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

١-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 .

٢-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 .

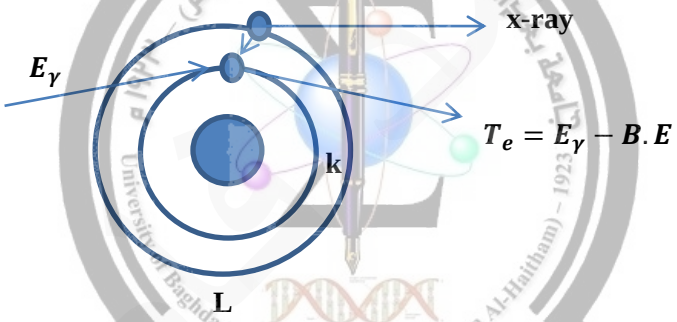
تفاعل اشعة كاما مع المادة :-

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 الرئيسة 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 :-

١-التأثير الكهروضوئي (Photoelectric effect):-

في هذه الظاهرة تمتص طاقة الفوتون (اشعة كاما) الساقط كليا 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

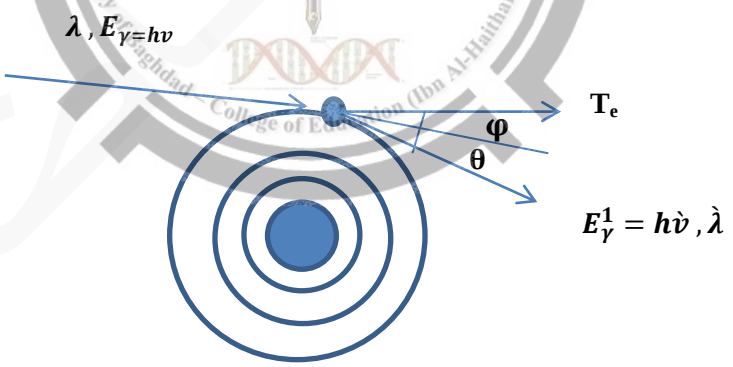
وعادة تخلق فجوة في القشرة الذرية (k) نتيجة لذلك . ان الالكترونات من القشرة الاعلى ستشغل هذه الفجوة باعثة اشعة سينية مميزة ، وان هذه الاشعة السينية بدورها يمكن ان

تمتص من الالكترونات الخارجية وتسمى الالكترونات المزاحة نتيجة لذلك ، اي عن طريق امتصاصها الاشعة السينية بالكترونات أوكر 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).

٢-استطارة كومبتون Compton scattering :-

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



وان الطاقة الحركية للالكترون المتحرر توضح بالعلاقة الاتية :

$$T_e = h\nu - h\grave{\nu} = E_\gamma - \grave{E}_\gamma \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

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

بتطبيق قانون حفظ الزخم وكالاتي :

$$P_\gamma = \grave{P}_\gamma co\ s\theta + P_e\ co\ s\phi$$

$$\therefore P_e^2 co\ s\ \phi = \left(P_\gamma - \grave{P}_\gamma co\ s\right)^2\theta \text{ ..... (2)}$$

$$0 = \grave{P}_\gamma s\ in\ \theta - P_e s\ in\ \phi$$

$$\therefore P_e^2 s\ in^2\emptyset = \grave{P}_\gamma^2 s\ in^2\theta \text{ ..... (3)}$$

بجمع (2) ، (3) ينتج :

$$P_e^2 = P_\gamma^2 - 2P_\gamma \grave{P}_\gamma co\ s\ \theta + \grave{P}_\gamma^2 co\ s^2\theta + \grave{P}_\gamma^2 s\ in^2\theta$$

$$\therefore P_e^2 = P_\gamma^2 + \grave{P}_\gamma^2 - 2P_\gamma \grave{P}_\gamma co\ s\ \theta \text{..... (4)}$$

بتطبيق قانون حفظ الطاقة :

