

الفصل الثالث : تفاعل الأشعة النووية مع المادة *Interaction of nuclear radiation with matter*

إن دراسة تفاعل الأشعة النووية مع المادة تكون ضرورية لمعرفة قياسات الإشعاع المؤين ، لان كشف الإشعاع المؤين مبني على اساس تفاعله ومقدار الطاقة المفقودة داخل المادة التي يتفاعل معها. ان بناء الكواشف النووية وتفسير نتائج القياسات وكذلك حسابات التدريع للمواد تتطلب المعرفة والإلمام بكيفية تفاعل الأشعة النووية مع المادة. وبصورة رئيسية ، يمكن تقسيم الإشعاع المؤين الى :

1. الجسيمات المشحونة : مثل الالكترون e^- والبوزترون e^+ والبروتون p والديوترون d وجسيم الفا α والجسيمات المشحونة الثقيلة الاخرى $(A > 4)$.
2. فوتونات : مثل اشعة كاما gamma-rays والاشعة السينية x-rays .
3. النيوترونات.

أولاً : تفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة

ان الجسيم المشحون اثناء دخوله في وسط مادي معين فانه يمكن ان يتفاعل مع الالكترونات الذرية او مع نواة الذرة. واحتمالية التفاعل مع الالكترونات الى احتمالية التفاعل مع النواة يمكن ان تتناسب مع نصف القطر لكل من الذرة والنواة ، أي :

$$\frac{R_{atom}^2}{R_{nucleus}^2} \approx \left(\frac{10^{-10}}{10^{-14}} \right)^2 \approx 10^8$$

لذلك سنتركز دراستنا لتفاعلات الجسيم المشحون على التصادمات مع الالكترونات الذرية فقط. يمكن ان تنتقل الطاقة من الجسيم المشحون الى الالكترون في الذرة متسببة في حدوث تايين ionization او تهيج excitation لحالة الالكترون.

في حالة التايين يمكن ان يتحرر الالكترون بطاقة حركية :

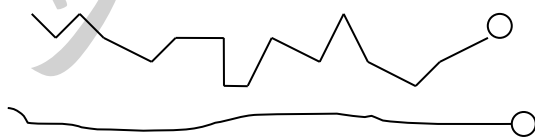
$$(K.E)_e = \text{energy given by charged particle} - \text{ionization potential}$$

إن الإلكترون المتحرر يمكن ان يقوم ايضاً بتأيين ذرة اخرى. تسمى الإلكترونات السريعة الناتجة من التصادمات المؤينة باشعة دلتا δ (delta-rays). اما التهيج فيحدث عندما يكتسب الالكترون طاقة كافية ليتحرك الى حالة خالية empty state بمدار اخر وبطاقة اعلى ، ويمكن ان تعود الذرة الى حالة اكثر استقراراً عن طريق بعث فوتون اشعة سينية.

Stopping Power

قدرة الايقاف :

عندما يكون الجسيم المشحون المتفاعل هو الكترون او بوزترون (له نفس كتلة الالكترون ولكن بشحنة موجبة) فيمكن ان يفقد كل طاقته بالتصادم مع الكترون ذري في المادة عن طريق تصادم مفرد single collision فقط. ويمكن ايضاً ان تستطار الالكترونات او البوزترونات بزوايا كبيرة لذلك يكون مسارها نتيجة لهذا بشكل منعطف zig - zag. اما الجسيمات المشحونة الثقيلة فانها بالمعدل تفقد طاقة اقل لكل تصادم ومن الصعب حرفها بواسطة الالكترونات الذرية لذلك يكون مسارها تقريباً بشكل خط مستقيم .



Electron, positron trajectory

heavy charged particle trajectory

الفصل الثالث : تفاعل الأشعة النووية مع المادة *Interaction of nuclear radiation with matter*

إن معادلة قدرة الايقاف للجسيم المشحون داخل المادة يمكن أن تشتق كما يلي :

إن مقدار الخسارة في الطاقة الحركية للجسيم سيساوي مقدار الزيادة في الطاقة الحركية للإلكترون ، والتي يمكن حسابها من معرفة الدفع الذي يعطى للإلكترون. وإن القوة ما بين الجسيم المشحون والإلكترون هي قوة كولوم (القوة F كما في الشكل). نعتبر أن شحنة الجسيم هي Ze وكتلته M_0 وسرعته v وعامل أو بعد التصادم impact parameter ما بين الجسيم والإلكترون هو b .

