الباب الثالث

تفاعل الإشعاع مع المادة

obeikandl.com

obeikandl.com

الباب الثالث

تفاعل الإشعاع مع المادة
Interaction of Radiation with Matter

تنقسم الإشعاعات الموجودة في الطبيعة إلي أربعة أنواع هي:

١- الجسيمات المشحونة الثقيلة مثل جسيمات ألفا والديوترونات والبروتونات.
٢- الجسيمات المشحونة الخفيفة مثل الإلكترونات والبوزيترونات.
٣- الجسيمات المتعادلة مثل النيوترونات.
٤- الإشعاعات الكهرومغناطيسية مثل أشعة جاما والأشعة السينية.

٣-١ تفاعل الجسيمات المشحونة الثقيلة مع المادة

عند سقوط الجسيمات المشحونة الثقيلة مثل جسيمات ألفا والديوترونات والبروتونات علي المادة تنتقل الطاقة من هذه الجسيمات إلي المادة بالتدريج إلي أن تتوقف الجسيمات الساقطة، ويتم هذا الانتقال عن طريق التصادمات الغير مرنة مع إلكترونات ذرات هذه المواد التي تمر خلالها الجسيمات. وينتج عن هذه التصادمات إثارة لهذه الذرات أي انتقال أحد إلكترونات الذرة من مداره إلي مدار أخر أعلي في الطاقة أو تأين الذرة أي انفصال الإلكترون عنها تماماً. وهكذا يحدث تأين ابتدائي لذرات المادة وهو الناتج عن الجسيمات الثقيلة. ويحدث تأين أخر ثانوي وينتج عن إلكترونات التأين الابتدائي التي تنطلق بسرعة عالية جداً فتؤدي إلي تأين المادة وتعرف هذه الإلكترونات باسم إلكترونات دلتا(*delta electrons*) ويتكون نتيجة ذلك التأين زوج من الإلكترونات والأيونات ويمكن قياس هذه الأزواج n باستخدام الطرق العملية. ومن معرفة طاقة الجسيمات المشحونة الساقطة E والعدد n يمكن حساب القيمة المتوسطة للطاقة $\overline{E}$ اللازمة لتكوين زوج إلكتروني- أيوني واحد من العلاقة:

$$\overline{E} = \frac{E}{n} \qquad (٣-١)$$

وقد وجد أن القيمة المتوسطة للطاقة $\overline{E}$ لا تعتمد علي طاقة الجسيمات الساقطة أو علي طبيعة هذه الجسيمات ولكنها تعتمد فقط علي نوع المادة. ومن المعروف أيضا أن الجسيمات الساقطة تتفاعل مع أنويه المادة التي تمر خلالها ولكن يعتبر هذا التفاعل مهملاً لأن احتمال التصادم مع الأنويه أقل بكثير جداً من احتمال التصادم مع الإلكترونات.

٣-٢ مدي وطاقة جسيمات ألفا

Range and Energy of Alpha Particles

يعرف مدي الجسيم المشحون في مادة بطول المسافة المستقيمة التي يقطعها الجسيم في المادة. وإذا كان أثر هذا الجسيم المشحون الثقيل في المادة عبارة عن خط مستقيم فإن المدى له يكون خط مستقيم أيضاً. وجسيمات ألفا تفقد طاقتها عند مرورها في المادة نتيجة التصادمات التي تحدث مع ذرات تلك المادة. وجسيمات ألفا تحدث تأيناً في المادة قبل أن تفقد كل طاقتها، وقرب نهاية مسارها فإنها قد تكتسب أو تفقد إلكتروناً أو إلكترونين، وتتكرر هذه العملية عدة مرات وفي النهاية يكتسب جسيم ألفا إلكترونين ويصبح ذره هيليوم متعادلة. والعلاقة بين المدى والطاقة لجسيمات ألفا في الهواء هي:

$$R_{air}(cm) = 0.325E^{3/2}MeV \quad for E(4-7)MeV \qquad (٣-٢)$$

$$E(MeV) = 2.12R_{air}^{2/3}(cm) \qquad (٣-٣)$$

وقد وجد أنة عند الطاقات المنخفضة فإن المدى يتناسب $E^{3/4}$، أما عند الطاقات العالية فإن المدى يتناسب مع E^2. والعلاقة بين المدى R_A والطاقة لجسيمات ألفا في أي مادة العدد الكتلي لها A هي:

$$R_A = \frac{3.2\times10^{-4}\times R_{air}\sqrt{A}}{\rho} \qquad (٣-٤)$$

حيث R_{air} هو مدى جسيمات ألفا في الهواء، ρ كثافة المادة بالجرام علي السنتمتر المكعب.

٣-٣ قدرة الإيقاف Stopping Power

هي عبارة عن معدل فقد الجسيم الذي له طاقة معينة لطاقته داخل المادة. أو معدل النقص في طاقة الجسيم لوحدة المسافة $-\frac{dE}{dx}$ والإشارة السالبة تعني الفقد في الطاقة كلما زادت المسافة. وترتبط قدرة الإيقاف بالتأين النوعي S الذي يعرف علي أنه عدد الأزواج الإلكترونية والأيونية المتكونة خلال ملليمتر واحد من الأثر في الهواء الجوي عند درجة ١٥ درجة مئوي وضغط ٧٦ مم زئبق. وتعتمد قيمة S علي طاقة الجسيم ونوعه. ويمكن تعيين قدرة الإيقاف من:

$$-\frac{dE}{dx} = \bar{E}S \qquad (٣-٥)$$

حيث $\bar{E}$ هي القيمة المتوسطة للطاقة اللازمة لتكوين زوج إلكتروني-أيوني. ومن المعادلة السابقة فإن قدرة الإيقاف تعتمد علي كل من نوع الجسم وطاقته ونوع المادة. ولقد تمكن هانز- بيتي (H-Bethe) من اشتقاق العلاقة النظرية لقدرة الإيقاف المتوسطة لكل ١ سم من المادة وهي:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} ZN\{\ln\frac{2m_0}{I} - \ln(1-\frac{v^2}{C^2}) - \frac{v^2}{C^2}\} \qquad (٣-٦)$$

