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 :

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

٢-الجسيمات الخفيفة مثل (الالكترونات) .

ثانيا : الجسيمات غير المشحونة وتتضمن :

١-النيوترونات .

٢-الاشعة الكهرومغناطيسية (كاما والاشعة السينية) .

١-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 اثارتها .

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

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

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

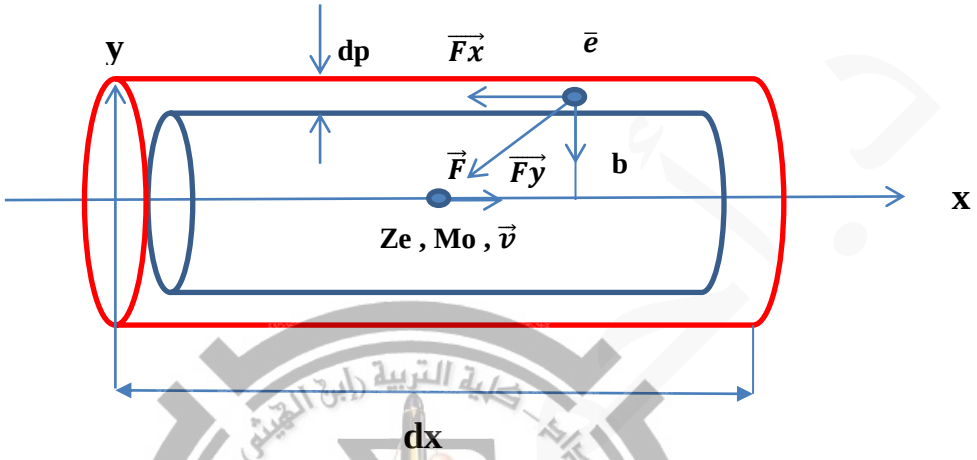
٣-بما ان لقوة كولوم مدى غير نهائي ، فان الجسيمة تتفاعل في الوقت نفسه مع عدد من الالكترونات وبهذا تفقد طاقتها بالتدريج ولكن يكون ذلك باستمرار على طول مسارها حتى تتوقف عن الحركة وتسمى المسافة المقطوعة بالمدى Range.

٤-الطاقة اللازمة لتأيين الذرة قليلة نسبيا، واذا لم يعطى الالكترون الطاقة الكافية للتأيين ، فان الذرة ستنتقل 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 $\overrightarrow{F_x}$ ومركبة شاقولية $\overrightarrow{F_y}$ حيث $\vec{F} = \overrightarrow{F_x} + \overrightarrow{F_y}$.

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 :

$$\int F_x dt \approx 0 = P_x \quad \text{.....(1)}$$

$$\int F_y dt = P_e \quad \text{.....(2)}$$

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

$$\int \vec{E}.\overrightarrow{ds} = \frac{q}{\epsilon_o}$$

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 الاكترونات سيكون على شكل اسطوانة نصف قطرها يساوي (b) وان ارتفاعها الجانبي سيكون مساويا لمسافة dx، وعلى هذا فان ds=2πbdx وحيث ان $E = \frac{F_y}{e}$ ، وان q=Ze فان :

$$\int E.ds = \int \frac{F_y}{e} \times 2\pi b dx = \frac{Ze}{\epsilon_o}$$

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

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

ان الطاقة الحركية التي فقدها الجسيم الثقيل واكتسبها الالكترون تساوي :

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

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 2πbdb وعلى مسار طوله dx هي :

nZ. 2πbdb.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 :

$$-\frac{dE}{dx} = \int_{b_{min}}^{b_{max}} n\ Z2\pi b . \frac{z^2 e^4}{8m_e(\pi b V \epsilon_o)^2} db$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^4 z^2 Zn}{4m_e \pi V^2 \epsilon_0^2} . Ln \frac{b_{max}}{b_{min}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

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 :

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

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 .

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

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

لذلك فان المعادلة (5) تصبح :

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^4 z^2 Zn}{4m_e\, \pi\ \ V^2 \epsilon_0^2} . Ln \frac{2m_e V^2}{\hbar v} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{e^4 z^2 Zn}{4m_e\, \pi\ \ V^2 \epsilon_0^2} . Ln \frac{2m_e V^2}{I_{av}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (9)$$

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

نلاحظ من المعادلة (9) ان قدرة الايقاف :-

١-لا تعتمد على كتلة الجسيم المشحون .

