

الفصل الرابع

تفاعل الاشعة النووية مع المادة

Interaction of nuclear radiation with matter

ان دراسة تفاعل الاشعة النووية مع المادة تكون ضرورية لمعرفة قياسات الاشعاع المؤين ، لان كشف الاشعاع المؤين مبني على اساس تفاعله ومقدار الطاقة المفقودة داخل المادة التي يتفاعل معها ، كما ان بناء الكواشف النووية وتفسير نتائج القياسات وكذلك حسابات التدريع للمواد تتطلب المعرفة والالمام بكيفية تفاعل الاشعة النووية مع المادة .

ان الاشعة النووية بانواعها تتميز بصفتين اساسيتين هما الكتلة والشحنة وبذلك يقسم الاشعاع النووي الى نوعين رئيسيين :

اولا: الجسيمات المشحونة وتتضمن :

1-الجسيمات الثقيلة مثل (جسيم الفا ، البروتونات ، الديوترونات) .

2-الجسيمات الخفيفة مثل (الالكترونات) .

ثانيا : الجسيمات غير المشحونة وتتضمن :

1-النيوترونات .

2-الاشعة الكهرومغناطيسية (كاما والاشعة السينية) .

اولاً: الجسيمات المشحونة

1-تفاعل الجسيمات المشحونة الثقيلة :

عند مرور جسيمة مشحونة خلال وسط ما فانها تتفاعل بشكل رئيس مع الكترونات ذلك الوسط نتيجة لقوة كولوم التي تؤثر بين الجسيمة المشحونة والالكترونات ، وبسبب صغر حجم النواة نسبة الى حجم الذرة فان احتمالية تصادم الجسيمة المشحونة مع الالكترونات هي اكبر بكثير من احتمالية التصادم مع النواة ولهذا فان الآلية المهيمنة على فقدان طاقة الجسيمات المشحونة هي الاستطارة الكولومية بواسطة الكترونات الذرات مما يؤدي الى تأيينها او اثارها .

وقبل مناقشة طريقة حساب فقدان الطاقة من قبل جسيمة مشحونة ، هناك بعض النقاط الاساسية التي تؤخذ بنظر الاعتبار عند دراسة الموضوع وهي :

1-قبل فقدان الجسيمة المشحونة لجميع طاقتها يمكن ان تقوم بعدة الاف من التصادمات الرأسية وغير الرأسية .

2-تسير الجسيمة المشحونة الثقيلة بخط مستقيم تقريبا داخل المادة .

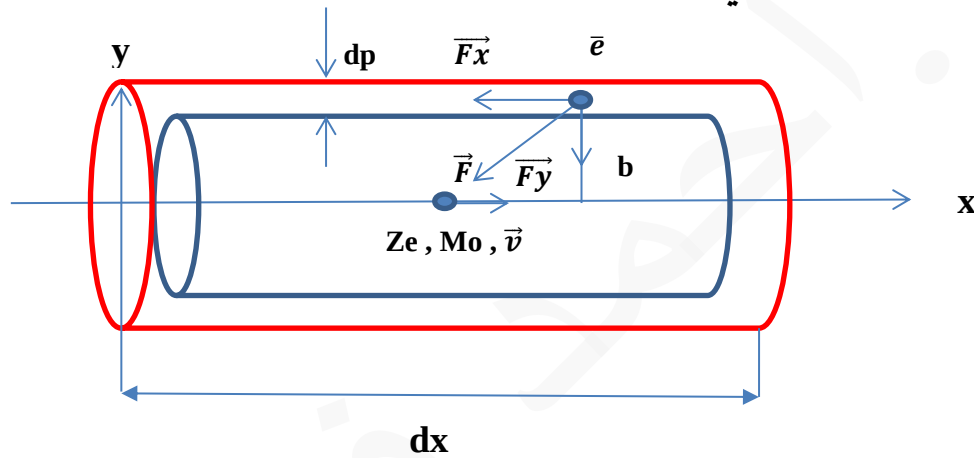
3-بما ان لقوة كولوم مدى غير نهائي ، فان الجسيمة تتفاعل في الوقت نفسه مع عدد من الالكترونات وبهذا تفقد طاقتها بالتدريج ولكن يكون ذلك باستمرار على طول مسارها حتى تتوقف عن الحركة وتسمى المسافة المقطوعة بالمدى Range .

4-الطاقة اللازمة لتأيين الذرة قليلة نسبياً، وإذا لم يعطى الالكترون الطاقة الكافية للتأيين ، فان الذرة ستنقل الى مستوى الاثارة ، الذي تعود منه بسرعة الى المستوى الارضي . ان الالكترون المتحرر من عملية التأين يمكن ان يقوم أيضاً بتأيين ذرة اخرى وتسمى الالكترونات السريعة الناتجة من التصادمات المؤينة باشعة دلتا Delta –Rays .

❖ قدرة الايقاف Stopping Power :

تعرف قدرة المادة لايقاف الجسيمة المشحونة بانها الطاقة التي تفقدها الجسيمة لكل وحدة مسار في المادة .

ولاشتقاق معادلة قدرة الايقاف للجسيم المشحون داخل المادة نفرض ان الجسيمة المشحونة الثقيلة تقترب من الالكترون في مسار على شكل خط مستقيم وعلى بعد b ، وان الالكترون حر ، كما في الشكل ادناه :



ان مقدار فقدان الطاقة من قبل الجسيمة المشحونة يساوي مقدار ربح الطاقة من قبل الالكترون ، ومن الممكن حساب هذا الربح وحسب الاتي : ان قوة كولوم $\vec{F}$ التي تؤثر فيها الجسيمة المشحونة على الالكترون يمكن تحليلها الى مركبة أفقية $\vec{F}_x$ ومركبة شاقولية $\vec{F}_y$ حيث $\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y$.

