الباب الخامس

التفاعلات النووية

الباب الخامس

التفاعلات النووية Nuclear Reactions

التفاعل النووي هو عملية تتفاعل فيها الجسيمات الساقطة مع النواة وينتج نتيجة هذا التفاعل أنويه جديدة، وجسيمات نووية كثيرة، وقد ينطلق الإشعاع. ولقد أمكن عن طريق عدد الجسيمات الساقطة والخارجة من التفاعل وتوزيعها النووي أن نعرف شيئاً عن قابلية أو احتمال حدوث التفاعل Cross Section والتي تعتبر أحد خصائص النواة.

وتحدث التفاعلات النووية عادة عند مدى واسع من الطاقات . فقد تحدث تفاعلات نووية عندما تكون طاقة الجسيمات الساقطة مساوية للصفر (نيوترون حراري مثلاً). أو عند طاقات متوسطة (في حدود ١٠٠ م.إ.ف) كما ويمكن أن تحدث تفاعلات نووية عند الطاقات العالية (جيجا إلكترون فولت GeV) ومن الجدير بالذكر أن لكل من هذه التفاعلات صفاتها الخاصة بها وقوانينها التي يمكن أن تنطبق عليها (عند الطاقات العالية تحدث تفاعلات ميزونية وغيرها). وأهمية دراسة التفاعلات النووية أنها تعطي معلومات عن خصائص النواة كالحجم وتوزيع الشحنة داخلها وطبيعة القوي النووية.

ولقد أكتشف رذرفورد Rutherford أول تفاعل نووي عام ١٩١٩ م وذلك بقذف نواة غاز النتروجين بجسيم ألفا من مصدر مشع. ولاحظ حدوث ومضات علي حائل من كبريتيد الزنك موضوع علي مسافة من المصدر المشع أكبر من مدي جسيمات ألفا. ويمثل التفاعل الذي أكتشفه رذرفورد بالمعادلة:

$$ {}^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}H + 1.17\,MeV \qquad (١-٥) $$

وحدث أول تفاعل نووي بإستخدام جسيمات معجلة عام ١٩٣٠ م علي يد العالم كوكردفت والتون وكان هذا التفاعل هو:

$^{7}Li \square p \square \ {}^{4}_{2}He \square \square$ (٥-٢)

ويكتب التفاعل النووي على الصورة العامة التالية :

$a \square X \square \ Y \square b \square Q$ (٥-٣)

حيث : a الجسيم الساقط ، X النواة الهدف، Y النواة الناتجة بعد التفاعل ، b الجسيم الخارج من التفاعل، Q الطاقة الناتجة من التفاعل أو ما يعرف بطاقة التحلل Q للتفاعل ويكتب التفاعل السابق على الصورة المختصرة التالية:

X(a,b) Y (5-4)

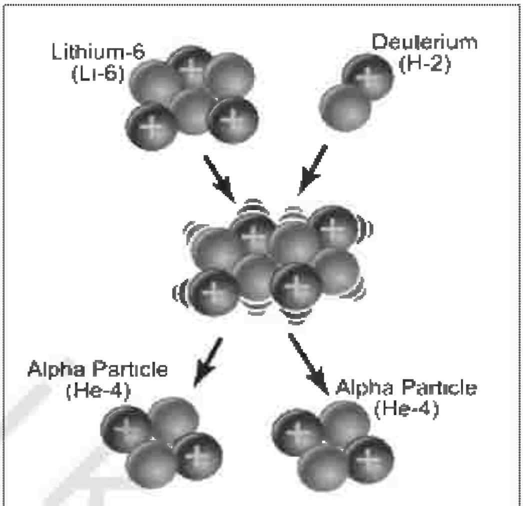
٥-١ قانون بقاء العدد الكتلي والعدد الذري(بقاء النيوكلونات والشحنة)

Conservation Law of Mass Number and Atomic Number

في أي تفاعل نووي فإن العدد الكتلي A (البروتونات + النيوترونات) والعدد الذري Z (عدد البروتونات أي الشحنة) قبل التفاعل يساوي نفس العدد بعد التفاعل ومثال علي ذلك التفاعل الأتي:

${}^{226}_{88}Ra \square \ {}^{222}_{86}Rn \square {}^{4}_{2}He \square Q$ (5-5)

ففي التفاعل السابق نجد أن العدد الكتلي (عدد النيوكلونات) قبل وبعد التفاعل٢٢٦ وكذلك العدد الذري (بقاء الشحنة) قبل وبعد التفاعل يساوي ٨٨. وكذلك تفاعل الليثيوم -٦ مع الديتريوم حسب شكل (٥-١) الأتي:



Lithium-6 – Deuterium Reaction

شكل (٥-١) يوضح تفاعل الليثيوم-٦ مع الديتويوم

٥-٢ قانون حفظ الطاقة وتعيين طاقة التفاعل Q

Conservation Law of Energy and Q Value

إذا كان لدينا التفاعل النووي يكتب علي شكل معادلة (٥-٣) نستطيع أن نحسب الطاقة الكلية قبل التصادم كالتالي

$$E_i = E_a + E_X = T_a + m_aC^2 + T_X + M_XC^2 \qquad (5\text{-}6)$$

حيث T_a، m_aC^2 هي طاقة الحركة وطاقة السكون للجسيم a، T_X M_XC^2 هي طاقة الحركة وطاقة السكون للنواة الهدف X.

وكذلك نحسب الطاقة الكلية بعد التصادم علي الشكل الأتي:

$$E_f = E_b + E_Y = T_b + m_bC^2 + T_Y + M_YC^2 \qquad (5\text{-}7)$$

حيث T_b، m_bC^2 هي طاقة الحركة وطاقة السكون للجسيم b، T_Y M_YC^2 هي طاقة الحركة وطاقة السكون للنواة الناتجة من التفاعل Y. وطبقاً لقانون حفظ الطاقة فإن الطاقة الكلية قبل التصادم تساوي الطاقة الكلية بعد التصادم أي أن: $E_i = E_f$

$$T_a + m_aC^2 + T_X + M_XC^2 = T_b + m_bC^2 + T_Y + M_YC^2 \qquad (5\text{-}8)$$

$$Q = (T_b + T_Y) - (T_a + T_X) = \{(M_X + m_a) - (M_Y + m_b)\}C^2 \quad (5\text{-}9)$$

وتنقسم التفاعلات النووية طبقاً لقيمة Q إلي ما يلي:

١- التفاعلات المرنة: Elastic interactions

في هذه التفاعلات تكون Q=0 ويكتب التفاعل علي النحو الأتي X(a,a) X أي أن الجسيم الذي دخل التفاعل هو نفسه بعد التفاعل.

٢- إذا كانت Q موجبة فإن التفاعل يعرف بالتفاعل الطارد للطاقة Exoergic Reaction حيث تتحرر كمية معينة من الطاقة نتيجة للتفاعل.

٣- إذا كانت Q سالبة فإن التفاعل يعرف بالتفاعل الماص للطاقة Endoergic Reaction وهنا فإن التفاعل يحتاج إلى طاقة.

٤- تسمي أقل قيمة من الطاقة لكي يحدث التفاعل بالطاقة الحرجة Threshold energy. وطاقة الجسيم الساقط في نظام مركز الكتلة يجب أن يكون مساوياً (Q-). أي أن:

$$(E_a)_{Th}\frac{M_X}{M_X + m_a} = -Q \qquad (5\text{-}10)$$

حيث E_a هي طاقة الجسيم الساقط في النظام المعملي، وفي هذه الحالة تسمي بطاقة العتبة:

$$(E_a)_{Th} = -\frac{M_X + m_a}{M_X}Q \qquad (5\text{-}11)$$

٥- التفاعلات غير المرنة: Inelastic Reactions

في هذه التفاعلات تكون Q لا تساوي صفر ويكتب التفاعل علي النحو الأتي X(a,b)Y أي أن الجسيم الذي دخل التفاعل لا يكون هو نفسه بعد التفاعل ويمثل التفاعل بالمعادلة $a + X \rightarrow Y + b + Q$

وهذه التفاعلات الغير مرنة يمكن أن تكون:

ا- تشتت غير مرن inelastic scattering

وفي هذه الحالة فإن الجسيم الساقط يكون مماثلاً للجسيم الناتج من التفاعل ولكن طاقته اقل وتكون النواة المتبقية في حالة إثارة مثل التفاعل $a + X \rightarrow X^* + a + Q$

ب- تفاعلات مباشرة Direct Reactions

عند تفاعل الديوترونات مع الأنوية الخفيفة ينتج بروتون أو نيوترون. وقد وجد أن مثل هذه التفاعلات تكون مباشرة أو انتزاعية stripping وفيها تنتزع النواة أحد النيوكلونين المكونين للديوترون، والنيوكلون الثاني يطير إلي الخارج. ولكي تتم هذه التفاعلات لابد أن يكون طاقة الجسيم الساقط عالية ويمثل هذا التفاعل