٢-تتناسب مع z^2 للجسيم المشحون .

٣-تعتمد على سرعة الجسيم المشحون .

٤-تتناسب مع كثافة المادة التي تسير خلالها الجسيمة المشحونة.

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

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

$$\frac{(\frac{dE}{dx})_1}{(\frac{dE}{dx})_2} = \frac{z_1^2}{z_2^2} \quad \text{..... (10)}$$

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

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

*ان حساب الفقدان في الطاقة عمليا يتم بواسطة قياس عدد الازواج الايونية المتولدة خلال مسار الجسيم ، فاذا 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 :

$$-\frac{dE}{dx} = w_i \quad \text{..... (11)}$$

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) ؟

الحل/ $1) -\frac{dE}{dx} = w_i$

$5.3 \times 10^6 = 35.2 \times i \rightarrow i = \frac{5.3 \times 10^6}{35.2} \cong 1.5 \times 10^5 \; io \; n \; s$

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

المدى The Range :

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

$$R = \int_o^R dx = \int_{T_o}^0 \frac{dx}{dt} . dT = \int_{T_o}^0 \frac{dt}{\frac{dT}{dx}} = \int_0^{T_o} \frac{dT}{\left(\frac{-dT}{dx}\right)}$$

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 :-

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

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

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

$$\therefore R = \int_0^{V_{\propto o}} \frac{m_\propto V_\propto dV_\propto}{\frac{k}{V_\propto}} = \int_0^{V_{\propto o}} \frac{m_\propto V_\propto^2}{k} dV_\propto$$

$$\therefore R = \frac{m_\propto}{3k} V_{\propto_o}^3$$

حيث $V_{\propto_o}$ السرعة الابتدائية لجسيم ألفا.

مدى جسيم ألفا بدلالة سرعتها ويسمى بقانون كايكر التجريبي $\therefore R_\propto = b_1 V_{\propto_o}^3$

ولايجاد علاقة المدى بالطاقة الحركية :-

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

نعوض عن $V_{\propto_o}^3$ بقانون كايكر فنحصل على :-

$$R_{\propto} = b_2 \left(T_{\propto_o}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\therefore R_{\propto} = 0.318 \left(T_{\propto_o}\right)^{\frac{3}{2}}$$

مدى جسيم ألفا بدلالة طاقتها الحركية

حيث R_α تقاس بـ cm

$T_{\propto_o}$ تقاس بـ MeV

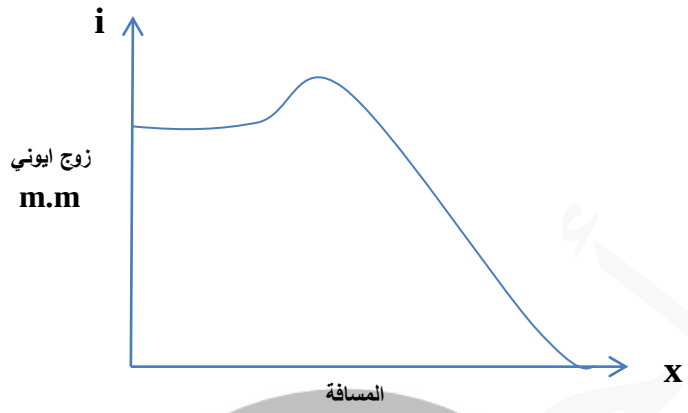
امتصاص جسيمات ألفا *Absorption of α-patticles* :

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 الكترونات 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.



٢- 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 (٩)، ولكن بما ان هناك اختلاف كبير في الكتل فان عددا من الفروق المهمة يمكن ملاحظتها وكما يلي:-

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

٢-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 .

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

٤-اثنا 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 باشعة الكبح (*Bremsstrahung*).

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) وفقا للمعادلة :-

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

حيث N_o يمثل العدد الاصلي 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 :-

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

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

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

وتعتمد مساهمة كل حد على طاقة الجسيمة وعلى طبيعة المادة. ويصبح فقدان الطاقة بالاشعاع 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 :

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

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

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 فتنحرف عند تنافرها مع الكترونات المادة او تجاذبها مع نوى المادة.

تفاعل النيوترونات مع المادة :-