن عتبة الطاقة يجب ان تكون الضعف أي  $4m_e c^2 = 2.044 \text{ Mev}$  .

### 2-3-2 فناء الزوج "الكترن - بوزيترون"

الفائض الطاقى سيتحول على شكل طاقة حركية بين الجسيمات المنتجة. البوزيترون الذي تم انتاجه داخل المادة سيتباطئ ويفقد طاقته بالتأيين والإثارة للذرات التي سيواجهها خلال حركته، ولكن ريثما يواجه الكترونا سيتحد معه ليشكلا فوتونان غاما طاقتهما تساوي  $0.511 \text{ MeV}$  لكل منهما وفي إتجاهين مختلفين. وهو ما يعرف بفناء الزوج "الكترن - بوزيترون" كما هو مبين في الشكل (11).



فناء الزوج (الكترن ، بوزيترون)

الشكل 11: ظاهرة فناء الزوج الكترون-بوزيترون

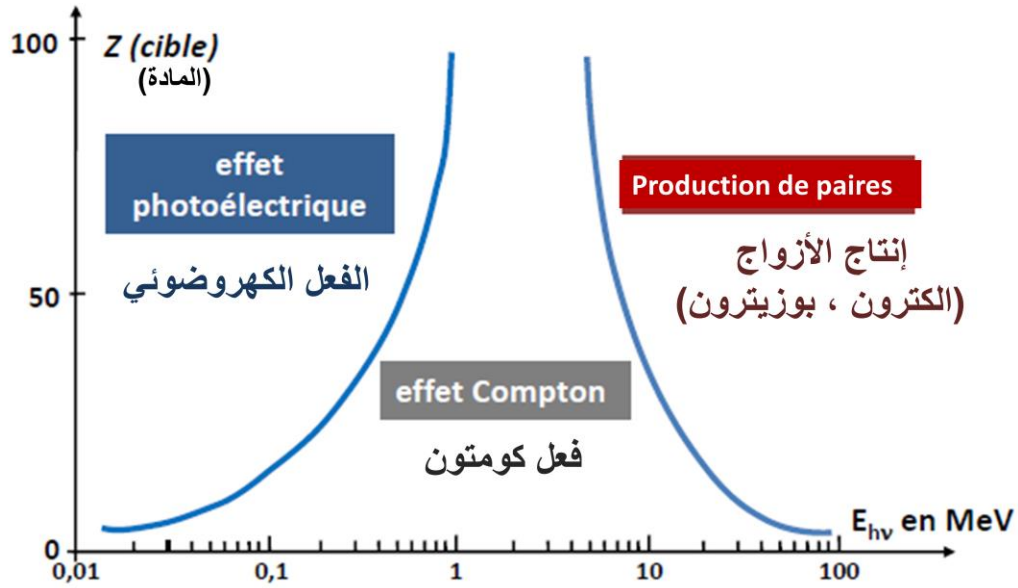
### 2-3-3 المقطع الفعال لإنتاج الزوج "الالكترون-بوزيترون"

المقطع الفعال لآلية إنتاج الأزواج الكترون-بوزيترون تعطى بالعلاقة:

$$\sigma_{\text{زوج}} = \frac{Z^2}{137} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_0 c^2} \right)^2 \left( \frac{28}{9} \log \frac{2h\nu}{m_0 c^2} - \frac{218}{27} \right)$$

عملياً نلاحظ أن آلية إنتاج الأزواج تتغير بدلالة  $Z^2$ ، أين  $Z$  هو العدد الذري للوسط المخترق من طرف الإشعاع.

إن أهمية الآليات الثلاث المذكورة أعلاه والتي تعتمد على طبيعة المادة وطاقة الفوتون، ويتم توضيح هذا على الشكل (12) بالنسبة لمختلف المواد وطاقات الإشعاع غاما و X.



الشكل 12: غالبية حدوث أحد الأفعال الثلاث حسب  $Z$  و الطاقة  $E$ .

على اليسار تظهر الطاقات التي يمكن للفعل الكهروضوئي وفعل كومتون يمكنها الحدوث بدلالة العدد الذري للمادة. أما على اليمين تظهر مجال الطاقات التي يمكن لفعل كومتون وآلية إنتاج الأزواج لها نفس إمكانية الحدوث. نلاحظ أن هناك ثلاث مناطق التي ضمنها يمكن لغالبية فعل من الأفعال الثلاث الحدوث.