حيث z هي شحنة الجسيم الساقط، v هي سرعة الجسيم الساقط، m_0 كتلة السكون للإلكترون، N عدد ذرات المادة لكل سم مكعب، Z العدد الذري للمادة، I هي متوسط جهد التأين لذرات المادة، C هي سرعة الضوء في الفراغ. فإذا كانت طاقة الجسيمات الثقيلة الساقطة صغيرة فإن سرعتها بالنسبة لسرعة الضوء تكون صغيرة ويمكن اعتبار أن $\frac{v}{C}$ = صفر. وتكون معادلة قدرة الإيقاف كالأتي:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} ZN\{\ln\frac{2m_0}{I}\} \qquad (٣-٧)$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} NB \qquad (٣-٨)$$

حيث $B = Z\{\ln\frac{2m_0}{I}\}$. وفي الأغراض العملية يفضل استخدام قدرة الإيقاف النسبية(Relative stopping power) والتي تعرف علي أنها المدى للجسيمات في الهواء علي مدي الجسيمات في المادة وتتعين من:

$$RSP = (-\frac{dE}{dx})_{air} / (-\frac{dE}{dx})_{abs} = \frac{N_{air} B_{air}}{N_{abs} B_{abs}} \qquad (٣-٩)$$

حيث air تعني الهواء، abs تعني المادة الممتصة للطاقة. ومن المعادلات السابقة يمكن إيجاد العلاقة بين قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا والبروتونات في المادة نفسها حيث نجد أن:

$$(-\frac{dE}{dx})_{\alpha} / (-\frac{dE}{dx})_{p} = 4 \qquad (٣-١٠)$$

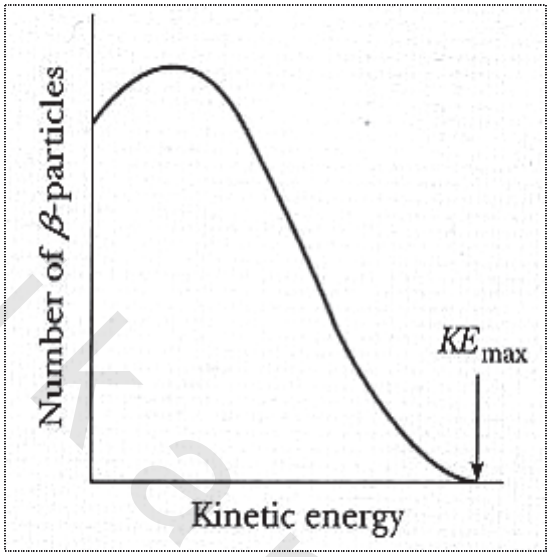
وتعني هذه العلاقة أن قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا أكبر أربعة مرات من قدرة الإيقاف للبروتونات وذلك عند استخدام نفس المادة.

٣-٤ تفاعل جسيمات بيتا (الإلكترونات والبوزيترونات) مع المادة: Interactions of Beta Particles With Matter

تشع أنويه بعض النظائر جسيمات بيتا وهي عبارة عن إلكترونات أو بوزيترونات لها كتلة مساوية للإلكترونات ولكنها تحمل شحنة موجبة ووجد بالتجربة أن طيف جسيمات بيتا يتكون من جزأين أولهما عبارة عن طيف متصل وفية تتغير الطاقة من قيم صغري إلي قيمة عظمي والجزء الثاني عبارة عن طيف خطي ناتج عن التحول الداخلي ويكون هذا الطيف متراكباً مع الطيف المستمر. ولكي يشع النظير جسيمات بيتا فيجب أن تكون نسبة عدد النيوترونات N إلي عدد البروتونات P في أنويه العناصر الخفيفة اكبر من الواحد وتزيد هذه النسبة لعناصر الانوية الثقيلة حتى

obeikandl.com

تصل إلي حوالي ١,٦ . شكل (١-٣) يوضح اعتماد عدد جسيمات بيتا علي طاقة الحركة لها.

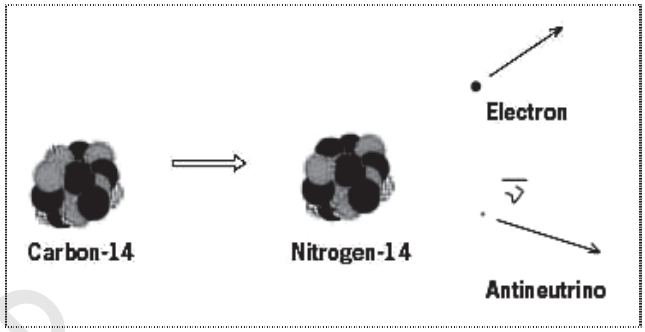


شكل (١-٣)

يوضح اعتماد عدد جسيمات بيتا الخارجة علي طاقة الحركة لها

ويوجد ثلاثة أنواع لتفكك جسيمات بيتا وهي:

١- التفكك الإلكتروني أي خروج جسيمات بيتا السالبة عندما تكون النواة تحتوي علي عدداً زائداً من النيوترونات وفيها يتحول النيوترون إلي بروتون داخل النواة ويخرج جسيم أولي يسمي ضديد النيوترينو ($Anti\ neutrino(\bar{\nu})$) كتلته الساكنة تساوي صفر تقريباً كما في شكل (٢-٣). ونلاحظ أن العدد الذري يزيد بمقدار الوحدة مثل:

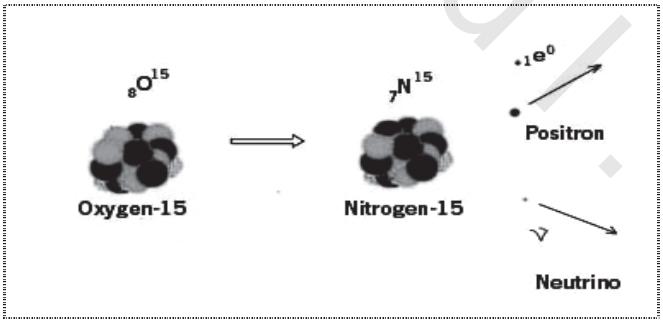


شكل (٢-٣) يوضح خروج ضديد النيوترينو مع جسيم بيتا السالب وكذلك حسب المعادلة:

$$n \rightarrow p + \beta^{-} + \bar{\nu}$$

$$^{34}_{15}P \rightarrow {}^{34}_{16}S + \beta^{-} + \bar{\nu} \quad (t_{1/2} = 12.4\,\text{sec}) \qquad (3\text{-}11)$$

ب- التفكك البوزيتروني أي خروج جسيمات بيتا الموجبة عندما تكون النواة تحتوي علي عدداً زائداً من البروتونات وفيها يتحول البروتون إلي النيوترون داخل النواة ويخرج جسيم أولي يسمي النيوترينو *neutrino*(ν) كتلته الساكنة تساوي صفر تقريباً كما في شكل (٣-٣). ونلاحظ أن العدد الذري يقل بمقدار الوحدة مثل:



شكل (٣-٣) يوضح خروج النيوترينو مع جسيم بيتا الموجب وكذلك حسب المعادلة:

$$p \rightarrow n + \beta^{+} + \nu$$

$$^{22}_{11}Na \rightarrow {}^{22}_{10}Ne + \beta^{+} + \nu \quad (t_{1/2} = 2.6\,years) \qquad (3\text{-}12)$$

obeikandl.com

ج- الأسر الالكتروني ويحدث نتيجة تحول أحد بروتونات النواة إلي نيوترون وذلك عن طريق أسر النواة لإلكترون من الإلكترونات المدارية القريبة والإتحاد معها وفي هذه الحالة لا تصدر النواة أياً من جسيمات بيتا مثل

$$p + e \rightarrow n + \nu$$
$$^{22}_{11}Na + e \rightarrow {}^{22}_{10}Ne + \nu \qquad (3\text{-}13)$$

وقد وجد أن طاقة جسيم بيتا الصادرة يمكن أن تأخذ أي قيمة بداية من الصفر وحتى أقصي قيمة لها وهي طاقة التفكك أو ما يعرف بنقطة النهاية ولهذا السبب يكون طيف جسيمات بيتا عبارة عن طيف مستمر. وعند مرور جسيمات بيتا خلال المادة تفقد طاقتها عن طريق إثارة وتأين الإلكترونات المرتبطة بذراتها وهو نفس أسلوب انتقال طاقة الجسيم الثقيل. ولكن تبعاً لقانون بقاء كمية الحركة وصغر كتلة الإلكترون عن كتلة الجسيم الثقيل فأنه عند اصطدام جسيمات بيتا مع إلكترون المادة فيمكن أن تبلغ قيمة الطاقة المنتقلة إلية نصف طاقتها بعكس الجسيم الثقيل عند تصادمه مع إلكترونات المادة لا تنتقل إلا نسبة صغيرة جداً من طاقته. وهذا يفسر لماذا يكون مدي الجسيمات الثقيلة خط مستقيم تقريباً بينما يكون مدي جسيمات بيتا ومسارها يكون متعرجاً. وفي حالة تأين المادة فإن الإلكترونات المنبعثة تكون طاقتها كبيرة وتكون قادرة علي أحداث تأين ثانوي في المادة عندما تفقد طاقتها. وتعرف هذه الإلكترونات باسم إلكترونات دلتا(*electrons*) ويكون التأين الكلي مساوياً للتأين الابتدائي والتأين الثانوي. وعندما يحدث تفاعل ينتج عنه إشعاع كهرومغناطيسي وهي الأشعة التي تظهر عندما تقترب جسيمات بيتا السالبة من الإلكترونات الموجودة حول النواة فإن جسيمات بيتا تقل سرعتها بسبب التنافر وبذلك تفقد طاقتها والطاقة المفقودة في هذه الحالة تظهر علي هيئة موجات كهرومغناطيسية تسمي أشعة الكبح

أو الفرملة (*Bremsstrahlung*) وقد وجد أن نسبة الفقد في الطاقة لوحدة المسار في حالة أشعة الفرملة وفي حالة التصادمات الغير مرنة تساوي:

$$(\frac{dE}{dx})_{rad} / (\frac{dE}{dx})_{coll} \approx \frac{EZ}{800} \qquad (٣-١٤)$$

حيث E طاقة جسيمات بيتا بوحدة MeV، Z العدد الذري للمادة التي تسقط عليها أشعة بيتا. وعند الطاقات الصغيرة وفي حالة المواد ذات العدد الذري الصغير يكون فقد الطاقة نتيجة التصادمات يكون هو السائد. وعندما تزيد طاقة الجسيمات أو زيادة العدد الذري للمادة تبدأ العمليات الأخرى وهي تفاعلات الإشعاع تأخذ دورها.