ان المركبة الافقية لا تعمل على اخراج الالكترون من قشرته ، في حين ان المركبة الشاقولية هي التي تعمل على اخراج الالكترون من قشرته وتكسبه زخما مقداره P_e وعلى هذا فان :

$$\int F_x dt \approx 0 = P_x \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\int F_y dt = P_e \quad \dots\dots\dots(2)$$

انه من الممكن حساب الزخم المكتسب من قبل الالكترون بتطبيق قانون كاوس Gauss law وكالاتي :

$$\int \vec{E} \cdot \vec{ds} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

حيث E : تمثل شدة المجال الكهربائي عند السطح الذي يحيط بالفراغ الذي تقع داخله الشحنة q

ds : عنصر المساحة للسطح المحيط بالشحنة الكهربائية .

وعلى ضوء الشكل السابق فان تفاعل الجسيمة المشحونة مع الالكترونات سيكون على شكل اسطوانة نصف قطرها يساوي (b) وان ارتفاعها الجانبي سيكون مساويا لمسافة dx ، وعلى هذا فان $ds=2\pi bdx$ وحيث ان $E = \frac{F_y}{e}$ ، وان $q=Ze$ فان :

$$\int E \cdot ds = \int \frac{F_y}{e} \times 2\pi bdx = \frac{Ze}{\epsilon_0}$$

وحيث ان $dx = Vdt$ وهي المسافة التي يسيرها الجسيم الثقيل خلال فترة زمنية dt ، فان :

$$\int F_y dt = \frac{Ze^2}{2\pi b\epsilon_0 V} = P_e \quad \dots\dots\dots (3)$$

ان الطاقة الحركية التي فقدها الجسيم الثقيل واكتسبها الالكترون تساوي :

$$T = \frac{P_e^2}{2m_e} = \frac{Z^2 e^4}{8\pi^2 b^2 m_e \epsilon_0^2 V^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

فاذا فرضنا ان (n) هو عدد الذرات في وحدة الحجم ، وان Z هو عدد الالكترونات الموجودة في كل ذرة ، فان nZ سيمثل عدد الالكترونات في وحدة الحجم ، وعلى هذا فان عدد الالكترونات الكلي الموجود في اسطوانة مساحة قاعدتها $2\pi bdb$ وعلى مسار طوله dx هي :

$$nZ \cdot 2\pi bdb \cdot dx$$

وبما ان كل الكترون سيكتسب طاقة مقدارها T ، حسب المعادلة (4) ، فهذا يعني ان الجسيمة المشحونة ستفقد طاقة كلية في وحدة المسافة مساوية الى :

$$-\frac{dE}{dx} = \int_{b_{min}}^{b_{max}} nZ \cdot 2\pi b \cdot \frac{z^2 e^4}{8m_e(\pi b V \epsilon_0)^2} db$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^4 z^2 Z n}{4m_e \pi V^2 \epsilon_0^2} \cdot \ln \frac{b_{max}}{b_{min}} \dots\dots\dots (5)$$

والان يجب تحديد قيم b_{min} ، b_{max} . ان زمن التصادم Δt يجب ان لا يكون اطول من مدة دوران الالكترون في مداره اثناء انتقال الطاقة الى الالكترون فان :

$$\Delta t_{max} = \frac{1}{v} \approx \frac{b_{max}}{V} \rightarrow b_{max} = \frac{V}{v} \dots\dots\dots (6)$$

اما b_{min} فتتحدد من مبدأ انعدام الدقة لان الالكترون لا يجب ان يوجد بالنسبة للجسيمة الثقيلة على مسافة اقل من طول موجة دي برولي الخاصة به .

$$\Delta x \cdot \Delta p = \frac{\hbar}{2}$$

$$\therefore b_{min} = \frac{\hbar}{2p} = \frac{\hbar}{2m_e V} \dots\dots\dots (7)$$

لذلك فان المعادلة (5) تصبح :

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^4 z^2 Z n}{4m_e \pi V^2 \epsilon_0^2} \cdot \ln \frac{2m_e V^2}{\hbar v} \dots\dots\dots (8)$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^4 z^2 Z n}{4m_e \pi V^2 \epsilon_0^2} \cdot \ln \frac{2m_e V^2}{I_{av}} \dots\dots\dots (9)$$

حيث $\hbar v$ يمثل معدل جهد التهيج او التأين I_{ave} للذرات في المادة .

نلاحظ من المعادلة (9) ان قدرة الايقاف :-

- 1- لا تعتمد على كتلة الجسيم المشحون .
- 2- تتناسب مع z^2 للجسيم المشحون .
- 3- تعتمد على سرعة الجسيم المشحون .
- 4- تتناسب مع كثافة المادة التي تسير خلالها الجسيمة المشحونة.

ان المعادلة (9) تستخدم عندما تكون سرعة الجسيمة المشحونة الثقيلة غير نسبية ، وعندما تسير الجسيمات بسرعات نسبية يجب ادخال التصحيحات المتعلقة بالسرعة النسبية.

ملاحظة : إذا كان هناك جسيमान مشحونان لهما الاعداد الذرية z_1 , z_2 ويسيران بنفس السرعة v وبنفس المادة ، فان :-

$$\frac{(dE/dx)_1}{(dE/dx)_2} = \frac{z_1^2}{z_2^2} \dots\dots\dots (10)$$

فإذا رمزنا لقدرة الايقاف لجسيم α بـ SP_α وللبروتون SP_p فان :

$$\frac{SP_\alpha}{SP_p} = \frac{(2)^2}{(1)^2} = 4 \rightarrow SP_\alpha = 4SP_p$$

*ان حساب الفقدان في الطاقة عمليا يتم بواسطة قياس عدد الازواج الايونية المتولدة خلال مسار الجسيم ، فإذا كان مقدار الطاقة التي يفقدها الجسيم عند توليد زوج أيوني واحد تساوي (w) ، فان عدد الازواج الايونية لكل وحدة طول من مسار الجسيمة يعطى بالعلاقة :

$$-\frac{dE}{dx} = w * i \dots\dots\dots (11)$$

حيث i عدد الازواج الايونية .