## بصفة عامة:

يكون الفعل الكهروضوئي غالبا في مجال الطاقات الضعيفة (أقل من 100KeV) وبالنسبة للمواد الثقيلة (Z كبير). أما فعل كومبتون يكون غالب الحدوث بالنسبة للطاقات الأقل من 1.022MeV أي في مجال الطاقات المتوسطة وبالنسبة للمواد الخفيفة (Z صغير)، وقبل هذه القيمة فإن احتمالية إنتاج الأزواج الكترون-بوزيترون تكون معدومة. أما في مجال الطاقات العالية ( $>1.022 \text{ MeV}$ ) فإن احتمال حدوث آلية إنتاج الأزواج الكترون-بوزيترون يكون الأغلب وبالنسبة للمواد الثقيلة.

## 4-2 تشتت رايلي (Rayleigh diffusion)

بالإضافة إلى تشتت كومبتون، هناك نوع آخر من التشتت يمكن أن يحدث الذي خلاله يتفاعل الفوتون ذو الطاقة المنخفضة توافقيا مع الكترون شديد الارتباط بالذرة التي يلاقيها. هذا التشتت التوافقي يعرف بتشتت "رايلي" وهو تشتت لا يؤين ولا يثير الذرة والفوتون الوارد يحتفظ بطاقته الابتدائية بعد التشتت.

على العموم، ظاهرة التشتت التوافقي تبقى قليلة الملاحظة بالنسبة للأفعا الناجمة منة تفاعل فوتون-مادة ولأن لا يوجد أي طاقة يتم تحويلها عمليا خلاله فإن هذا الفعل يهمل في حالة التفاعل بين الإشعاعات غاما و X مع المادة. في حين أن منحى الفوتون يتغير في هذا النوع من الآليات. احتمالية التشتت التوافقي لا تكون معتبرة إلا في حالة الطاقات الضعيفة (عموما أقل من بعض المئات من KeV) وتكون احتمالية أكبر بالنسبة للمواد الثقيلة (Z كبير). زاوية التشتت المتوسطة تقل بزيادة الطاقة، مما يزيد من تقليل الأهمية العملية لتشتت "رايلي" في مجال الطاقات الضعيفة.

## 5-2 التفاعل فوتون-نواة

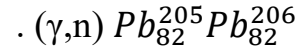
يعرف أيضا هذا النوع بالتفاعل إنحلال الفوتون (Photodésintégration) وهو تفاعل نووي ننتج عندما يتم امتصاص فوتون عالي الطاقة (عموما فوتون غاما) من طرف نواة، مما يعطيها مقدارا من الطاقة لإثارتها. النواة المثارة يمكن أن تعود للاستقرار بعدة طرق منها:

- انبعاث إشعاع غاما ( $\gamma, n$ )
- انبعاث جسيمات (بروتون، نيوترون أو  $\alpha$ ) ( $\gamma, p$ )، ( $\gamma, \alpha$ )
- إنشطار الأنوية الثقيلة



## تفاعل الإشعاع الكهرومغناطيسي مع المادة

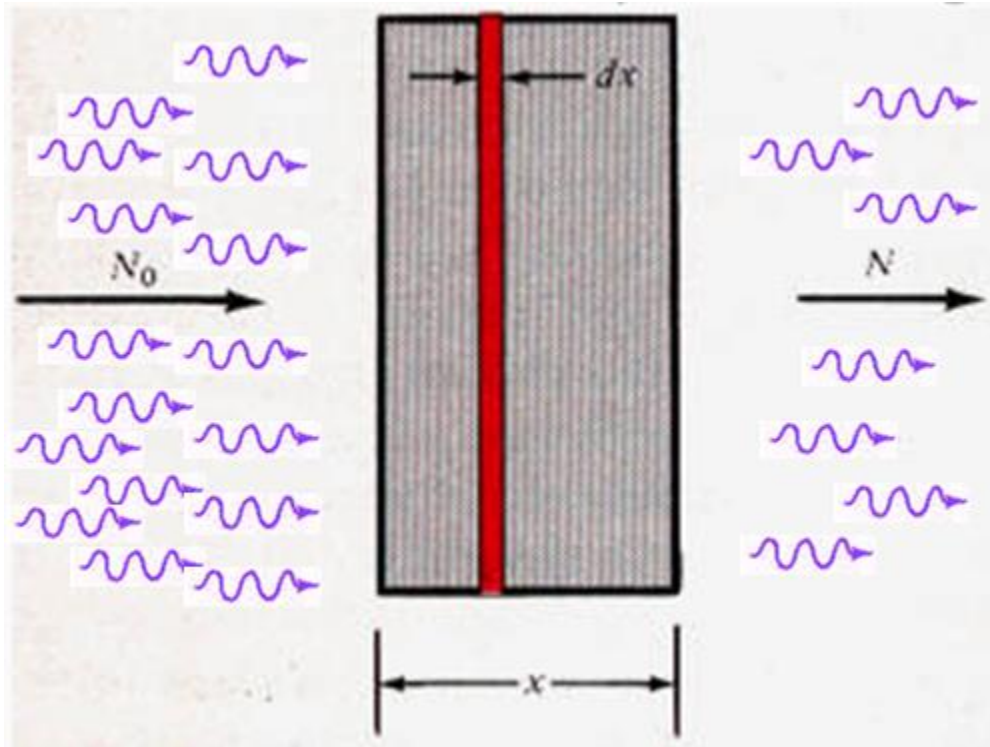
من جهة أخرى فإن الأنوية الناتجة من التفاعلات فوتون-نواة هي عادة أنوية مشعة مثل  $Pb_{82}^{205}$  ;  
الناتجة من امتصاص إشعاع غاما من طرف النظير  $Pb_{82}^{206}$  وفق معادلة التفاعل النووية:



### 3- توهين الإشعاع الكهرومغناطيسي (Electromagnetic radiation Attenuation)

#### 1-3 تعريف

عند تفاعل حزمة إشعاعية كهرومغناطيسية ذو شدة  $I_0$  مع مادة معينة فإنه سيتعرض إلى توهين في شدته لتصبح  $I$  حيث تكون  $I < I_0$  بسبب إحدى الأفعال الثلاث السابقة. نوضح في الشكل (13) نموذجا لمعنى توهين الإشعاع إثر تفاعله مع المادة التي تمتص عددا من الفوتونات خلال التفاعل.



الشكل 13: توهين الإشعاع الكهرومغناطيسي

### 2-3 معاملات الإمتصاص

إن سبب توهين الإشعاع الكهرومغناطيسي هو امتصاص الفوتونات عن طريق آلية تفاعل من الآليات المذكورة أعلاه (الفعل الكهروضوئي، تشتت كومتون و إنتاج الأزواج إلكترون-بوزيترون) كما هو منمذج بالشكل ... أدناه. إن المقطع الفعال الكلي للتفاعل  $\sigma_T$  لفوتون ذو طاقة معينة مع مادة تملك عددا ذريا  $Z$  يعبر عنه بدلالة المقاطع الفعالة للأفعال الثلاث : الفعل الكهروضوئي ( $\sigma_{ph}$ ) ولفعل كومتون ( $\sigma_c$ ) ولفعل إنتاج الأزواج إلكترون - بوزيترون ( $\sigma_{paire}$ ) بالعلاقة:

$$\sigma_T = \sigma_{ph} + \sigma_c + \sigma_{paire}$$

إذا اعتبرنا إشعاعا مكونا من فوتونات وحيد الطاقة رقيق مقطعه  $S$  يخترق مادة (شاشة) مكونة من أنوية ذات كتلة ذرية  $M$  وكتلة حجمية  $\rho$ . الحجم العنصري  $dV$  لشريحة من المادة سمكها  $dx$  ستكون  $dm = \rho \cdot dV = \rho \cdot S \cdot dx$  وستحتوي على كمية مادة قدرها  $(\rho S dx / M)$  (mol) أي عدد ذرات قدره  $N_A \rho S dx$  حيث  $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  (عدد أفوغادرو). إذا اخترق الإشعاع السمك  $dx$  فإن المقطع الفعال الكلي للتفاعلات هو  $\sigma_T N_A \rho S dx / M$ .

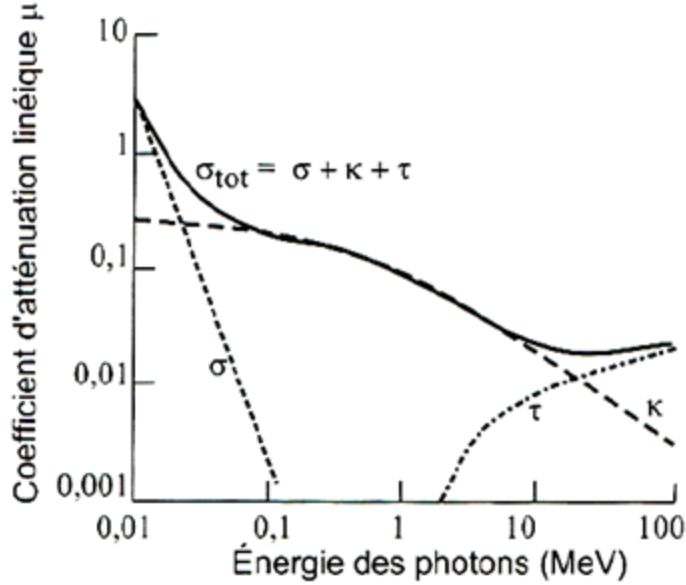
إحتمالية التفاعل هي نسبة هذا المقطع إلى المساحة  $S$  أي:

$$dp = \frac{\sigma_T N_A \rho S dx}{MS} = \frac{\sigma_T N_A \rho dx}{M}$$

هذه الاحتمالية تساوي نسبة عدد الفوتونات  $dN$  إلى عدد الفوتونات  $N(x)$  الموجودة في الشريحة  $dz$ . بما أن الفوتونات يتم امتصاصها فإن  $dN$  يجب أن يكون سالبا. جبريا نضع:

$$\frac{dN}{N(x)} = - \left( \frac{\sigma_T N_A \rho}{M} \right) dx = -\mu dz$$

حيث  $\mu = \sigma_T N_A \rho / M$  وهو معامل الامتصاص (التوهين) الخطي. ويمثل متوسط عدد تفاعلات الفوتونات لوحدة السنتمتر في المادة ووحدته هي إذن مقلوب وحدة المسافة ( $\text{cm}^{-1}$ ). المعامل  $\mu$  هو مقدار مميز لطاقة الفوتون الوارد وطبيعة المادة المخترقة كما يبينه الشكل (14) التالي.



الشكل 14: تغير معامل الامتصاص الخطي بدلالة طاقات الفوتون للأفعال الثلاث.

( $\sigma$ )  $\sigma_{ph}$ : معامل الفعل الكهروضوئي،  $\kappa$  ( $\sigma_c$ ): معامل فعل كوتون و  $\tau$  ( $\sigma_{paire}$ ): معامل إنتاج الأزواج)

عدد الفوتونات المنبعثة  $N(x)$  يعطى بالعلاقة الأسية المتناقصة:

$$N(x) = N_0 e^{-\mu x}$$

حيث  $N_0$  يمثل هو عدد الفوتونات الابتدائي.

نلاحظ ان توهين الإشعاع يتعلق بـ:

- طبيعة سمك المادة المخترق من الفوتونات
- طبيعة والحالة الفيزيائية للمادة
- طاقة وعدد الفوتونات الواردة

يمكن أيضا تمييز الفوتونات غاما و  $X$  بدلالة متوسط مداها  $R$ ، الذي يعرف على أنه المسافة

المتوسطة المقطوعة داخل المادة قبل أن يحدث أي تفاعل. يمكن الحصول على قيمته إنطلاقاً من:

$$R = \frac{\int_0^{\infty} z e^{-\mu x} dx}{\int_0^{\infty} e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu}$$

إذن، R هو ببساطة مقلوب معامل الامتصاص الخطي.

تتراوح قيم R من بعض المليمترات إلى عشرات السنتيمترات في الأجسام الصلبة بالنسبة لطاقات الإشعاعات غاما و X.

### ملاحظة:

إستعمال معامل المتصاص الخطي يتحدد حسب كثافة المادة، حتى إن لم يتغير الوسط. وعليه يتغير مع تغير حالته الفيزيائية ومنه فإن معامل الامتصاص الكتلي  $\mu_m$  هو الأكثر استعمالا وحدته  $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  وهو يعطى بالعلاقة:

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

حيث  $\rho$  هي الكتلة الحجمية للوسط.

بالنسبة لقيمة معينة لطاقة الفوتون، فإن قيمة معامل الامتصاص الكتلي لا تتغير مع تغير الحالة الفيزيائية للمادة. فمثلا بالنسبة للماء ، يبقى معامل الامتصاص الكتلي لا يتغير في ما إذا كان الماء بخارا أو سائلا.

يمكن حساب معامل الامتصاص الكتلي لمركب أو خليط من العناصر الكيميائية من العلاقة:

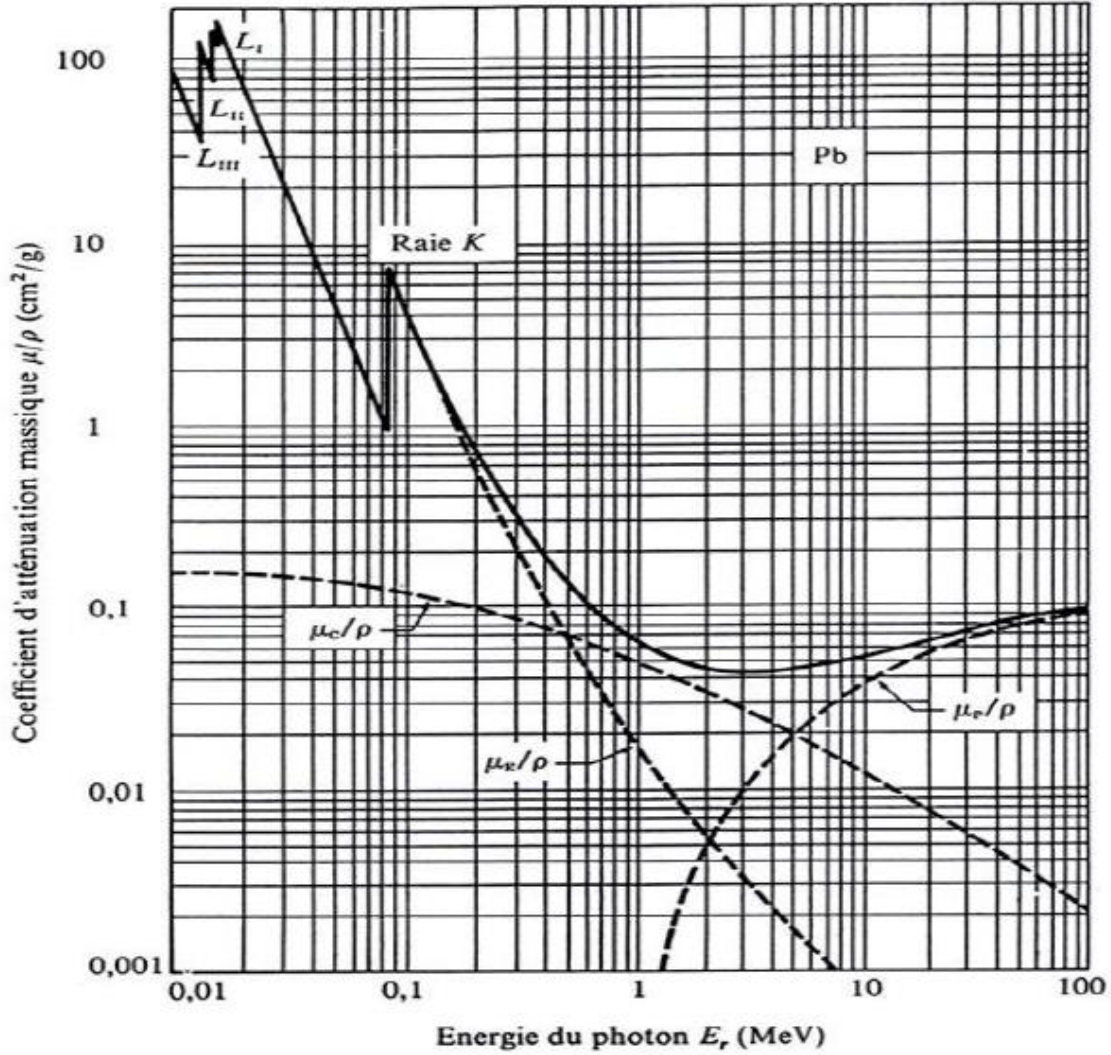
$$(\mu_m)_c = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$$

حيث  $w_i$  يمثل النسبة الكتلية للعنصر  $i$  في المركب أو الخليط

و  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$  يمثل معامل الامتصاص الكتلي للفوتونات ذات الطاقة  $E$  في العنصر  $i$ .

## تفاعل الإشعاع الكهرومغناطيسي مع المادة

في الشكل (15) أدناه نبين تغير معامل الامتصاص الكتلي للرصاص بدلالة طاقة الفوتونات الواردة.