٣-٥ المدى والطاقة لجسيمات بيتا

Range and Energy of Beta Particles

يستخدم الألمونيوم كثيراً لامتصاص جسيمات بيتا وعند سقوط مجموعة من هذه الجسيمات وذات طاقة واحدة علي مادة ماصة سمكها X وكان العدد الأصلي للجسيمات قبل المرور في المادة الماصة هو I_0 والعدد الذي نفذ من المادة الماصة هو I فإن قانون الامتصاص يكون:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \qquad (٣-١٥)$$

وتعرف μ بمعامل الامتصاص الخطي *LinearAbsorptionCoefficient* ويعتمد علي طبيعة المادة الماصة ويزيد بزيادة العدد الذري ووحدته cm^{-1} إذا كان قياس X بالسنتيمتر، وفي حالة قياس X (gm/cm^2) فتكون وحدة معامل الامتصاص هي (cm^2/gm) ويسمي بمعامل الامتصاص الكتلي (μ) *MassAbsorptionCoefficient* ويساوي μ/ρ حيث ρ كثافة المادة الماصة بوحدة (gm/cm^2). ويوجد معامل أخر يسمي بسمك النصف $half\text{-}thickness(X_{1/2})$ للمادة الماصة ويعرف علي أنه السمك اللازم لكي تقل شدة الشعاع الأصلي إلي نصف قيمتها. وتحسب قيمة سمك النصف من قانون الامتصاص في المعادلة (٣-١٥).

obeikandl.com

وعندما تكون $X = X_{1/2}$ فإن $I = I_0/2$ أي أن:

$$I = I_0 e^{-\mu x} = \frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu x_{1/2}} = 2 = e^{\mu x_{1/2}} = X_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = X_{1/2} = \frac{0.693}{\mu}$$

(٣-١٦)

ولإيجاد العلاقة بين المدى والطاقة لجسيمات بيتا في حالة الألمونيوم كمادة ماصة نجد أن:

$$R = 0.542E - 0.133 \quad \text{if} \quad 0.8MeV < E < 3MeV \qquad (٣-١٧)$$

$$R = 0.407E^{1.38} \quad \text{if} \quad 0.15MeV < E < 0.8MeV \qquad (٣-١٨)$$

حيث E طاقة جسيمات بيتا بوحدة MeV، R مدى جسيمات بيتا في الألمونيوم بوحدة gm/cm^2. وعند مرور جسيمات بيتا في مادة سميكة لها عدد ذري كبير فإن الجسيمات قد تنحرف عن مسارها بزوايا اكبر من 90^0 وهذه العملية تسمي بالاستطارة الخلفية لجسيمات بيتا ($backscattering$) وقد يصل الانحراف إلي 180^0، أي أن الجسيمات المرتدة تكون في نفس اتجاه الجسيمات الساقطة. وهذه الظاهرة مهمة جداً في حالة قياس المواد المشعة. وعند عمل مصدر لجسيمات بيتا فيجب أن تكون سمك المادة الماصة رقيقة جداً وعددها الذري صغير وذلك حتى لا يؤثر الارتداد علي معدل العد ويعطي قيمة أكبر من القيمة الحقيقية.

٣-٦ تفاعل أشعة جاما مع المادة ($Rays$).

Interactions of Gamma Rays With Matter

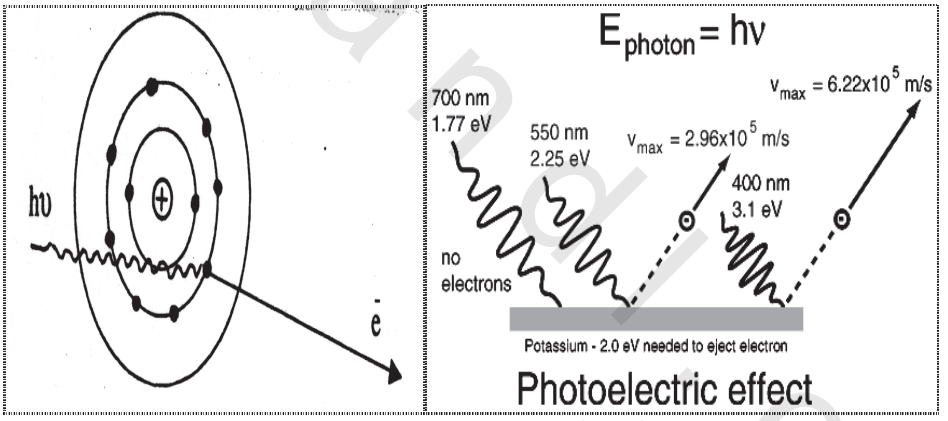
عندما تمر أشعة جاما في المادة فإنها لا تفقد طاقتها مباشرة عن طريق تأين ذراتها مثل الجسيمات المشحونة ولكن يتم ذلك بطريقة غير مباشرة حيث أنها تمنح طاقتها لإلكترونات المادة أثناء اصطدامها بها والتي هي تقوم بإحداث التأين وبالتالي فإن الفوتونات تتميز بطول المدى في المادة. ويشترط لتطبيق قانون الامتصاص أن تكون أشعة جاما ذات طاقة

obeikandl.com

واحدة وأن يكون سمك المادة الماصة صغيراً وأن يكون شعاع جاما ضيقاً ومجمعاً. وعند مرور أشعة جاما في المادة فإنها تمر خلال ثلاث عمليات طبقاً لطاقة الفوتونات الساقطة وهذه العمليات هي:

١- التأثير الكهروضوئي (Photoelectric effect)

تحدث هذه العملية عندما تكون طاقة الفوتونات الساقطة اقل من $0.1MeV$ وفي هذه الحالة تصطدم أشعة جاما مع أحد الإلكترونات المدارية وتنتقل طاقة الفوتون كلها إلي الإلكترون وبالتالي يخرج هذا الإلكترون من الذرة. وعندما تكون طاقة فوتون أشعة جاما الساقط كبيرة بالنسبة لطاقة إزالة الإلكترون من مداره فإن الطاقة الزائدة يأخذها الإلكترون الخارج علي شكل طاقة وتسمي هذه العملية بالتأثير الكهروضوئي كما في شكل (٤-٣).