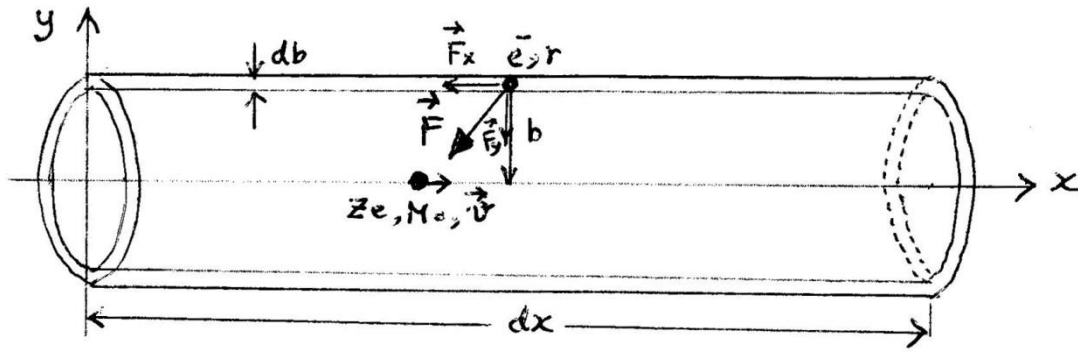
الدفع باتجاه المحور X يساوي :

$$\int F_x dt \approx 0 = P_x$$

أما الدفع باتجاه المحور Y فيساوي :

$$\int F_y dt = P_e$$

حيث أن P_e هو الزخم المعطى للإلكترون.



إن المدة الزمنية التي يستغرقها التصادم تساوي $\Delta t \approx b/v$ ومعدل قوة كولوم خلالها يساوي :

$$(F_y)_{ave} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{b^2}$$

اذن يكون زخم الإلكترون :

$$P_e \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{b v}$$

وهذه علاقة تقريبية. إن دقة أكثر لزخم الإلكترون يمكن الحصول عليها من تطبيق قانون كاوس

: Gauss's law

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

حيث E شدة المجال الكهربائي عند السطح الذي يحيط بالفراغ الذي تقع داخله الشحنة q ، ds عنصر المساحة للسطح. إن تطبيق قانون كاوس على السطح الاسطواني المبين في الشكل بنصف قطر b ، يعطى :

$$\int \frac{F_y}{e} \cdot 2\pi b dx = \frac{Ze}{\epsilon_0}$$

ولما كان $dx = v dt$ وهي المسافة التي يسيرها الجسيم الثقيل خلال مدة زمنية dt ، فإن :

$$\int F_y dt = \frac{Ze^2}{2\pi b \epsilon_0 v} = P_e$$

الفصل الثالث : تفاعل الأشعة النووية مع المادة *Interaction of nuclear radiation with matter*

حيث تم الحصول على قيمة أكثر دقة للمقدار P_e . أما الطاقة الحركية التي فقدها الجسيم الثقيل واكتسبها الإلكترون فتساوي :

$$\frac{P_e^2}{2m_e} = \frac{Z^2 e^4}{8\pi^2 b^2 m_e \epsilon_0^2 v^2}$$

فإذا فرضنا أن عدد الذرات لوحدة الحجم هو n وكل ذرة تحتوي على Z من الإلكترونات فالمسار الذي طوله dx يحتوي على $nZ \cdot 2\pi b db$ من الإلكترونات ما بين b و $b + db$ من مسار الجسيم المشحون. وعليه فإن مقدار الخسارة في طاقة الجسيم لكل وحدة طول من المسار ستساوي :

$$\begin{aligned} -\frac{dE}{dx} &= \int_{b_{min}}^{b_{max}} nZ \cdot 2\pi b db \cdot \frac{Z^2 e^4}{8 m_e (\pi b \epsilon_0 v)^2} \\ &= \frac{Z^2 e^4 zn}{4 m_e \pi v^2 \epsilon_0^2} \ln \frac{b_{max}}{b_{min}} \end{aligned}$$

أن زمن التصادم Δt يجب أن يكون أقل من المدة الزمنية لدوران الإلكترون في الذرة في مداره لكي يحصل انتقال للطاقة للإلكترون ، أي أن : $\Delta t_{max} \approx \frac{1}{v}$. حيث v هو تردد الحركة الدورانية للإلكترون. ولما كان $\Delta t \approx \frac{b}{v}$ ، إذن يكون لدينا : $b_{max} \approx \frac{v}{v}$ ، أما أقل قيمة لعامل التصادم b_{min} فيمكن حسابها من قاعدة عدم التحديد uncertainty principle ، $\Delta P_x \Delta x \approx h$ ، إذن : $b_{min} \approx \frac{h}{m_e v}$.