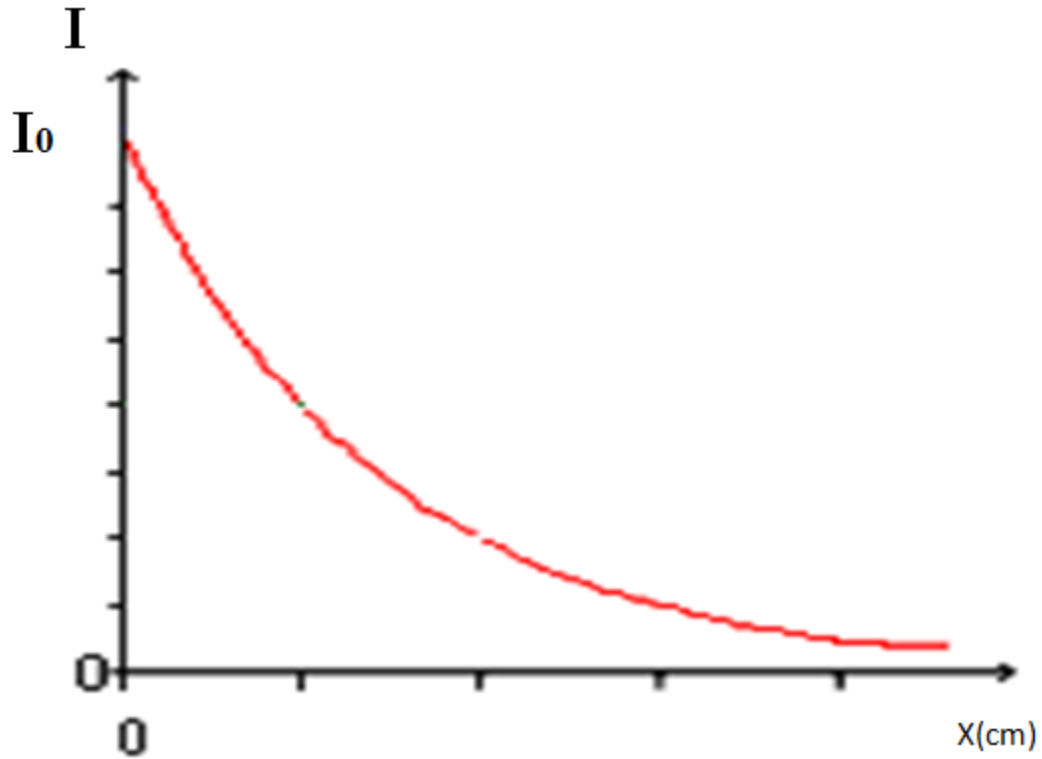
الشكل 15: معامل الامتصاص الكتلي بدلالة طاقة الفوتونات الواردة في الرصاص.

هي معاملات الامتصاص الكتلي للفعل الكهروضوئي وكومتون و  $(\mu_{ph}/\rho)$  و  $(\mu_c/\rho)$  و  $(\mu_{e^+/e^-}/\rho)$  و إنتاج الأزواج على الترتيب.

### 3-3 نسبة التوهين

#### 1-3-3 علاقة التوهين

يقصد بنسبة التوهين هي النسبة بين الشدة النهائية والابتدائية للإشعاع أي :  $I/I_0$  وهي نسبة مئوية. تتناقص شدة الإشعاع أيضا بشكل أسي متناقص أي كما هو مبين في الشكل (16).



الشكل 16: تناقص شدة الإشعاع الابتدائي بدلالة المسافة المخترقة داخل المادة

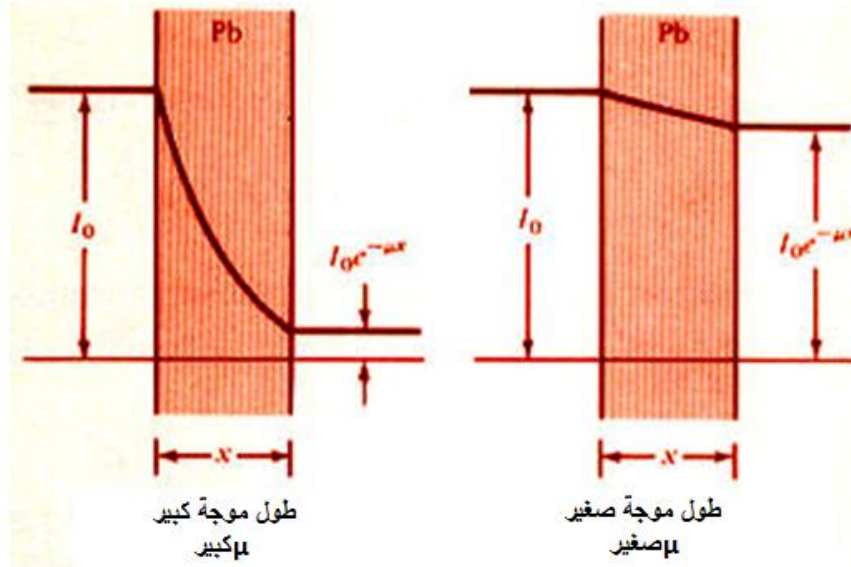
من البيان فإن:

$$I=I_0e^{-\mu x} \Rightarrow \frac{I}{I_0} = e^{-\mu x}$$

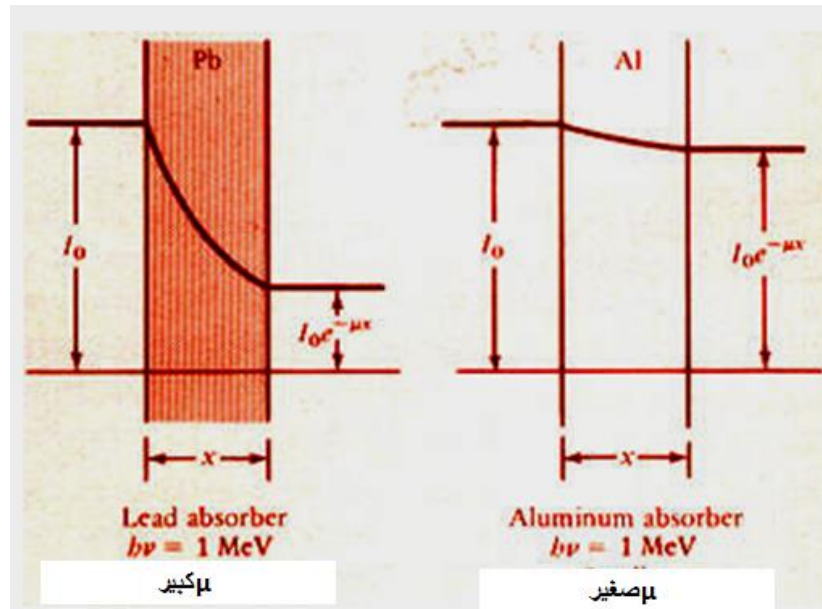
### 2-3-3 بعض النتائج التجريبية:

- يمكن تلخيص بعض النتائج التجريبية عبر الأشكال التالية:

1- التناسب بين الطاقة  $E$  والمعامل  $\mu$

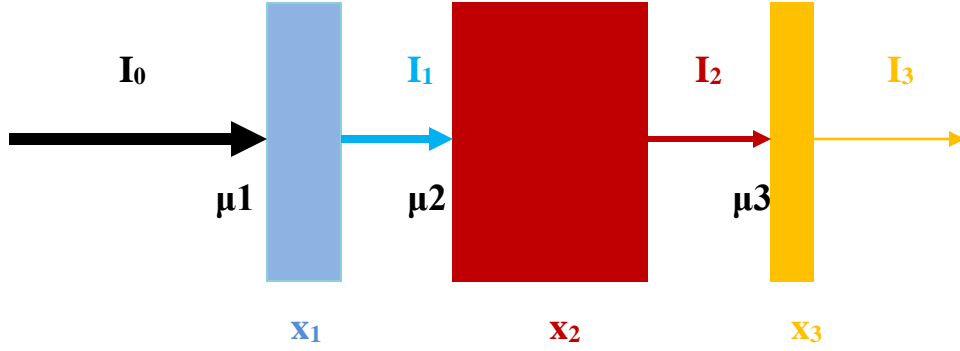


2- التناسب بين نوع المادة ( $Z$ ) والمعامل  $\mu$



### 3-3-3 التوهين المتتالي

إذا اخترق الإشعاع الكهرومغناطيسي عدة مواد متتالية كما هو مبين في الشكل (17) (حالة ثلاث مواد مثلا ذات سمك و معامل إمتصاص مختلفة) فإنه يمكن حساب نسبة التوهين كما يلي:



الشكل 17: توهين الإشعاع بمواد متتالية

بعد إختراق المادة (1) فإن الشدة ستصبح  $I_1$  وتكتب:  $I_1 = I_0 \exp(-\mu_1 x_1)$

بعد إختراق المادة (2) فإن الشدة ستصبح  $I_2$  وتكتب:  $I_2 = I_1 \exp(-\mu_2 x_2)$

بعد إختراق المادة (3) فإن الشدة ستصبح  $I_3$  وتكتب:  $I_3 = I_2 \exp(-\mu_3 x_3)$

وعليه يمكن استنتاج نسبة التوهين بين  $I_3$  و  $I_0$  وذلك بتعويض كل معادلة في المعادلة التي تليها كالتالي:

$$I_2 = I_0 \exp(-\mu_1 x_1) \exp(-\mu_2 x_2)$$

$$\Rightarrow I_2 = I_0 \exp(-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2))$$

$$\Rightarrow I_3 = I_0 \exp(-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2)) \exp(-\mu_3 x_3)$$

$$\Rightarrow I_3 = I_0 \exp(-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \mu_3 x_3))$$

$$\Rightarrow \frac{I_3}{I_0} = \exp -(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \mu_3 x_3)$$

#### تعميم

إذا كان عدد المواد المخترقة هو  $n$  فإن نسبة التوهين هي:

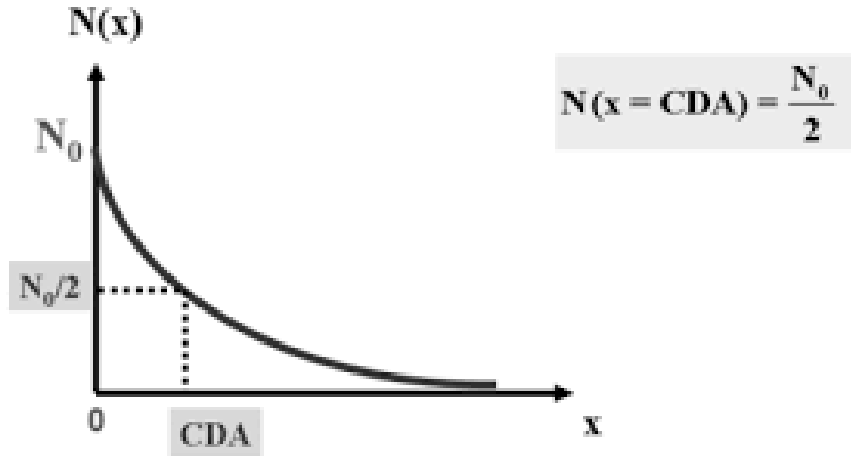
$$\frac{I_n}{I_0} = \exp -\left(\sum_{i=1}^n \mu_i x_i\right)$$



### 4-3-3 طبقة نصف التوهين (CDA)

يرمز لها أيضا بالرمز  $x_{1/2}$  وتعرف على أنها سمك المادة الذي عنده يوهن الإشعاع بالنصف أي عنده ينخفض عدد الفوتونات إلى نصف عددها الابتدائي كما يبينه الشكل (18) يمكن إثبات بسهولة أن:

$$CDA = x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$



الشكل 18: تحديد طبقة نصف التوهين

عادة ما يتم استعمال الإشعاع غاما و  $X$  في المجالات الطبية ولذلك تميز بطبقة نصف التوهين CDA الخاصة بها. قيمة CDA تحدد جودة الإشعاع.

يمكن أيضا تعريف متوسط المدى الحر  $R$  للفوتونات في المادة بالعلاقة:

$$R = \frac{1}{\mu} = 1.44 CDA$$

فبعد اختراق قدره  $nCDA$  فإن الإشعاع سيوهن بمقدار  $\frac{1}{2} n$ .

مثال:

إذا اعتبرنا أن  $210 = 1024$  يمكن اعتبار أنه بعد اختراق مادة بمقدار  $10CDA$  فإن الإشعاع سيوهن تقريبا بمقدار 1000 مرة. نستعمل حينئذ السمك العشري الذي لايسمح إلا بمرور 10% من الإشعاع الوارد وفي

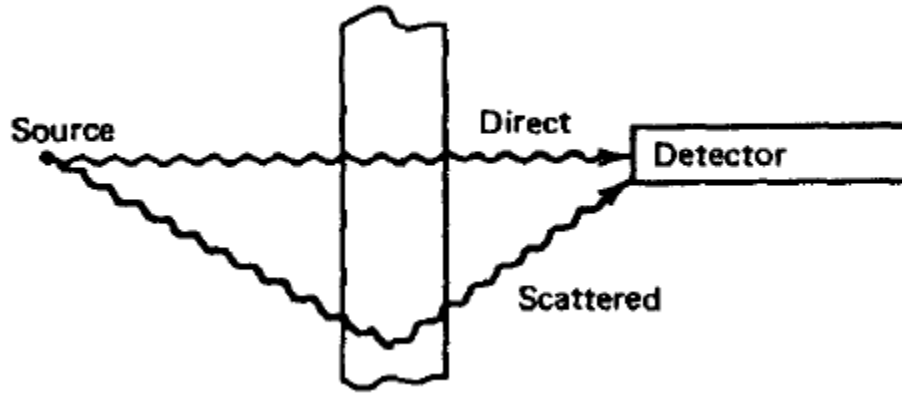
$$CDA = \frac{\ln 10}{\mu} \quad \text{هذه الحالة تكون:}$$

### 5-3-3 حالة التقاط إشعاع مضخم (Buildup)

في تجربة توهين الإشعاع غاما الذي يكون فيها الإشعاع دقيقا وموجها (الشكل 19) قبل أن يصطدم بالمادة ، ويحدث وأن جزءا من الإشعاع لا يتفاعل مع المادة بعد إختراقها فيرصد الكاشف إشعاعا أكبر من ذلك الذي يفترض رصده (الموهن). هذه الظاهرة تعرف بظاهرة تضخيم الإشعاع (buildup). في هذه الحالة فإن علاقة التوهين تعوض بالعلاقة التالية:

$$\frac{I}{I_0} = B(t, E_\gamma) e^{-\mu t}$$

أين العامل  $B(t, E_\gamma)$  يسمى عامل التضخيم.



الشكل 19: ظاهرة تضخيم الإشعاع.