مثال/ احسب عدد الايونات الناتجة عن فقدان جسيمات ألفا جميع طاقتها التي تساوي 5.3 MeV في حجرة التأين المملوءة بالهواء ؟ وما مقدار الشحنة الكلية الناتجة للالكترونات ؟ مع العلم ان مقدار الطاقة التي يفقدها جسيم الفا لتوليد زوج ايوني في الهواء هو (35.2 ev) ؟

$$1) -\frac{dE}{dx} = w * i \quad \text{الحل/}$$

$$5.3 \times 10^6 = 35.2 \times i \rightarrow i = \frac{5.3 \times 10^6}{35.2} \cong 1.5 \times 10^5 \text{ ions}$$

$$2) Q_e = 1.5 \times 10^5 \times 1.6 \times 10^{-19} = 2.4 \times 10^{-14} \text{ C} \quad \text{الشحنة الكلية}$$

❖ المدى The Range :

هو معدل المسافة المقطوعة من قبل الجسيمة المشحونة قبل فقدانها لجميع طاقتها الحركية (قبل ان تقف) ويمكن حسابه كالاتي :-

$$R = \int_0^R dx = \int_{T_0}^0 \frac{dx}{dT} \cdot dT = \int_{T_0}^0 \frac{dT}{\frac{dT}{dx}} = \int_0^{T_0} \frac{dT}{\left(-\frac{dT}{dx}\right)}$$

ان الطاقة التي يفقدها الجسيم المشحون (ألفا مثلا) في وحدة الطول من مساره تكون اكبر بالقرب من نهاية مداها وذلك لان حركتها تكون بطيئة بالقرب من النهاية وبذلك لديها الوقت الكافي للتفاعل مع الذرات التي تمر بقربها ، فاذا فرضنا ان :-

$$-\frac{dT_{\alpha}}{dx} \propto \frac{1}{V_{\alpha}}$$

$$\therefore -\frac{dT_{\alpha}}{dx} = \frac{K}{V_{\alpha}} \rightarrow R = \int_0^{T_0} \frac{dT}{\left(\frac{K}{V_{\alpha}}\right)}$$

$$\text{But } T_{\alpha} = \frac{1}{2} m V_{\alpha}^2 \rightarrow dT = m_{\alpha} V_{\alpha} dV_{\alpha}$$

$$\therefore R = \int_0^{V_{\alpha_0}} \frac{m_{\alpha} V_{\alpha} dV_{\alpha}}{\frac{k}{V_{\alpha}}} = \int_0^{V_{\alpha_0}} \frac{m_{\alpha} V_{\alpha}^2}{k} dV_{\alpha}$$

$$\therefore R = \frac{m_{\alpha}}{3k} V_{\alpha_0}^3$$

حيث V_{α_0} السرعة الابتدائية لجسيم ألفا.

مدى جسيم ألفا بدلالة سرعتها ويسمى بقانون كاير التجريبي ولايجاد علاقة المدى بالطاقة الحركية :-

$$T_{\alpha_0} = \frac{1}{2} m_{\alpha} V_{\alpha_0}^2 \rightarrow V_{\alpha_0}^3 = \left(\frac{2T_{\alpha_0}}{m}\right)^{\frac{3}{2}}$$

نعوض عن $V_{\alpha_0}^3$ بقانون كاير فنحصل على :-

$$R_{\alpha} = b_2 (T_{\alpha_0})^{\frac{3}{2}}$$

$$\therefore R_{\alpha} = 0.318 (T_{\alpha_0})^{\frac{3}{2}}$$

مدى جسيم ألفا بدلالة طاقتها الحركية

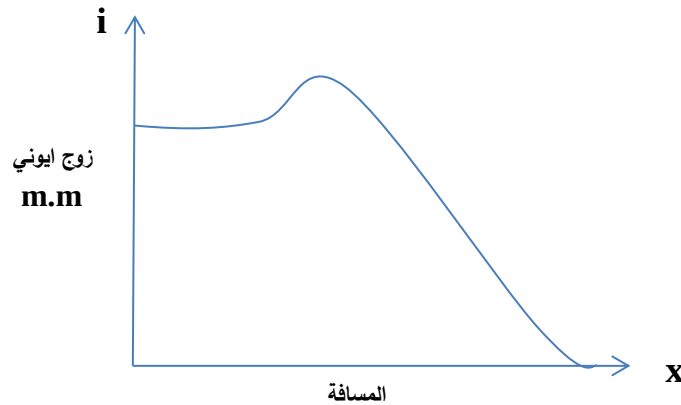
حيث R_{α} تقاس بـ cm ، T_{α_0} تقاس بـ MeV

❖ امتصاص جسيمات ألفا : *Absorption of α -particles*

تمتص جسيمات ألفا بسهولة من قبل المواد فجسيمات الفا المنبعثة من المصادر المشعة يمكن ان تمتص من قبل ورقة او صفيحة من الالمنيوم سمكها (4 mm) او بضع سنتمترات من الهواء .

ان الطريقة الرئيسية التي تفقد بواسطتها الجسيمات المشحونة شحنتها هي تفاعلها مع الكثرونات المادة عن طريق قوى كولوم مسببة التهيج والتأين لذرات المادة، لذلك تستطيع جسيمة ألفا انتاج ازواج ايونية بهذه العملية ، ويعبر عن شدة التأين الذي تسببه جسيمات ألفا بالتأين النوعي *Specific ionization* . ويعرف التأين النوعي بانه عدد ازواج الايونات لكل وحدة مسار . والشكل ادناه يمثل التأين النوعي كدالة للمسافة التي تقطعها الجسيمة داخل المادة.