لذلك وبعد التعويض عن المقدار $h\nu$ بمعدل جهد التهيج والتأين I_{ave} للذرات في المادة وبعد الضرب بعامل مقداره 2 كتصحيح للمقدار داخل اللوغارتم الطبيعي لكي تطابق النتيجة الحسابات الدقيقة التي تعتمد ميكانيك الكم ، نحصل على :

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{Z^2 e^4 zn}{4 \pi v^2 \epsilon_0^2} \ln \frac{2 m_e v^2}{I_{ave}}$$

ان قدرة الايقاف :

1. لا تعتمد على كتلة الجسيم المشحون .

2. تتناسب مع Z^2 للجسيم .

3. تعتمد على سرعة الجسيم .

4. تتناسب مع كثافة المادة التي تسير خلالها .

وإذا كان هناك جسيमान مشحونان لهما العدد الذري Z_1, Z_2 ويسيران بنفس السرعة v وبفس

المادة ، فإن :

$$\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_1}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_2} = \frac{Z_1^2}{Z_2^2}$$

فإذا رمزنا لقدرة الايقاف لجسيم ألفا بـ SP_α وللبروتون بـ SP_p فإن :

$$\frac{SP_\alpha}{SP_p} = \frac{2^2}{1^2} = 4 \Rightarrow SP_\alpha = 4 SP_p$$

الفصل الثالث : تفاعل الأشعة النووية مع المادة *Interaction of nuclear radiation with matter*

ان طاقة جسيم α تساوي $E_\alpha = \frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2$ وطاقة البروتون تساوي $E_p = \frac{1}{2}m_p v_p^2$ ، فلحالة $v_\alpha = v_p$ فان :

$$E_\alpha = \frac{m_\alpha}{m_p} E_p = \frac{4}{1} E_p = 4 E_p$$

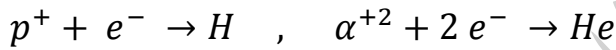
ان الجسيم المشحون عندما يدخل في مادة فانه يفقد طاقة وهذه الطاقة تمتص من قبل ذرات المادة ولذلك فانها تتأين الى ايونات موجبة وايونات سالبة. ان التأين لوحدة المسار يعطى بالعلاقة :

$$\frac{di}{dx} = \frac{dE/dx}{w}$$

حيث w هي الطاقة اللازمة لتوليد زوج ايوني. وفي الهواء فان قيمة w تساوي 15 eV/i.p.

مديات الجسيمات المشحونة داخل المادة :

ان الجسيم المشحون المتحرك داخل المادة يمكن ان يفقد طاقته الحركية عن طريق التفاعلات مع الالكترونات الذرية للمادة او مع نوى الذرات. ان الجسيم المشحون سيتوقف بعد ذلك ملتقاً بالالكترونات من المادة المحيطة ويصبح متعادلاً كحالة :



ان المسافة الكلية التي يسيرها الجسيم المشحون لحين توقفه تسمى طول المسار (S) path length اما سمك المادة التي عندها يتوقف الجسيم المشحون فتسمى بالمدى (R) range للجسيم بتلك المادة. لذلك فان $R \leq S$. ان المدى يمثل معدل طول المسافة التي يسيرها الجسيم المشحون في اتجاه معين قبل ان يفقد طاقته الحركية بصورة كاملة :

$$\bar{R} = \int_0^R dx = \int_{E_0}^0 \frac{dx}{dE} dE = \int_0^{E_0} \left(-\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

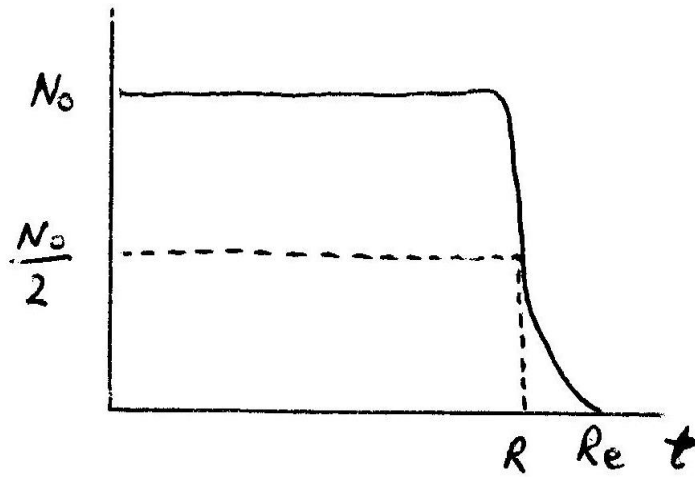
ان المدى للجسيم المشحون قد يكون اكثر او اقل بقليل مما تعطيه العلاقة السابقة وذلك لانه توجد دائماً تغييرات احصائية في كمية الطاقة التي يفقدها الجسيم لكل وحدة طول من مساره وكذلك في العدد الكلي لازواج الايونات المتكونة وهذا التأثير يسمى بالتباين او الترنح Straggling.