$E^2=P^2C^2+ m^2_o C^4$ بشكل عام

$$\therefore E_\gamma + E_{e_o} = \grave{E}_\gamma + E_e$$

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

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

$$P_e^2 C^2 + m_o^2 C^4 = C^2(P_\gamma - \grave{P}_\gamma)^2 + 2m_o C^3\left(P_\gamma - \grave{P}_\gamma\right) + m_o^2 C^4$$

$$\therefore P_e^2 = P_\gamma^2 - 2P_\gamma \grave{P}_\gamma + \grave{P}_\gamma^2 + 2m_o C\left(P_\gamma - \grave{P}_\gamma\right) = P_\gamma^2 + \grave{P}_\gamma^2 - 2P_\gamma \grave{P}_\gamma co\ s\ \theta$$

$$m_o C\left(P_\gamma - \grave{P}_\gamma\right) = P_\gamma \grave{P}_\gamma - P_\gamma \grave{P}_\gamma co\ s\ \theta \ (\div m_o C)$$

$$P_\gamma - \grave{P}_\gamma = \frac{1}{m_o C} P_\gamma \grave{P}_\gamma (1 - co\ s\ )\theta$$

$$\frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\grave{\lambda}} = \frac{1}{m_o C}\left(\frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\grave{\lambda}}\right)(1 - co\ s\ )\theta$$

$$\frac{h(\grave{\lambda}-\lambda)}{\lambda\grave{\lambda}} = \frac{h^2}{m_o C(\lambda\grave{\lambda})}(1 - co\ s\theta)$$

$$\therefore\ \grave{\lambda} - \lambda = \frac{h}{m_o C}(1 - co\ s\theta) \quad \text{.....(5) حفظ}$$

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

$$\frac{C}{\grave{\nu}} - \frac{C}{\nu} = \frac{h}{m_o C}(1 - co\ s)\theta \qquad \div ch$$

$$\frac{1}{h\grave{\nu}} - \frac{1}{h\nu} = \frac{1}{m_o C^2}.(1 - co\ s)\theta$$

$$\therefore \frac{1}{\grave{E_\gamma}} - \frac{1}{E_\gamma} = \frac{1}{m_o C^2}.(1 - co\ s)\theta$$

$$\frac{E_\gamma - \grave{E_\gamma}}{\grave{E_\gamma} E_\gamma} = \frac{1}{m_o C^2}.(1 - co\ s)\theta$$

ومنها نستنتج :

$$\grave{E_\gamma} = \frac{E_\gamma}{1+\frac{E_\gamma}{m_o C^2}(1-co\ s)\theta} \quad \text{..... (6) تحفظ}$$

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

$$T_e = E_\gamma - \frac{E_\gamma}{1+\frac{E_\gamma}{m_o C^2}(1-co\ s)\theta} \quad \text{..... (7) تحفظ}$$

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

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

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

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

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

$$\grave{E}_{\gamma_{max}} = E_\gamma$$

$$T_{e_{min}} = 0$$

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

٣-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_oC^2 لكل من الالكترون والبوزترون تساوي 0.511 MeV ، لذلك فان انتاج زوج الكترون – بوزترون يتطلب في الاقل فوتونا طاقته تساوي $2\times0.511=1.022$ MeV. واي زيادة في طاقة الفوتون عن هذا المقدار تظهر بشكل طاقة حركية للالكترون والبوزترون حيث :-

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

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 وبوزوترون تخرج اشعة كاما في عملية معاكسة لعملية انتاج الزوج والتي تسمى بعملية الفناء (annihilation process) ، حيث ان البوزوترون 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 (θ=180^o) 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_o 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 تناسبا طرديا مع الشد I ومع السمك dx : (شكل رقم 1)