شكل (٤-٣) عملية بالتأثير الكهروضوئي

ويمكن التعبير عن طاقة الإلكترون المنطلق طبقاً لقانون بقاء الطاقة بالمعادلة التالية:

$$E_e = E_\gamma - T = h\nu - T \qquad (٣-١٩)$$

حيث E_e طاقة الإلكترون المنطلق، E_γ طاقة الفوتون الساقط وهي تساوي $h\nu$ حيث h ثابت بلانك، ν تردد الفوتون، T هي طاقة ترابط الإلكترون

بالذرة. فإذا كانت طاقة الفوتون الساقط أكبر من طاقة ترابط الإلكترون بالذرة أي أن $h\nu > T$ تحدث عملية التأثير الكهروضوئي. وعندما تكون طاقة الفوتون الساقط أكبر بقليل من طاقة ترابط الإلكترون بالذرة تحدث هذه العملية مع إلكترونات المدارات الخارجية للذرة لضعف ترابطها بنواة الذرة. وعندما تزيد طاقة الفوتون الساقط فتحدث عملية التأثير الكهروضوئي مع إلكترونات الأكثر ارتباطاً مع نواة الذرة إلي أن تصبح طاقة الفوتون الساقط أكبر من طاقة ترابط الإلكترون في المدار K أي أن $h\nu > T_K$ ،عندئذ يمكن أن تشترك جميع الكترونات الذرة في عملية التأثير الكهروضوئي. ويمكن كتابة المعادلة (١٩-٣) علي الصورة الآتية:

$$h\nu = h\nu_0 + T \qquad (٣-٢٠)$$

حيث $h\nu$ هي طاقة الفوتون الساقط ،$h\nu_0$ هي الطاقة الحرجة للفوتون أي أدني كمية من الطاقة تلزم إتمام عملية التأثير الكهروضوئي، T هي طاقة حركة الإلكترون الخارج. وقد وجد أن قيمة المقطع العرضي لامتصاص الفوتونات في مادة نتيجة عملية التأثير الكهروضوئي تتوقف علي العدد الذري للمادة Z وعلي طاقة الفوتونات الساقطة $h\nu$ وذلك طبقاً للمعادلة الآتية:

$$\sigma_{Ph} = const. Z^5 \left(\frac{m_0 c^2}{h\nu}\right)^{7/2} cm^2 \qquad (٣-٢١)$$

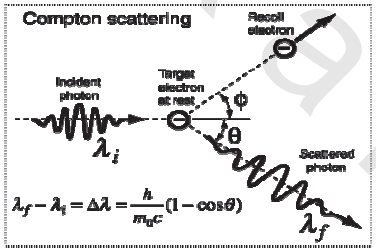
حيث Z هي العدد الذري للمادة الماصة، c هي سرعة الضوء في الفراغ، m_0 كتلة السكون للإلكترون، ν هي تردد الفوتون الساقط . وعندما تكون طاقة الفوتون الساقط كبيرة جداً أي أن $h\nu >> m_0 c^2$ تكون العلاقة علي الشكل:

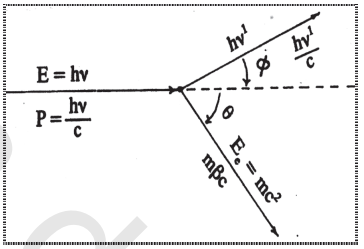
$$\sigma_{Ph} = const. Z^5 \left(\frac{m_0 c^2}{h\nu}\right)^{5/2} cm^2 \qquad (٣-٢٢)$$

ومن المعادلات السابقة نجد أن المقطع العرضي للتأثير الكهروضوئي يتناسب مع Z^5 للمادة الممتصة فلذلك تفضل العناصر ذات العدد الذري الكبير مثل الرصاص لعمل الحواجز والدروع الواقية من أشعة جاما.

٢- تشتت كومبتون (Compton Scattering)

يحدث تشتت كومبتون علي الإلكترونات الحرة أو الإلكترونات ضعيفة الارتباط بالذرة. وفي هذه الحالة وعند سقوط فوتون طاقته $h\nu$ علي إلكترون حر يكتسب هذا الإلكترون جزءاً من هذه الطاقة فينطلق بسرعة معينة ويفقد الفوتون هذه الطاقة ويتشتت عن مساره وتصبح طاقته $h\bar{\nu}$ والإلكترون الخارج في هذه الحالة يسمى إلكترون كومبتون كما في شكل (٥-٣).





شكل (٥-٣) تشتت كومبتون

يمكن تعيين كتلة الإلكترون من المعادلة:

$$m = \left(\frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}\right) \qquad (٣-٢٣)$$

حيث m هي كتلة الإلكترون، $\left(\beta = \frac{v}{c}\right)$ c هي سرعة الضوء في الفراغ ، v سرعة الإلكترون عند الانطلاق، m_0 كتلة السكون للإلكترون. وحيث لا يشترك في التصادم إلا الفوتون والإلكترون فإنه يمكن كتابة معادلات بقاء الطاقة كالتالي:

$$h\nu + mc^2 = h\bar{\nu} + m_0 c^2 \qquad (٣-٢٤)$$

obeikandl.com

ومعادلات كمية الحركة في الاتجاه السيني والصادي كالتالي:

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\bar{\nu}}{c}\cos\theta + mc\cos\phi \qquad (٣-٢٥)$$

ومعادلات كمية الحركة في الاتجاه والصادي كالتالي:

$$0 = \frac{h\bar{\nu}}{c}\sin\theta - mc\sin\phi \qquad (٣-٢٦)$$

وبحل هذه المعادلات يمكن إيجاد قيمة الفوتون المتشتت والعلاقة بين زاوية تشتت الفوتون وزاوية انطلاق الإلكترون علي النحو التالي:

$$h\bar{\nu} = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \qquad (٣-٢٧)$$

$$Cos\phi = (1 + \frac{h\nu}{m_0c^2})\tan\frac{\theta}{2} \qquad (٣-٢٨)$$

وحيث أن الفوتونات المشتتة تكون طاقتها $h\bar{\nu}$ أقل من طاقة الفوتونات الأصلية $h\nu$، لذلك يكون الطول الموجي λ' للفوتونات المشتتة أكبر من الطول الموجي λ للفوتونات الأصلية والفرق في الطول الموجي يسمي بإزاحة كومبتون ويعطي من:

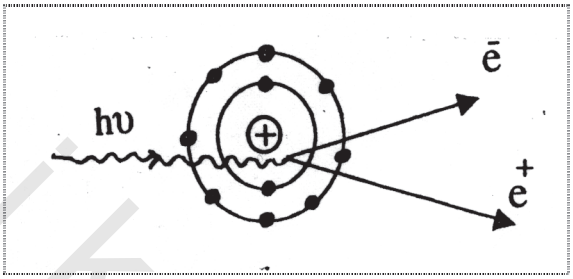
$$\lambda' - \lambda = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta) \qquad (٣-٢٩)$$

$$\Delta\lambda(A^0) = 0.0242(1 - \cos\theta) \qquad (٣-٣٠)$$

حيث A^0 تعني وحدة الانجستروم وتساوي $10^{-8}cm$. وقد وجد أن تشتت كومبتون يقل كلما زادت طاقة الفوتونات الأصلية ولكن بمعدل أقل منه في حالة التأثير الكهروضوئي وكما وجد أن الامتصاص في هذه الحالة لا يتوقف علي العدد الذري للمادة.

٣- أنتاج الأزواج (Pair Production)

في عملية انتاج الأزواج فإن فوتون أشعة جاما عند سقوطه علي المادة قد يختفي في مجال كولوم لنواة الذرة وتستغل كل طاقته في خلق أزواج من الإلكترونات والبوزيترونات كما في شكل (٦-٣).



شكل (٦-٣) إنتاج زوج من الإلكترونات والبوزيترونات

وتكون الطاقة الكلية لزوج الإلكترونات المتكون تساوي طاقة الفوتون الساقط.

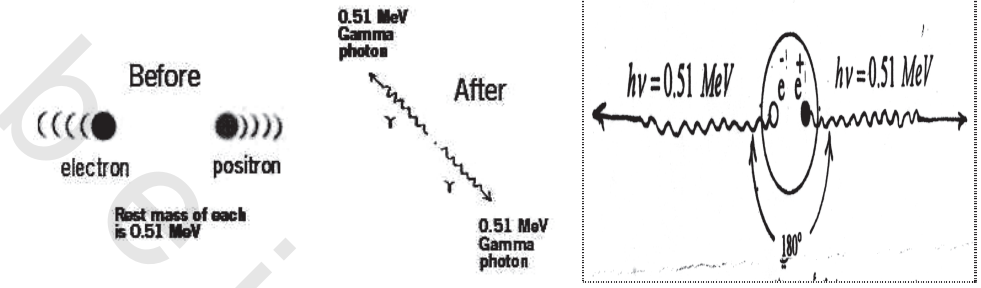
$$h\nu = 2m_0c^2 + T_{e^-} + T_{e^+} \qquad (٣-٣١)$$

وحيث أن $h\nu$ طاقة الفوتونات الساقطة ، m_0c^2 طاقة السكون لكل من الإلكترون والبوزيترون وتساوي $0.511MeV$، T_{e^-} طاقة حركة الإلكترون، T_{e^+} طاقة حركة البوزيترون. ويتضح من المعادلة السابقة أن أقل طاقة تلزم لكي تتم عملية تكوين الأزواج هي:

$$h\nu_0 = 2m_0c^2 = 2(0.511) = 1.02MeV \qquad (٣-٣٢)$$

والطاقة الزائدة عن طاقة الفوتون الساقط $1.02MeV$ تكون طاقة حركة للزوج المتكون من الإلكترون والبوزيترون. وبعد تكونهما فإن البوزيترون يفقد طاقته باستمرار أثناء ابتعاده عن النقطة التي تكون عندها وذلك بسبب التأين الذي يحدثه وعندما يسكن فإنه يتحد مع إلكترون ساكن ويفني كل منهما الأخر ونتيجة لعملية الإفناء Annihilation process ينبعث فوتونان من فوتونات جاما طاقة كل منهما تساوي طاقة كتلة السكون لأي من الإلكترون والبوزيترون. ويعمل هذان الفوتونان مع

بعضهما زاوية قدرها 180^0. ويطلق علي الفوتونين في هذه الحالة اسم أشعة الإفناء Annihilation Radiation كما في شكل (٧-٣)



شكل (٧-٣) عملية إفناء إلكترون وبوزيترون

ويمكن تفسير عملية الإفناء علي أنه عندما يفقد البوزيترون طاقة حركته فإنه يتحد مع إلكترون ليكونا مجموعة تسمي بوزيترونيوم Positronium شبيهة بذرة الهيدروجين. وفي هذه المجموعة فإن النواة تكون هي البوزيترون ويتحرك الإلكترون حوله. والحالة الأرضية للبوزيترون تبقي زمناً في حدود 10^{-10} sec بعدة يتحد الإلكترون والبوزيترون ويفني كل منهما الأخر. وفي حالة إنتاج أزواج الإلكترونات فإن احتمال امتصاص فوتون جاما يوقف علي $\sigma_{pp} \propto Z^2$ وعند الطاقات المتوسطة تكون $\sigma_{pp} \propto (h\nu - 1.02)$ وعند الطاقات العالية تكون $\sigma_{pp} \propto \ln(h\nu)$.