ان وحدة المدى هي وحدة الطول m . وهناك وحدة اخرى تستخدم للتعبير عن المدى هي kg/m^2 او g/cm^2 والعلاقة بين الـ وحدتين هي : $R(kg/m^2) = R(m) \times \rho(kg/m^3)$ ، حيث ρ هي كثافة المادة للوسط. ان المدى المقاس بوحدات kg/m^2 لا يعتمد على حالة المادة (صلبة ، سائلة ، غازية).

مديات الجسيمات المشحونة الثقيلة : $Z \leq 2, A \leq 4 (p, d, t, \alpha)$

ان المدى هو كمية محسوبة على اساس المعدل . فالجسيمات من نفس النوع وبنفس الطاقة الحركية والسائدة بنفس الوسط لا تتوقف بعد المسير بنفس السمك بالضبط R . لتتصور تجربة فيها تسقط حزمة متوازية من جسيمات مشحونة ثقيلة لها نفس الطاقة على مادة معينة. وهناك على الجانب الاخر من المادة كاشف detector يسجل الجسيمات التي تعبر المادة. فاذا افترضنا ان اتجاه الجسيمات لا يتغير وان الكاشف سيسجل الجسيمات التي تدخل الى المادة فان عدد الجسيمات التي تقطع سمكا من المادة t سيتغير كما في الشكل .

الفصل الثالث : تفاعل الأشعة النووية مع المادة Interaction of nuclear radiation with matter



يسمى السمك الذي تقل عنده العدادات للكاشف الى النصف من قيمتها الاصلية بمعدل المدى (R) mean range او اختصار المدى. والسمك الذي تصبح عنده $N(t)$ عمليا مساويا للصفر فيسمى بالمدى الممتد (Re) extrapolated range.

هناك علاقات شبه تجريبية للمدى كدالة للطاقة الحركية T للجسيمات. فلجسيمات α في الهواء عند درجة الحرارة والضغط الجوي الاعتياديين فان :

$$R(mm) = \exp[1.61 \sqrt{T}] , 1 < T \leq 4$$

$$R(mm) = [0.05T + 2.85] T^{\frac{2}{3}} , 4 \leq T \leq 15$$

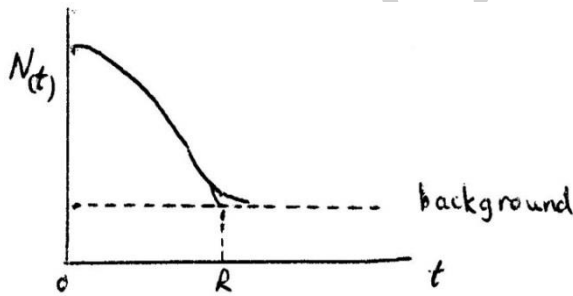
حيث الطاقة الحركية T لجسيم الفا (α) معطاة بوحدات MeV. وعندما يكون المدى معروفاً لمادة فانه يمكن تحديده لمادة اخرى باستخدام علاقة Bragg-Kleeman rule:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \sqrt{\frac{A_1}{A_2}}$$

حيث A_i, ρ_i هي الكثافات والاعداد الكتلية للمواد.

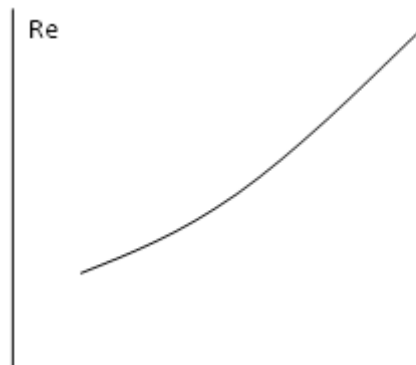
ويمكن حساب المدى للبروتونات والديوترونات من معرفة مدى جسيمات α التي لها نفس السرعة لنفس الوسط :

$$R(p, d) = 4 \frac{M(p,d)}{M_\alpha} R_\alpha - 2 (min, air)$$



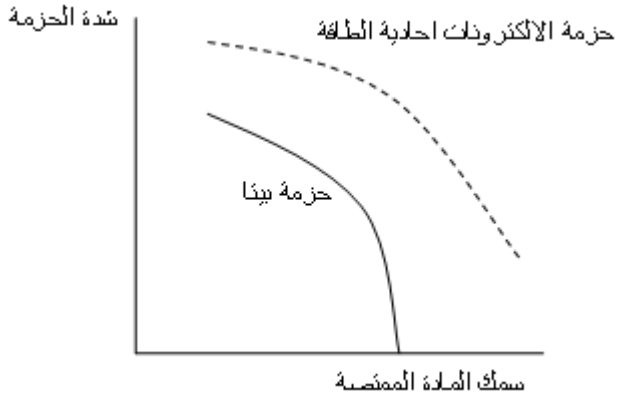
مديات الالكترونات والپوزترونات :