ان ما تفقده الجسيمة من طاقة لكل وحدة مسار في بداية دخولها المادة يكون قليلا والتأين النوعي الذي تسببه يكون ثابت المقدار تقريبا ، بينما في نهاية المسار حيث تصبح سرعة الجسيمة قليلة ستزداد احتمالية التصادم فيزداد التأين النوعي عن قيمته الثابتة ، لكنه سرعان ما ينخفض وبشكل سريع للصفر بعد فقدان جسيمة ألفا لكل طاقتها.



2- تفاعل الجسيمات المشحونة الخفيفة (الالكترونات) مع المادة :-

ان فقدان الطاقة بالنسبة للالكترونات خلال مرورها بالمواد تسببها نفس العمليات التي تؤثر على الجسيمات الثقيلة ، كما ان معادلة فقدان الطاقة مطابقة للمعادلة (9)، ولكن بما ان هناك اختلاف كبير في الكتل فان عددا من الفروق المهمة يمكن ملاحظتها وكما يلي:-

1-الالكترونات ، وخاصة تلك التي تنبعث من انحلال بيتا ، تسير بسرعة عالية بسبب صغر كتلتها.

2-عند التصادم مع الكترونات الذرات فان الالكترونات الساقطة تعاني من انحرافات كبيرة ولهذا فانها ستسير بمسار متعرج وليس بخط مستقيم كما هو الحال بالنسبة للجسيمات الثقيلة .

3-في التصادم الرأسي بين احد الالكترونات والكترون اخر ، يتم انتقال جزء كبير من الطاقة الابتدائية الى الالكترون المقصوف .

4-اثناء مرور الالكترون بالقرب من النوى داخل المادة يمكن ان يتعرض الى تعجيلات سريعة ومفاجئة مما يؤدي الى احداث تغيرات في اتجاهه وسرعته وبسبب ذلك يتوجب على الالكترون التخلص من الطاقة المكتسبة على شكل اشعاعات كهرومغناطيسية تسمى بأشعة الكبح (*Bremsstrahlung*).

❖ اشعة الكبح (*Bremsstrahlung*) :-

هي اشعة كهرومغناطيسية تنبعث عندما تمر جسيمة مشحونة بالقرب من نواة ذات شحنة كبيرة ، فتخضع لتعجيل كبير مما يؤدي الى تغيير سريع ومفاجئ في اتجاه وسرعة الجسيمة المشحونة ، وبما ان كل جسيمة مشحونة معجلة يجب ان تشع طاقة

كهرومغناطيسية فان الجسيمات المشحونة تتخلص من طاقتها المكتسبة باعطاء موجات كهرومغناطيسية تسمى بأشعة الكبح .

❖ تفاعل جسيمات بيتا مع المادة :-

عند سقوط حزمة من جسيمات بيتا على مادة ما فان عدد الجسيمات النافذة (N) سيتناقص أسياً مع سمك المادة (x) وفقاً للمعادلة :-

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

حيث N_0 يمثل العدد الاصللي لجسيمات بيتا

μ معامل الامتصاص

X سمك المادة

وتعرف قدرة المادة لايقاف جسيمات بيتا بانها الطاقة التي تفقدها جسيمة بيتا لكل وحدة طول من مسارها في المادة وتعطى بالعلاقة الاتية :-

$$\left(-\frac{dE_\beta}{dx} \right)_T = \left(-\frac{dE_\beta}{dx} \right)_C + \left(-\frac{dE_\beta}{dx} \right)_{rad}$$

حيث $\left(-\frac{dE_\beta}{dx} \right)_C$ = الطاقة المفقودة بواسطة الاستطارة الكولومية

$\left(-\frac{dE_\beta}{dx} \right)_{rad}$ = الطاقة المفقودة بالإشعاع

وتعتمد مساهمة كل حد على طاقة الجسيمة وعلى طبيعة المادة. ويصبح فقدان الطاقة بالإشعاع مهما كلما زادت طاقة بيتا (E_β) ، وكلما زاد العدد الذري للمادة .

اما بالنسبة لمدى جسيمات بيتا فليس هناك معادلة نظرية تربط بين المدى والطاقة انما هناك عدة معادلات تجريبية تعتمد على طاقة الجسيمات . فمثلا :

$$R_\beta \left(\frac{mg}{cm^2} \right) = 412 T_\beta^{(1.265-0.095 \ln T_\beta)} \quad \text{for } T_\beta < 2.5 \text{ MeV}$$

$$R_\beta \left(\frac{mg}{cm^2} \right) = 530 T_\beta - 106 \quad \text{for } T_\beta > 2.5 \text{ MeV}$$

ملاحظة / ان مدى جسيمات بيتا في مادة ما يمثل معدل طول المسافة المستقيمة من نقطة دخولها في المادة الى نقطة توقفها وذلك لعشوائية تصادمها وعشوائية ما تفقده في كل تصادم ، اضافة لكون مسارها بشكل خط متعرج وذلك بسبب كتلتها القليلة ، فهي التي تستجيب فتتحرف عند تنافرها مع الكثرونات المادة او تجاذبها مع نوى المادة.

❖ تفاعل النيوترونات مع المادة :-

ان النيوترون متعادل الشحنة لذا فهو لا يتفاعل مع الكثرونات الذرات ، اي انها لا تهيج ولا تؤين الذرات . فعليه فتفاعل النيوترونات مع المادة يكون مقتصر على تفاعلها مع نوى الذرات . ويمكن تقسيم تفاعلات النيوترون مع النواة الى قسمين رئيسيين :

1-الاستطارة (Scattering) حيث يتفاعل النيوترون مع النواة ويظهر كلا الجسيمين

(النيوترون والنواة) بعد التفاعل ، ويمكن ان تكون الاستطارة مرنة او غير مرنة .

أ. الاستطارة المرنة (elastic scattering) : حيث تكون فيها الطاقة الحركية

وكذلك الزخم الخطي للجسيمين المتصادمين محفوظة (Conserved).