٤- ظاهرة إشعاع الفرملة Bremsstrahlung

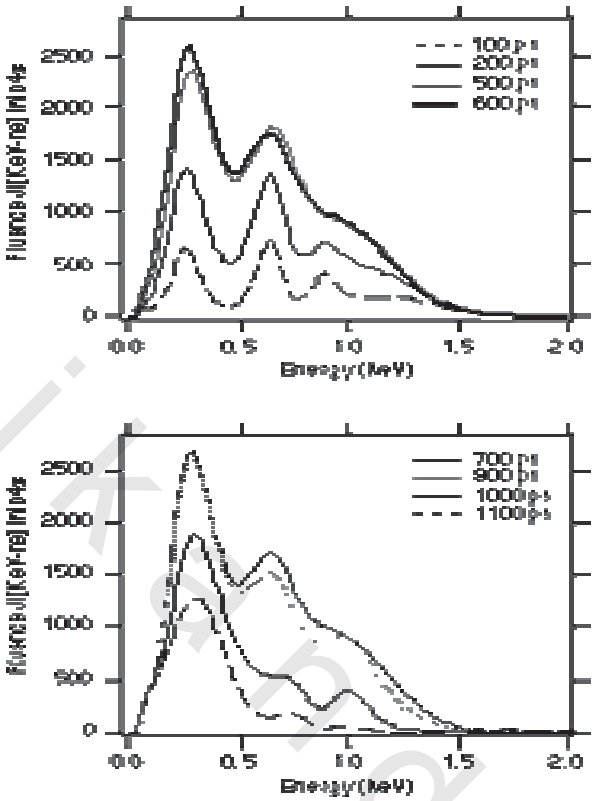
بداية اكتشاف أشعة اكس كانت على يد رونتجن كما نعلم جميعا، حيث قام رونتجن بتسريع إليكترونات في أنبوب مفرغ من الهواء تحت فرق جهد V، منطلقة من فتيل ساخن متوهج(الكاثود أو نقطة الانطلاق). عند اصطدام الالكترونات هذه بنقطة الهدف(الأنود) فأنها تبطئ من سرعتها، وحسب النظرية الكهرومغناطيسية الكلاسيكية فإن هذا التباطؤ يسبب انبعاث

إشعاع كهرومغناطيسي وهو ما نعرفه اليوم بأشعة اكس. وعند تغيير نوع الكاثود، أو الفتيل المسخن، واختبار أنواع متعددة من المواد، قام العلماء برسم المنحنيات الناتجة، وتوصلوا إلى نتيجة أن هناك آليتين مسئولتين عن إنتاج أشعة اكس..

الآلية الأولى: عند ملاحظة القمم البارزة في المنحنيات البيانية، لوحظ إنها تختلف من مادة إلى أخرى، وقد كانت مشابهة للقمم المرسومة نتيجة تصادم كل مادة مع الكترونات مسرعة لتنتج ضوءا وسمي هذا الإشعاع بالإشعاع المميز للمادة حيث يختلف المنحنى باختلاف المادة ذاتها..

الآلية الثانية : عند ملاحظة النتائج البيانية، لوحظ أن هناك خلفية متصلة من الإشعاع، وقد ثبت أنها نتيجة تباطؤ إليكترون داخل المادة الهدف ، وهو معروف بالاسم الألماني *Bremsstrahlung*، وقد أصبحت هذه الكلمة متضمنة في اللغة الإنجليزية وتعني حرفيا كما قلنا، إشعاع الفرملة..

obeikandl.com



٣-٧ تفاعل النيوترونات مع المادة

Interaction of Neutrons With Matter

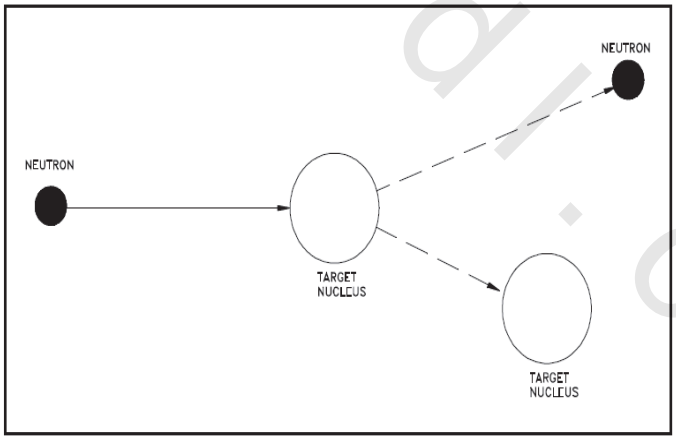
النيوترون هو عبارة عن جسيم متعادل الشحنة ولذلك يتميز بخصائص تختلف كثيراً عن الجسيمات المشحونة مثل أنه لا يمكن تعجيله ولا يمكن أن يؤين ذرات المادة ولا يحدث عنه تفاعلات كهروستاتيكية مع النواة أو الإلكترونات. وإذا لم يتفاعل النيوترون تفاعلاً نووياً مع أنويه الذرات تكون المادة له كالفراغ مما يجعل له قدرة كبيرة علي اختراق المادة. ويتحول النيوترون بعد خروجه من النواة إلي بروتون وجسيم بيتا ويبلغ عمرة النصفي ١٢ دقيقة. وتصنف النيوترونات طبقاً لطاقتها إلي أنواع هي:

١- نيوترونات بطيئة أو حرارية وتكون طاقتها بين $(0 - 0.1)KeV$.
٢- نيوترونات متوسطة الطاقة وتكون طاقتها بين $(0.1 - 20)KeV$.
٣- نيوترونات سريعة وتكون طاقتها بين $(0.02 - 10)MeV$.
٤- نيوترونات عالية الطاقة وتكون طاقتها أعلي من $(10)MeV$

والتفاعل بين النيوترونات والنواة يفقدها طاقتها تماماً ويعتبر التشتت المرن والتشتت الغير المرن أهم الطرق لفقد طاقة النيوترونات وتبطئيها. أما التشتت الغير مرن يكون مع الأنوية المتوسطة والثقيلة فلا يلعب دوراً هاماً في فقد طاقة النيوترون إلا بالنسبة للطاقات الكبيرة.