تتصرف الالكترونات والپوزترونات اساساً بنفس الطريقة لفقدان الطاقة والتغلغل (النفوذ) داخل المادة. غير ان هناك اختلافات بسيطة بينها تظهر عادة. فلالكترونات واذا استخدمنا نفس التجربة السابقة لقياس مدى الجسيمات المشحونة فان النتيجة ستكون كما في الشكل المجاور. ان المدى يساوي سمك المادة المعروفة بالنقطة التي عندها الامتداد الخطي linear extraoplation لمنحني النفوذ transmission curve يلاقي الخلفية background.



اما تصرف المدى للالكترونات كدالة للطاقة فيكون بصورة عامة كما في المنحني المجاور. اما بالنسبة للپوزترونات فيمكن والدقة استخدام علاقات اخرى واشكال اخرى مشابهة موجودة في مصادر اضافية .

الفصل الثالث : تفاعل الأشعة النووية مع المادة *Interaction of nuclear radiation with matter*



نفوذ جسيمات بيتا β :

ان جسيمات β لها طيف مستمر continuous spectrum من الصفر حتى قيمة عظمى لطاقتها E_{max} . ان منحنى المدى لجسيمات β مبين في الشكل المجاور. ان عدد جسيمات β النافذة من المادة خلال سمك مقداره t هو : $N(t) = N_0 e^{-\mu t}$ ، حيث N_0 هو العد الاصلي و μ هو معامل الامتصاص.

ثانياً : تفاعل النيوترونات مع المادة

ان النيوترون متعادل الشحنة لذلك فان تفاعله مع المادة هو بشكل تفاعل مع النوى من خلال القوة النووية . ويمكن تقسيم تفاعلات النيوترون مع النواة الى قسمين رئيسين :

- 1- الاستطارة scattering : حيث يتفاعل النيوترون مع النواة ولكن يظهر كلا الجسيمين (النيوترون والنواة) بعد التفاعل. ويمكن ان تكون الاستطارة مرنة او غير مرنة .
 - أ- الاستطارة المرنة elastic scattering : وتكون الطاقة الحركية للجسيمين المتصادمين محفوظة conserved.
 - ب- الاستطارة غير المرنة inelastic scattering : ان جزءاً من الطاقة الحركية يعطى الى النواة بشكل طاقة تهيج. وبعد التصادم يمكن ان تتحلل النواة المتهيجة باعطاء اشعة كما مثلاً.

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

- 2- الامتصاص absorption : وهنا يختفي النيوترون المتفاعل مع النواة نتيجة امتصاصه من قبلها. ويمكن ان يظهر واحد او اكثر من الجسيمات بعد ان يتم التفاعل .

عندما تكون هناك نيوترونات لها نفس السرعة وتسير بوسط معين بمختلف الاتجاهات فانه يمكن التعبير عن شدة النيوترونات بمقدار الفيض النيوتروني neutron flux (ϕ) وهو عدد النيوترونات التي تمر من وحدة المساحة خلال وحدة الزمن $n/cm^2 \cdot sec$. ومن المفيد تعريف كمية اخرى للشدة النيوترونية لها علاقة بالفيض وتسمى بالتدفق النيوتروني neutron fluence (F) وتعطى بالعلاقة $F = \phi \tau$ ، حيث τ هي المدة الزمنية المحسوبة .

ان استطارة النيوترونات من ذرات الهيدروجين في المادة تنتج بروتونات مرتدة يمكن الكشف عنها بواسطة عمليات التاين والتهيج التي تحدثها خلال المادة. ويمكن ان تحيد النيوترونات بواسطة البلورات وهذه ايضا طريقة لقياس طاقة النيوترونات في مدى الطاقة الواطئة. ان النيوترون وخلال تصادمه المباشر مع البروتون فانه يعطي تقريبا كل طاقته الى البروتون لذلك فالمواد الهيدروجينية كالبرافين او الماء تعد وسطاً ماصاً جيداً للنيوترونات. ان استمرار التصادمات النيوترونية يمكن ان يحول النيوترون الى نيوترون حراري thermal neutron الذي طاقته بحدود 0.025 eV .