ب. الاستطارة غير المرنة (Inelastic scattering): حيث لا يحفظ قانون الطاقة

الحركية وذلك لان جزءا من الطاقة الحركية يعطى الى النواة بشكل طاقة تهيج

، وبعد التصادم يمكن ان تنحل النواة المتهيجة باعطاء اشعة كاما مثلا.

ملاحظة / ان تفاعلات الاستطارة النيوترونية هي المسؤولة عادة عن تبطئة النيوترونات في المفاعلات النووية .

2-الامتصاص (Absorption): وهنا يختفي النيوترون المتفاعل مع النواة نتيجة

امتصاصه من قبل النواة ، ويمكن ان يظهر واحد او اكثر من الجسيمات بعد ان

يتم التفاعل .

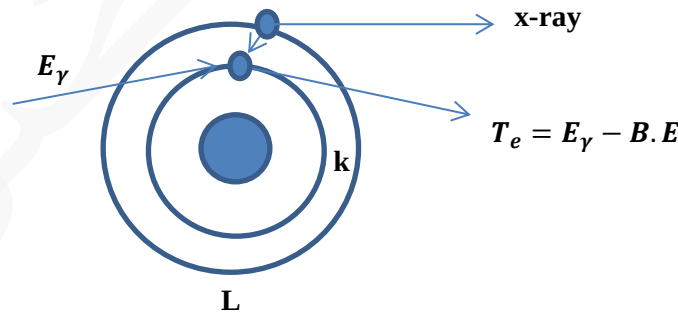
❖ تفاعل اشعة كاما مع المادة :-

ان اشعة كاما هي الاسم الذي يطلق عادة على الاشعاع الكهرومغناطيسي الذي يكون اصله من النواة. ان هذا الاشعاع عادة هو ذات طول موجي اقل من (10^5 F) او بمعنى اخر تكون طاقة فوتوناته اكبر من (0.1 MeV) .

وعلى الرغم من تعدد آليات تفاعل فوتون اشعة كاما مع المادة ، فان الاليات الرئيسية الثلاث التي تستقطب الاهتمام تتمثل بالظاهرة الكهروضوئية واستطارة كومبتون وانتاج الزوج وذلك بسبب احتمالية حدوثها العالية مقارنة بالتفاعلات الاخرى للفوتونات . وفيما يأتي شرح مختصر لاساسيات هذه العمليات الثلاث :-

1-التأثير الكهروضوئي (Photoelectric effect):-

في هذه الظاهرة تمتص طاقة الفوتون (اشعة كاما) الساقط كلياً من قبل الكترون مرتبط بالمدارات الداخلية للذرة ، وبهذا سوف يختفي الفوتون وينفصل الالكترون عن الذرة تاركا اياها ايونا موجبا وكما موضح بالشكل ادناه :



ان الطاقة الحركية التي سينطلق بها الالكترون المتحرر هي :-

$$T_e = E_\gamma - B.E$$

حيث T_e = الطاقة الحركية للالكترون المتحرر

E_γ = طاقة الفوتون الساقط

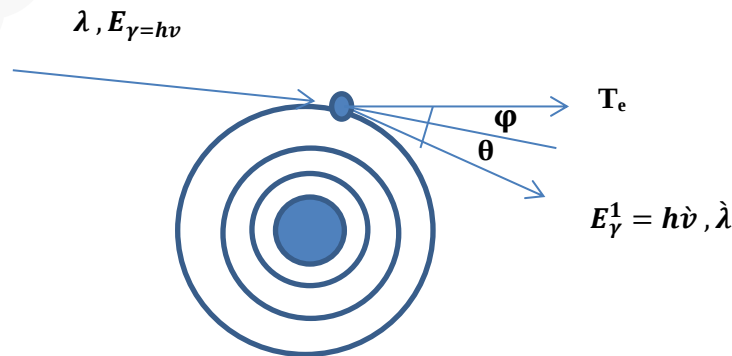
$B.E =$ طاقة ارتباط الالكترون بالذرة وتسمى أيضاً بدالة الشغل

وعادة تخلق فجوة في القشرة الذرية (k) نتيجة لذلك . ان الالكترونات من القشرة الاعلى ستشغل هذه الفجوة باعثة اشعة سينية مميزة ، وان هذه الاشعة السينية بدورها يمكن ان تمتص من الالكترونات الخارجية وتسمى الالكترونات المزاحة نتيجة لذلك ، اي عن طريق امتصاصها الاشعة السينية بالالكترونات أوكـ Auger Electrons.

ان احتمالية التفاعل بهذه الظاهرة تتناسب عكسيا مع طاقة الفوتون الساقط وطرديا مع العدد الذري للمادة الماصة حيث ان هذه الظاهرة تسود ضمن طاقات الفوتون الواطئة وللمواد ذي الاعداد الذرية الكبيرة. (التناسب يكون مع Zn حيث $n=3-5$).

2- استقطار كومبتون Compton scattering :-

وهي استقطار تحدث بين الفوتون الساقط والالكترونات المدارات الخارجية للذرات اذ تكون تلك الالكترونات ضعيفة الارتباط بالنواة مما يسبب فقدان جزء من طاقة الفوتون حيث تعطى الى الالكترون مسببا انبعائه خارج حيز الذرة بزاوية ϕ وبطاقة حركية T_e ، حيث يحافظ فيه كل من الفوتون المستطار بزاوية θ والالكترون المتحرر على قانون حفظ الطاقة والزخم وكما موضح بالشكل ادناه :-



وان الطاقة الحركية للالكترون المتحرر توضح بالعلاقة الاتية :

$$T_e = h\nu - h\nu' = E_\gamma - E_\gamma' \quad \dots\dots\dots(1)$$

وليجاد العلاقة بين الطول الموجي للفوتون الساقط والمستطار نتبع ما يلي.