$$dI \alpha I\, dx$$

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

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

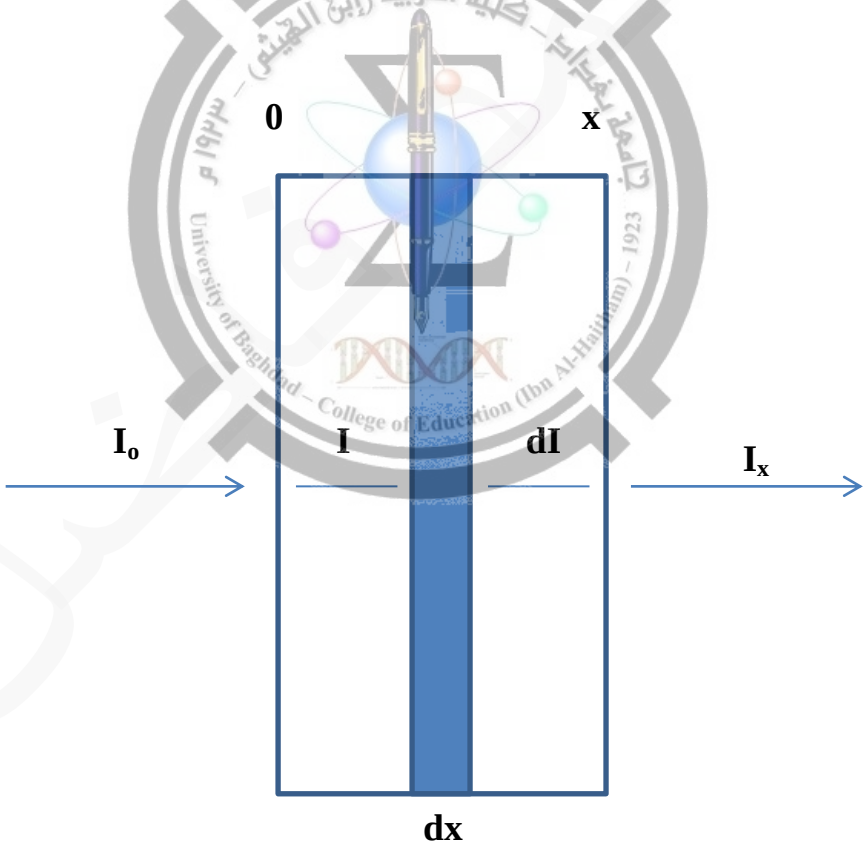
μ : ثابت التناسب ويسمى معامل التوهين الخطي ويمكن تعريفه بانه النقصان النسبي لعدد الفوتونات لكل وحدة مسافة . وحدة قياسه (1/cm)

وبتكامل المعادلة (1) وكالاتي :

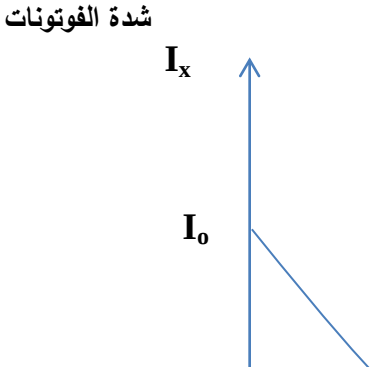
$$\int_{I_0}^{I_x} \frac{dI}{I} = \int_0^x -\mu dx$$

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

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



شكل (١) شدة الاشعة عند نقاط مختلفة في الوسط



جامعة بغداد – كلية التربية (ابن الهيثم) – ١٩٢٣ م
University of Baghdad – College of Education (Ibn Al-Haitham) – 1923

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

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

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

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

$$\mu = \mu_{p\ h} + \mu_c + \mu_{pair}$$

حيث μ : معامل التوهين الخطي الكلي

$\mu_{p\ h}$: معامل التوهين الخطي بفعل الظاهرة الكهروضوئية

μ_c : معامل التوهين الخطي بفعل استطارة كومبتن

$\mu_{p\ air}$: 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 :

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

حيث ρ تمثل كثافة الوسط .

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

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

س١/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 $\mu = 0.45\ cm^{-1}$ ؟

الحل/

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

0.01 = $e^{-\mu x}$ **→ Ln(0.01)= - 0.45 x**

-4.605 = -0.45 x → $x = \frac{4.605}{0.45}$ **= 10.23 cm**

س٢/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) ؟

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

$I_x = I_o\ e^{-\mu x}$ **→ 0.1** $I_o = I_o\ e^{-(+0.324)x}$

Ln(0.1)= -0.324 x → $x = \frac{2.3}{0.324} = 7.1$ **cm**