الفصل الثالث : تفاعل الأشعة النووية مع المادة *Interaction of nuclear radiation with matter*

ثالثاً : تفاعل اشعة كاما والاشعة السينية مع المادة

الاشعة السينية تنتج من الانتقالات الذرية كالتحيزج اوالتاين. اما اشعة كاما فتنبعث خلال الانتقالات النووية. في دراستنا لهذا الموضوع نتعامل مع كلا النوعين على اساس الصفة الجسيمية حيث هما عبارة عن فوتونات. تعطى طاقة الفوتون بالعلاقة : $E = h\nu = hc/\lambda$.

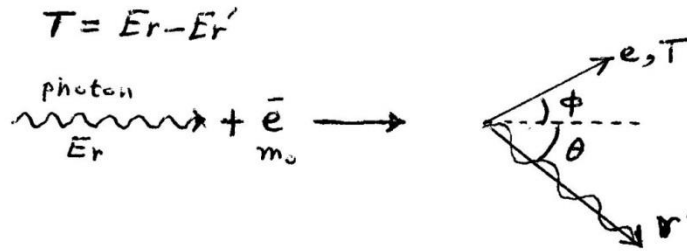
ان الاشعة السينية واشعة كاما يمكن ان تتفاعل مع المادة بثلاث طرق رئيسية هي الظاهرة الكهروضوئية photoelectric effect واستطارة كومبتن Compton scattering ونتاج الزوج pair production وذلك حسب طاقة كل منهما.

1- الظاهرة الكهروضوئية : وفيها يتفاعل الفوتون مع الكترون ذري مرتبط bound. هنا يختفي الفوتون ويذاح احد الالكترونات الذرية كالترون حر يسمى الالكترون الضوئي photo electron وذلك بطاقة حركية $T = E_\gamma - B.E$.

حيث E_γ هي طاقة الفوتون و $B.E$ طاقة الترابط للالكترون. وعادة تخلق فجوة في القشرة الذرية K نتيجة لذلك. ان الالكترونات من القشرة الاعلى ستشغل هذه الفجوة باعثة اشعة سينية. هذه الاشعة السينية بدورها يمكن ان تمتص من الالكترونات الخارجية. وتسمى الالكترونات المزاحة نتيجة لذلك ، أي عن طريق امتصاصها الاشعة السينية بالكترونات اوجر Auger electrons . ان احتمالية التفاعل بهذه الظاهرة تتناسب عكسيا مع طاقة الفوتون الساقط وطرديا مع المقدار Z^n حيث $n = 3 - 5$.

2- استطارة كومبتون : في استطارة كومبتون يحدث تصادم مع الفوتون والكترون حر نوعاً ما. لا

يختفي الفوتون بعد الاستطارة لكن فقط اتجاه حركته وطاقته سيتغيران. ان طاقة الفوتون تقل بمقدار معين يعطى الى الالكترون المرتد. لذلك فان قانون حفظ الطاقة يعطي (كما موضح بالشكل) .



ان تطبيق قانون حفظ الطاقة والزخم يعطي طاقة الفوتون المستطار بزاوية θ كالآتي :

$$E_r' = \frac{E_r}{1 + (1 - \cos \theta) \frac{E_r}{m_0 c^2}}$$

وباستخدام المعادلتين اعلاه يمكن استنتاج الطاقة الحركية للالكترون المرتد T :

$$T = \frac{(1 - \cos \theta) \frac{E_r}{m_0 c^2}}{1 + (1 - \cos \theta) \frac{E_r}{m_0 c^2}} E_r$$

ان اقل طاقة للفوتون المستطار تحصل عندما تكون $\theta = \pi$ وهي تقابل اكبر طاقة للالكترون المرتد ، حيث :

$$E_{rmin} = \frac{E_r}{1 + \frac{2E_r}{m_0c^2}}, \quad T_{max} = \frac{\frac{2E_r}{m_0c^2}}{1 + \frac{2E_r}{m_0c^2}} E_r$$

وأعلى طاقة للفوتون المستطار تحدث عند $\theta = 0$ ، أي ان : $T_{min} = 0$ ، $E_{rmax} = E_r$

ان احتمالية حدوث استطارة كومبتن تقل بزيادة طاقة الفوتون وتتناسب مع العدد الذري Z للمادة الوسط.