بتطبيق قانون حفظ الزخم وكالاتي :

$$P_\gamma = \dot{P}_\gamma \cos \theta + P_e \cos \phi$$

$$\therefore P_e^2 \cos^2 \phi = (P_\gamma - \dot{P}_\gamma \cos \theta)^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$0 = \dot{P}_\gamma \sin \theta - P_e \sin \phi$$

$$\therefore P_e^2 \sin^2 \phi = \dot{P}_\gamma^2 \sin^2 \theta \dots\dots\dots (3)$$

بجمع (2) ، (3) ينتج :

$$P_e^2 = P_\gamma^2 - 2P_\gamma \dot{P}_\gamma \cos \theta + \dot{P}_\gamma^2 \cos^2 \theta + \dot{P}_\gamma^2 \sin^2 \theta$$

$$\therefore P_e^2 = P_\gamma^2 + \dot{P}_\gamma^2 - 2P_\gamma \dot{P}_\gamma \cos \theta \dots\dots\dots (4)$$

بتطبيق قانون حفظ الطاقة :

$$E^2 = P^2 C^2 + m_0^2 C^4 \quad \text{بشكل عام}$$

$$\therefore E_\gamma + E_{e_0} = \dot{E}_\gamma + E_e$$

$$P_\gamma C + m_0 C^2 = \dot{P}_\gamma C + \sqrt{P_e^2 C^2 + m_0^2 C^4}$$

$$\sqrt{P_e^2 C^2 + m_0^2 C^4} = P_\gamma C - \dot{P}_\gamma C + m_0 C^2 = C(P_\gamma - \dot{P}_\gamma) + m_0 C^2$$

$$P_e^2 C^2 + m_0^2 C^4 = C^2 (P_\gamma - \dot{P}_\gamma)^2 + 2m_0 C^3 (P_\gamma - \dot{P}_\gamma) + m_0^2 C^4$$

$$\therefore P_e^2 = P_\gamma^2 - 2P_\gamma \dot{P}_\gamma + \dot{P}_\gamma^2 + 2m_0 C (P_\gamma - \dot{P}_\gamma) = P_\gamma^2 + \dot{P}_\gamma^2 - 2P_\gamma \dot{P}_\gamma \cos \theta$$

$$m_0 C (P_\gamma - \dot{P}_\gamma) = P_\gamma \dot{P}_\gamma - P_\gamma \dot{P}_\gamma \cos \theta \quad (\div m_0 C)$$

$$P_\gamma - \dot{P}_\gamma = \frac{1}{m_0 C} P_\gamma \dot{P}_\gamma (1 - \cos \theta)$$

$$\frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} = \frac{1}{m_0 C} \left(\frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} \right) (1 - \cos \theta).$$

$$\frac{h(\lambda - \lambda)}{\lambda \lambda} = \frac{h^2}{m_0 c (\lambda \lambda)} (1 - \cos \theta)$$

$$\therefore \lambda - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \quad \text{.....(5) حفظ}$$

اما لاشتقاق طاقة الفوتون المستطار بزاوية θ فمن معادلة (5) لدينا :-

$$\frac{c}{\lambda} - \frac{c}{\lambda} = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \quad \div ch$$

$$\frac{1}{h\lambda} - \frac{1}{h\lambda} = \frac{1}{m_0 c^2} \cdot (1 - \cos \theta)$$

$$\therefore \frac{1}{E_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma} = \frac{1}{m_0 c^2} \cdot (1 - \cos \theta)$$

$$\frac{E_\gamma - E_\gamma}{E_\gamma E_\gamma} = \frac{1}{m_0 c^2} \cdot (1 - \cos \theta)$$

ومنها نستنتج :

$$E_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad \text{..... (6) تحفظ}$$

وباستخدام المعادلتين (1) ، (6) يمكن استنتاج معادلة الطاقة الحركية للإلكترون المرتد :

$$T_e = E_\gamma - \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad \text{..... (7) تحفظ}$$

ملاحظة/ ان اقل طاقة للفوتون المستطار تحصل عندما تكون $(\theta = \pi)$ وهي تقابل اكبر طاقة للإلكترون المرتد ، حيث نحصل من معادلة (6) على علاقة اقل طاقة للفوتون :

$$E_{\gamma min} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{2E_\gamma}{m_0 c^2}} = \frac{E_\gamma}{1 + 4E_\gamma} \quad \text{..... (8) تحفظ قمة الاستطارة الخلفية}$$

ومن معادلة (7) نحصل على علاقة اكبر طاقة للإلكترون المرتد :

$$T_{e max} = E_\gamma - \frac{E}{1 + 4E_\gamma} = \frac{4E_\gamma^2}{1 + 4E_\gamma} \quad \text{..... (9) تحفظ حافة كومبتن}$$

اما أعلى طاقة للفوتون المستطار فتحصل عند $\theta = 0^\circ$ اي ان :

$$E_{\gamma_{max}} = E_{\gamma} , \quad T_{e_{min}} = 0$$

ان احتمالية التفاعل بهذه الظاهرة تتناسب مع العدد الذري Z ، حيث تسود هذه الظاهرة ضمن طاقات الفوتون المتوسطة وللمواد ذي الاعداد الذرية القليلة .

3-انتاج الزوج (pair production):

يمكن للفوتون ان يتحول الى مادة على شكل زوج الكترون - بوزترون . ان مثل هذا التفاعل يحدث بجوار المجال الكولومي للنواة وذلك لكي يكون الزخم الخطي محفوظا بمساعدة النواة التي تأخذ جزءا من زخم الفوتون في عملية التحويل . ان الطاقة السكونية m_0c^2 لكل من الالكترون والبوزترون تساوي 0.511 MeV ، لذلك فان انتاج زوج الكترون - بوزترون يتطلب في الاقل فوتونا طاقته تساوي $2 \times 0.511 = 1.022 \text{ MeV}$. واي زيادة في طاقة الفوتون عن هذا المقدار تظهر بشكل طاقة حركية للالكترون والبوزترون حيث :-

$$T_{e^-} + T_{e^+} = E_{\gamma} - 1.022 \text{ MeV}$$

ان احتمالية التفاعل بهذه الظاهرة تتناسب مع مربع العدد الذري Z^2 ، حيث تسود هذه الظاهرة ضمن طاقات الفوتون العالية وللمواد ذي الاعداد الذرية الكبيرة .