١- التشتت المرن للنيوترونات Elastic Neutron Scattering

يعرف التشتت المرن للنيوترونات وهو عدم تغير الطاقة الداخلية للنواة التي أصطدم بها النيوترون أي عدم تغير في طاقة حركتها فقط. فعند سقوط نيوترون طاقته E_0 علي نواة عددها الكتلي A ينحرف النيوترون عن مساره ويفقد جزءاً من طاقته بسبب القوي النووية كما في شكل (٨-٣).



شكل (٨-٣) التشتت المرن للنيوترونات

وباستخدام قانوني بقاء الطاقة وكمية التحرك يمكن إيجاد طاقة النيوترون بعد التشتت كالأتي:

$$E = E_0\left(\frac{A^2 + 2A\cos\theta + 1}{(A+1)^2}\right) \qquad (٣-٣٣)$$

حيث E هي طاقة النيوترون بعد التشتت، θ هي زاوية التشتت في إحداثيات مركز الثقل وترتبط بزاوية التشتت θ في إحداثيات المعمل بالعلاقة التالية:

$$\cos\theta = \left(\frac{1 + A\cos\theta}{(A^2 + 2A\cos\theta + 1)}\right) \qquad (٣-٣٤)$$

وتوضح العلاقة (٣-٣٣) أن طاقة النيوترون بعد التشتت تكون أقل ما يمكن للمادة نفسها إذا كانت زاوية التشتت تساوي 180^0 أي عند ارتداد النيوترون للخلف تماماً. في هذه اللحظة تصبح طاقه النيوترون بعد التشتت هي:

$$E = E_0\left(\frac{A^2 + 2A + 1}{(A+1)^2}\right) \qquad (٣-٣٥)$$

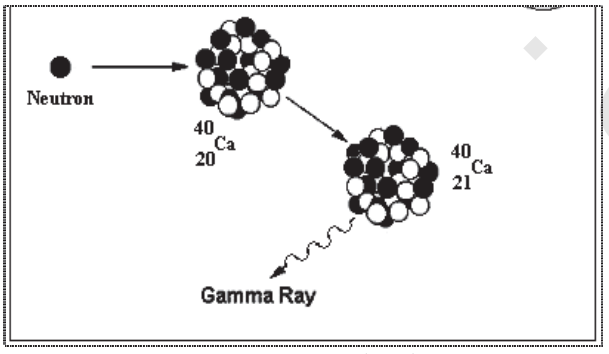
كذلك يمكن أن نستنتج أنه إذا كانت المادة التي تتشتت عليها النيوترونات هي الهيدروجين $(A = 1)$ فإنه عند التشتت للخلف تكون طاقة النيوترون تساوي صفر. أي أن النيوترون في هذه الحالة يمنح كل طاقته لنواة الهيدروجين ويتوقف. وبذلك يفقد النيوترون طاقة أكبر بعد التشتت كلما كانت زاوية التشتت كبيرة. وبالنسبة للزاوية تزيد قيمة الطاقة التي يفقدها النيوترون في التصادم الواحد كلما انخفض العدد الكتلي للنواة التي يحدث التشتت عليها. ولذلك تعتبر المواد المكونة من الهيدروجين من أفضل المهدئات للنيوترونات.

٢- التشتت الغير المرن للنيوترونات Inelastic Neutron Scattering

عند حدوث التشتت الغير مرن للنيوترون تنتقل النواة التي حدث عليها التشتت من الحالة الأرضية إلي الحالة المثارة. ولا يحدث هذا النوع من التشتت إلا إذا كانت طاقة النيوترون مساوية أو اكبر من قيمة معينة. لذلك فإن التشتت الغير مرن لا يحدث إلا للنيوترونات التي تكون طاقتها أكبر مئات من الكيلو إلكترون فولت. ولذلك لا يكون للتشتت الغير مرن دوراً مهماً في عملية تهدئة النيوترونات عند الطاقات الصغيرة.

٣- الأسر النيوتروني Neutron capture

عندما تأسر نواة عنصر ما نيوتروناً مكونة نواة نظير جديد وتكون هذه النواة عادة في الحالة المثارة. وتعتمد قيمة المقطع العرضي للأسر النيوتروني (σ_c) علي طاقة النيوترون وتزيد زيادة كبيرة عند قيم معينة للطاقة وتختلف من نواة لآخري. ويعرف الأسر عند هذه القيم بالأسر الرنيني Resonance Absorption. وتعود النواة المتكونة من الحالة المثارة إلي الحالة الأرضية وتصدر أشعة جاما ويعرف أحياناً هذا النوع من الامتصاص بالأسر الإشعاعي Radioactive Capture أو بتفاعل نيوترون- جاما (n,γ) كما في شكل (٩-٣).



شكل (٩-٣) الأسر النيوتروني

ويمكن حساب قيمة المقطع العرضي للأسر النيوتروني (σ_c) نظرياً وقد وجد أنه يمكن التعبير عنه بالعلاقة التالية:

$$\sigma_c = \frac{C}{(E - E_r)^2 \cdot b} \qquad (٣-٣٦)$$

حيث C,b هي ثوابت تعتمد علي النواة وحالتها المثارة، E طاقة النيوترون الساقط، E_r طاقة النيوترون التي تحدث عند الرنين. وقد وجد أن قيمة المقطع العرضي للأسر النيوتروني (σ_c) للنيوترونات الحرارية يتناسب عكسياً مع سرعة هذه النيوترونات أي أن:

$$\sigma_c = \frac{1}{\sqrt{E}} = \frac{1}{v} \qquad (٣-٣٧)$$

حيث v سرعة النيوترونات.

obeikandl.com