3- إنتاج الزوج : يمكن لفوتون ان يتحول الى مادة على شكل زوج الكترون - بوزترون. يتم هذا قرب نواة الذرة لكي يكون الزخم الخطي محفوظاً بمساعدة النواة التي تأخذ جزءاً من زخم الفوتون في عملية التحويل. ان الطاقة السكونية m_0c^2 لكل من الالكترون والبوزترون تساوي 0.511MeV لذلك فان انتاج زوج الكترون - بوزترون يتطلب في الاقل فوتوناً طاقته تساوي $2 \times 0.511 = 1.022 \text{ MeV}$. واي زيادة في طاقة الفوتون عن هذا المقدار تظهر بشكل طاقة حركية للالكترون والبوزترون :

$$T_{e-} + T_{e+} = E_r - (mC^2)_{e-} - (mC^2)_{e+} = E_r - 1.022 \text{ MeV}$$

ويمكن لمعكوس هذه العملية ان يحدث ايضاً وذلك عندما يلتقي الالكترون مع البوزترون فيفني annihilate احدهما الاخر مكونين زوجاً من الفوتونات. يكون الفوتونان الناتجان باتجاهين متعاكسين وذلك لكي يتحقق قانون حفظ الطاقة والزخم . وليس هناك حاجة لنواة او جسيم في عملية الفناء هذه . ان احتمالية انتاج الزوج تتناسب مع Z^2 للمادة ولها طاقة عتبة threshold مقدارها $E_r = 1.022 \text{ MeV}$.

ومما تجدر الاشارة اليه انه يمكن للالكترون والبوزترون ان يكونا نوعاً من الذرات التي يتحرك فيها كل منهما حول مركز ثقلهما المشترك. وتسمى هذه الذرة الناتجة بذرة البوزترونيوم positronium وتكون قصيرة العمر جداً $10^{-10} - 10^{-7} \text{ sec}$ ثم بعدها يفني الالكترون والبوزترون احدهما الاخر.

معامل التوهين الكلي total attenuation coefficient للفوتونات :

عندما يمر فوتون اشعة كاما او الاشعة السينية خلال مادة ما فانه يمكن ان يتفاعل من خلال أي من الحالات الرئيسية الثلاث المذكورة ، أي الظاهرة الكهروضوئية وتشتت كومبتن وانتاج الزوج. ان الاحتمالية الكلية للتفاعل μ والمسماة معامل التوهين الخطي الكلي تكون عبارة عن مجموع الاحتماليات الثلاث :

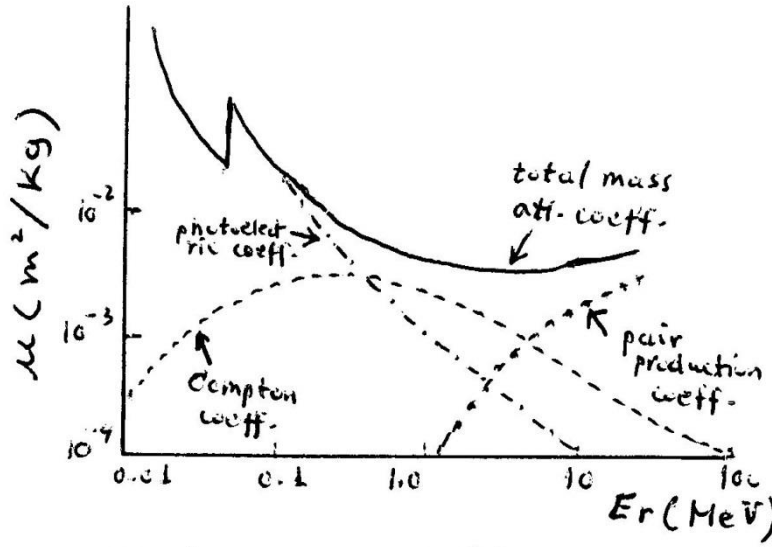
$$\mu(m^{-1}) = \mu_{PE} + \mu_C + \mu_{PP}$$

وفيزيائياً فان μ هي احتمالية التفاعل لوحدة المسافة. ومصطلح التوهين هنا يشمل عمليات الامتصاص والاستطارة التي يمكن ان تحدث للفوتونات خلال المادة. ويمكن ايضاً التعبير عن معامل التوهين بوحدات $\frac{m^2}{kg}$ or $\frac{cm^2}{g}$. وباستخدام هذه الوحدات فلا داعي لتحديد كثافة المادة. وعند ذلك يسمى μ باستخدام هذه الوحدات بمعامل التوهين الكتلي الكلي . والعلاقة بين التعبيرين الخطي والكتلي هي :

الفصل الثالث : تفاعل الأشعة النووية مع المادة Interaction of nuclear radiation with matter

$$\mu(m^2/g) = \frac{\mu(m^{-1})}{\rho(kg/m^3)}$$

حيث ρ كثافة المادة.