ويمكن لمعكوس هذه الظاهرة ان يحدث أيضاً ، فعند اتحاد الكترون وبوزترون تخرج اشعة كاما في عملية معاكسة لعملية انتاج الزوج والتي تسمى بعملية الفناء (annihilation process) ، حيث ان البوزترون هو جسيمة مشحونة بشحنة موجبة وكتلتها بقدر كتلة الالكترون فهو يفقد طاقته عن طريق التأين وكذلك عن طريق اشعة الكبح ، وبعد ان يقوم البوزترون بالعديد من التصادمات مع الكترونات الذرات تصبح طاقته قليلة جدا وقريبة من الصفر ، عندها يتحد مع الالكترونات التي تكون عمليا ساكنة

أيضاً حيث يختفي البوزترون والالكترون ويخرج بدلا منهما فوتونان باتجاهين متعاكسين ($\theta=180^\circ$) وذلك لتحقيق قانون حفظ الزخم الخطي ، وكل فوتون يملك طاقة مقدارها 0.511 MeV، اي بقدر طاقة سكون البوزوترون او الالكترون .

❖ توهين اشعة كاما (Attenuation of gamma rays):

ان عملية توهين حزمة من اشعة كاما خلال مرورها في وسط معترض تختلف اختلافا جوهريا عما يجري بالنسبة لحزمة من الجسيمات الثقيلة المشحونة ، فاذا مرت اشعة كاما خلال المادة فان كل فوتون في الاشعة سوف يكون امامه اما الا يتفاعل على الاطلاق او انه سوف يتم حذفه كليا من الحزمة بواسطة الامتصاص او الاستطارة وهذا يؤدي الى توهين (تضعيف) أسي بزيادة سمك الوسط الممتص.

لو فرضنا ان كمية من الاشعة مقدارها I_0 لكل وحدة زمن قد سقطت على وسط بصورة عمودية ، فعلى فرض ان سمك الوسط هو (x) ، فان نقصان الشدة بمقدار dI بسبب نفوذها مسافة (dx) في المادة يتناسب تناسباً طردياً مع الشد I ومع السمك dx : (شكل رقم 1)

$$dI \propto I dx$$

$$dI = -\mu I dx \quad \dots\dots\dots(1)$$

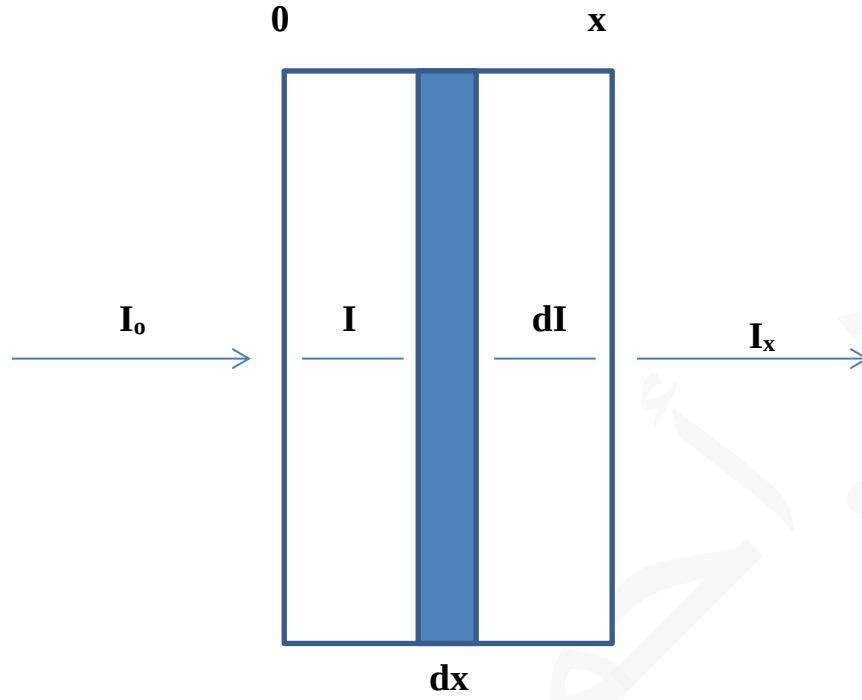
لقد ادخلت علامة السالب للدلالة على النقصان في الشدة (او النقصان بعدد الفوتونات).

μ : ثابت التناسب ويسمى معامل التوهين الخطي ويمكن تعريفه بأنه النقصان النسبي لعدد الفوتونات لكل وحدة مسافة . وحدة قياسه (1/cm)

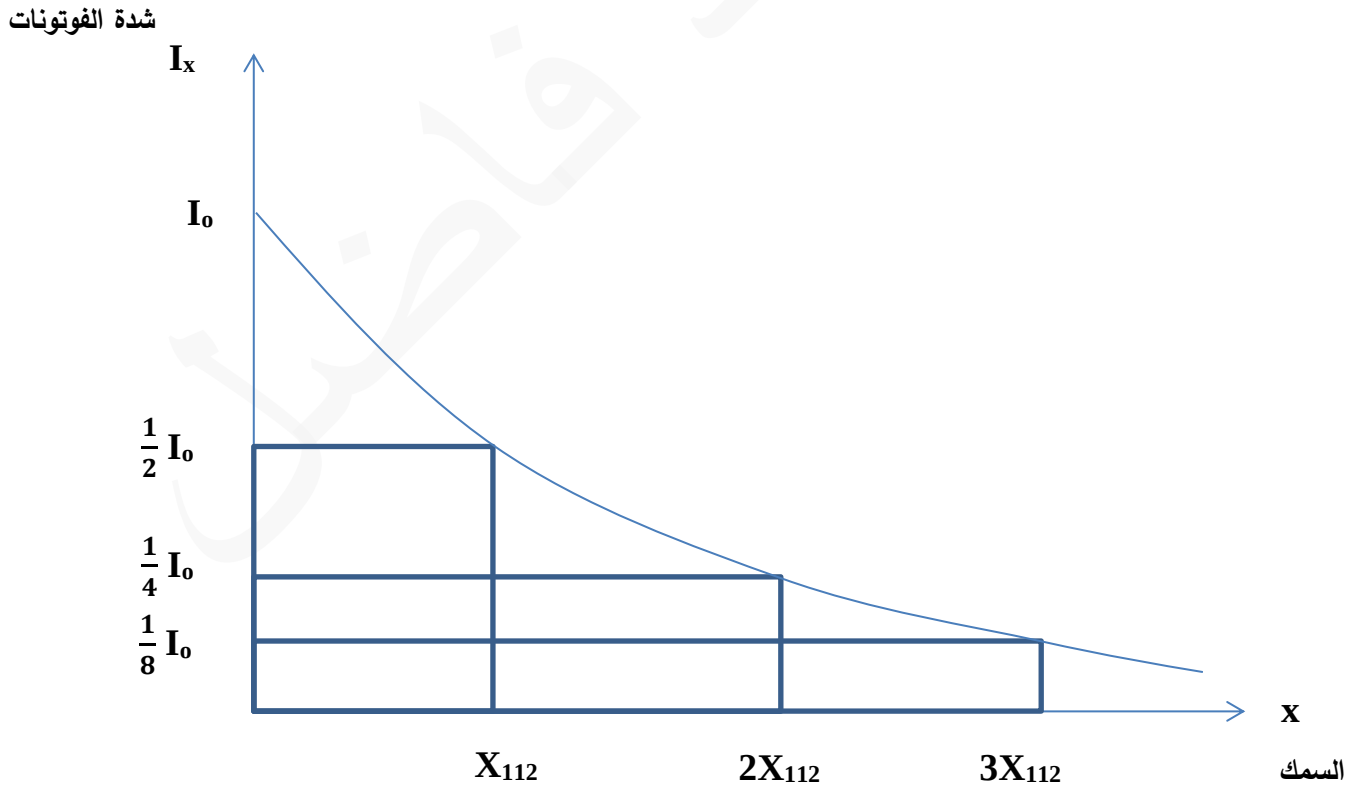
$$\int_{I_0}^{I_x} \frac{dI}{I} = \int_0^x -\mu dx \quad \text{وبتكامل المعادلة (1) وكالاتي :}$$

$$\ln \left(\frac{I_x}{I_0} \right) = -\mu x \rightarrow \frac{I_x}{I_0} = e^{-\mu x} \rightarrow I_x = I_0 e^{-\mu x}$$

حيث I_x تمثل شدة الجزء غير المتأثر من الحزمة. (شكل رقم 2)



شكل (1) شدة الأشعة عند نقاط مختلفة في الوسط



شكل (2) منحنى التوهين

ملاحظة / ان السمك اللازم لتوهين الحزمة الى نصف شدتها الاصلية يسمى بسمك نصف القيمة half- value thickness حيث نعوض في المعادلة اعلاه :

$$\frac{I_o}{2} = I_o e^{-\mu x_{1/2}} \rightarrow \ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\mu x_{1/2}$$

$$0-0.693 = -\mu x_{1/2} \rightarrow x_{1/2} = \frac{0.693}{\mu}$$

وبما ان فوتونات اشعة كاما تتفاعل مع المادة باحدى ثلاث طرق والتي هي الظاهرة الكهروضوئية واستطارة كومبتن وانتاج الزوج فيمكن كتابة :

$$\mu = \mu_{ph} + \mu_c + \mu_{pair}$$

حيث μ : معامل التوهين الخطي الكلي

μ_{ph} : معامل التوهين الخطي بفعل الظاهرة الكهروضوئية

μ_c : معامل التوهين الخطي بفعل استطارة كومبتن

μ_{pair} : معامل التوهين الخطي بفعل انتاج الزوج

وبالحقيقة ان قيم μ تتفاوت كثيرا من مادة الى اخرى ، كما ان μ تتناسب طرديا مع عدد الذرات في وحدة الحجم من المادة ، ولهذا فانه من المفيد ان تعرف ما يسمى بمعامل التوهين الكتلي mass attenuation coefficient ويرمز له بالرمز μ_m حيث :

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{cm^2}{mg} \right)$$

حيث ρ تمثل كثافة الوسط .

ولغرض ابقاء معادلة التوهين صحيحة يجب ضرب السمك (x) بكثافة المادة

$$\therefore I_x = I_o e^{-\mu_m \rho x}$$

س1/ ما هو سمك الرصاص المطلوب لتخفيض شدة اشعة كاما المنبعثة من عنصر الثوريوم الى 0.01 من قيمتها الاصلية علما ان قيمة معامل التوهين الخطي $\mu = 0.45 \text{ cm}^{-1}$ ؟

الحل/

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

$$0.01 = e^{-\mu x} \rightarrow \ln(0.01) = -0.45 x$$

$$-4.605 = -0.45 x \rightarrow x = \frac{4.605}{0.45} = 10.23 \text{ cm}$$

س2/ ما هو سمك الالمنيوم المطلوب لتخفيض اشعة كاما طاقتها 200 KeV الى (10%) من قيمتها الاصلية ؟ علما ان سمك نصف القيمة عند الطاقة 200keV في الالمنيوم هو (2.14 cm) ؟

$$\mu = \frac{0.693}{x_{1/2}} = \frac{0.693}{2.14} = 0.324 \text{ cm}^{-1}$$

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \rightarrow 0.1 I_0 = I_0 e^{-(+0.324)x}$$

$$\ln(0.1) = -0.324 x \rightarrow x = \frac{2.3}{0.324} = 7.1 \text{ cm}$$