والشكل المجاور يبين معاملات التوهين لكل حالة من حالات التفاعل وكذلك معامل التوهين الكتلي كدالة لطاقة الفوتون (للرصاص). وعندما تمر حزمة فوتونات احادية الطاقة شدتها الاصلية I_0 خلال مادة سمكها t فان جزء الحزمة الذي يقطع traverse الوسط بدون أي تفاعل يساوي $e^{-\mu t}$. احتمالية ان الفوتون يمر خلال السمك t بدون تفاعل تساوي :

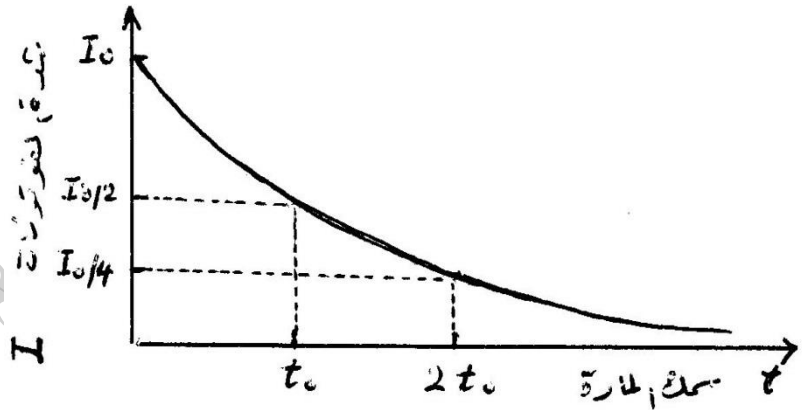
معادلات التوهين الكتلية للرصاص (رصاص ع)

$$\frac{I_0 e^{-\mu t}}{I_0} = \frac{\text{الفوتونات النافذة}}{\text{الفوتونات الساقطة}} = e^{-\mu t}$$

فاذا كانت شدة الفوتونات

المتبقية بدون تفاعل عند السمك t هي I فان : $I = I_0 e^{-\mu t}$ ، أما السمك اللازم من المادة لتوهين الحزمة الى نصف شدتها الاصلية يسمى بسمك نصف القيمة t_0 ، حيث :

$$t_0 = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu}$$



الفصل الثالث : تفاعل الأشعة النووية مع المادة *Interaction of nuclear radiation with matter*

مسائل :

- 1- اذا كانت قدرة الايقاف (فقدان الطاقة) للبروتونات بطاقة 10MeV خلال الهواء هي 50keV/cm ماهي قدرة الايقاف لجسيمات ألفا ذات طاقة 40MeV ؟

الحل :

$$\frac{E_\alpha}{E_p} = \frac{40}{10} = 4 \Rightarrow \frac{m_\alpha}{m_p} = 4, \quad v_\alpha = v_p$$

$$\frac{(dE/dx)_\alpha}{(dE/dx)_p} = \frac{Z_\alpha^2}{Z_p^2} = \frac{2^2}{1^2} = 4, \quad \left(\frac{dE}{dx}\right)_\alpha = 4 \left(\frac{dE}{dx}\right)_p = 4 \times 50 = 200 \text{ keV/cm}$$

- 2- افترض ان معادلة قدرة الايقاف للالكترونات غير النسبية وللبروتونات هي متطابقة. فماهي الطاقة التي تكون فيها قدرة الايقاف للالكترونات مساوية لتلك التي لبروتون طاقته 10MeV ؟

الحل :

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_p = \left(\frac{dE}{dx}\right)_e, \quad v_p = v_e$$

$$\frac{E_p}{E_e} = \frac{m_p}{m_e} = \frac{931.48}{0.511} \Rightarrow E_e = 10 \times \frac{0.511}{931.48} \approx 5.5 \text{ keV}$$

- 3- فوتون طاقته 350keV يعاني استطارة كومبتن من قبل الكترون حر. فاذا كانت الطاقة الحركية للالكترون المرتد هي 200keV ، فما هو الطول الموجي للفوتون المستطار ؟

الحل : ان طاقة الفوتون الساقط تساوي $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ ، وعليه فإن طاقة الفوتون المستطار ستساوي

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

$$\dot{E} = 350 - 200 = 150 \text{ keV}$$

$$\therefore \frac{hc}{\lambda} = 150 \Rightarrow \lambda = \frac{6.62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{0.15 \text{ MeV} \times 1.6 \times 10^{-13} \frac{\text{J}}{\text{MeV}}} = 0.0829 \text{ \AA}$$

- 4- ماهو سمك الرصاص المطلوب لتخفيض شدة اشعة كاما المنبعثة من عنصر الثوريوم الى 0.01 من قيمتها الاصلية . اعتبر ان $\mu = 0.45 \text{ cm}^{-1}$.

الحل :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu t} \Rightarrow \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\mu t \Rightarrow \ln\left(\frac{1}{100}\right) = -0.45 t$$

$$t = 10.23 \text{ cm.}$$