$^{55}Mn(d,p)^{56}Mn$

ج- تفاعلات النواة المركبة Compound nucleus reactions

عندما يسقط جسيم طاقته منخفضة علي النواة فإنه يمتص إلي داخل النواة مكوناً ما يسمي بالنواة المركبة. وتعمل طاقة الحركة للجسيم الساقط علي تهيج وإثارة النواة وتتوزع هذه الطاقة علي النيوكلونات داخلها ولا يستطيع أحد من النيوكلونات أن يخرج من النواة. وتأخذ هذه النواة المركبة فترة زمنية كبيرة نسبياً حتى تحلل ويعاد توزيع الطاقة وتكون طريقة الإنحلال لا تعتمد علي طريقة تكوين النواة المركبة . ويمكن تمثيل تفاعل النواة المركبة بالتفاعل:

$$a + X \rightarrow C^* \rightarrow Y + b \qquad (5\text{-}12)$$

ومثال علي ذلك نفرض أن نيوترون بطاقةMeV وبسرعة $10^9\, cm/\sec$ يسقط علي نواة قطرها $10^{-12}\, cm$ ويكون زمن تحلل النيوترون لتكوين نواة مركبة هو $10^{-21}\sec$ وهذا الزمن أصغر من زمن تحلل النواة المركبة وهو $10^{-14}\sec$ وبالتالي فإن الزمن اللازم لتكوين النواة المركبة اقل $10^{-7}\sec$ مرة وبالتالي فإن النواة المركبة ستظل فترة

من الزمن إلي أن يتم تحللها وهذه الفترة طويلة نسبياً. ولذلك يمكن القول بان النواة المركبة تتحلل طبقا للطاقة ولا تعتمد طريقة التحلل علي طريقة تكون النواة المركبة. ومثال علي ذلك:

$$^{27}_{13}Al + ^{1}_{1}H \rightarrow (^{28}_{14}Si)^* \rightarrow ^{24}_{12}Mg + ^{4}_{2}He \qquad (5\text{-}13)$$

$$\rightarrow ^{27}_{14}Si + ^{1}_{0}n$$

$$\rightarrow ^{28}_{14}Si + \gamma$$

$$\rightarrow ^{24}_{11}Na + 3(^{1}_{1}H) + ^{1}_{0}n$$

وكأمثلة أخري لتفاعلات النواة المركبة التفاعلات الآتية:

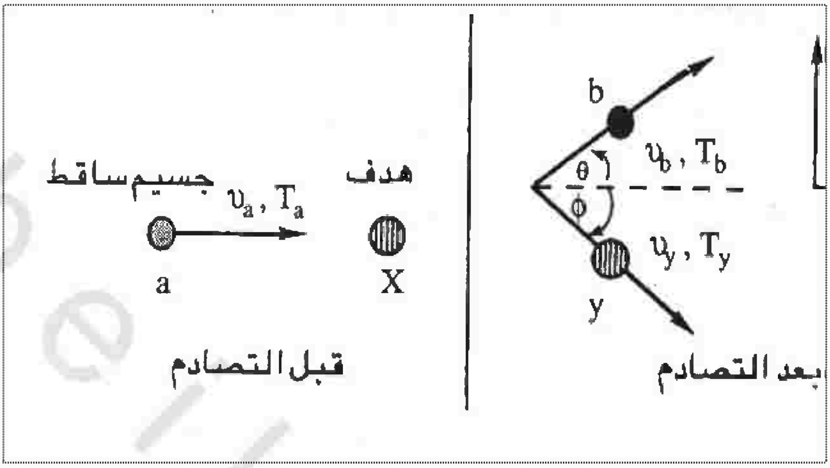
$$^{10}_{5}B + ^{4}_{2}He \rightarrow (^{14}_{7}N)^* \rightarrow ^{13}_{6}C + ^{1}_{1}H \qquad (5\text{-}14)$$

$$^{12}_{6}C + ^{2}_{1}H \rightarrow (^{14}_{7}N)^* \rightarrow ^{13}_{7}N + ^{1}_{0}n \qquad (5\text{-}15)$$

٣-٥ قانون بقاء كمية الحركة

Conservation Law of Momentum

يبين الشكل (5.2) شكل التفاعل النووي بصورة عامة وذلك في النظام المعملي فقبل التصادم يقترب الجسيم a بسرعة v_a وبطاقة حركة T_a من الهدف X الساكن.أما بعد التصادم فيشتت الجسيم b بطاقة حركة T_b وبسرعة v_b أما الجسيم Y فيتحرك بسرعة v_y وبطاقة حركة T_y. وبتطبيق قوانين حفظ كمية الحركة نجد أن:



شكل (5.2) التفاعل النووي في نظام المعمل

أولا : في اتجاه X :

$$m_a v_a = m_b v_b \cos\theta + m_Y v_Y \cos\phi \qquad (5\text{-}16)$$

ثانيا : في اتجاه Y :

$$0 = m_b v_b \sin\theta - m_Y v_Y \sin\phi \qquad (5\text{-}17)$$

بتربيع المعادلتين والجمع والاختصار وحذف T_Y ينتج أن :

$$Q = \left(1 + \frac{m_b}{m_Y}\right)T_b - \left(1 - \frac{m_a}{m_Y}\right)T_a - \frac{2}{m_Y}(m_a m_b T_a T_b)^{1/2} \cos\theta \qquad (5\text{-}18)$$

حالات خاصة:

١- إذا كانت طاقة حركة الجسيم الساقط تساوي صفرا . وذلك كما هو الحال عندما يسقط نيوترون حراري على نواة ما (وهذا ممكن لأنه لا يلزم طاقة حركة للنيوترون لأنه ليس هناك حاجز كولوم بالنسبة له عند اقترابه من النواة) بينما نجد أنه يلزم قدر مناسب من طاقة الحركة عندما يراد قذف جسيمات مشحونة على النواة وذلك نظراً لوجود حاجز كولوم . ففي حالة النيوترونات نجد أن الحدين الثاني والثالث في معادلة (5.18) يختفيان ، أي أن :

$$Q = T_b \frac{m_Y + m_b}{m_Y} \qquad (5\text{-}19)$$

٢- عندما تكون النواة الناتجة كبيرة $m_Y \gg$ فإن الحد الثالث يختفي.

٣- إذا تم رصد الجسيم b عند زاوية قدرها 90 فإن cos90 يساوي صفراً وبالتالي فإن الحد الثالث ينعدم وينتج أن :

$$Q = \left(1 + \frac{m_b}{m_Y}\right)T_b - \left(1 - \frac{m_a}{m_Y}\right)T_a \qquad (5\text{-}20)$$

٤- إذا كانت سرعة الجسيمات تقترب من سرعة الضوء فإنه يجب تصحيح هذه العلاقة لحالة السرعة النسبية وينتج أن:

$$Q = \left(1 + \frac{m_b}{m_Y}\right)T_b - \left(1 - \frac{m_a}{m_Y}\right)T_a + \left(\frac{T_a^2 - T_b^2 - T_Y^2}{2m_Y c^2}\right)$$

$$- \frac{2(m_a m_b T_a T_b)^{1/2}\cos\theta \left(1 + \frac{T_a}{2m_a c^2}\right)^{1/2}\left(1 + \frac{T_b}{2m_b c^2}\right)^{1/2}}{m_Y} \qquad (5.21)$$

٥-٤ المقطع العرضي للتفاعل النووي:

Nuclear Reaction Cross Section

يعرف المقطع العرضي للتفاعل النووي لنواة ما بأنة المساحة المؤثرة التي تقدمها النواة للشعاع الساقط عليها أو احتمال أسر النواة للجسيم الساقط. ويحدث التفاعل النووي مع نواة معينة مستقلة عن غيرها وبالتالي فإنه من المناسب أن يعزى احتمال حدوث تفاعل ما إلى نواة هدف. وتقدر المساحة الفيزيائية النووية بوحدة هي البارن (b) حيث $1b = 10^{-28} m^2$ ويكون احتمال تصادم شعاع الجسيمات مع الهدف يتناسب مع

هذه المساحة التي تساوي بالطبع مساحة مقطع النواة عند مركزها وهذه المساحة تعتبر مساحة المقطع الهندسي لتفاعل معين كي يتم.

إذا كان لدينا حزمة من الجسيمات شدتها I_0 (الشدة هي عدد الجسيمات في وحدة الزمن) تسقط علي شريحة من مادة الهدف ذات سمك صغير جداً dx ومساحة A. فإن عدد الجسيمات التي تدخل في التفاعل $-dI$ وتعطي من العلاقة:

$$-dI = PI \qquad (5\text{-}22)$$

الإشارة السالبة تعني أن الشدة تبدأ تقل بعد المرور في الشريحة وحدوث التفاعل. P هي احتمال حدوث التفاعل ويعطي من العلاقة:

$$P = \frac{A'}{A} \qquad (5\text{-}23)$$

حيث A' هي المساحة الفعلية أي التي يحدث فيها التفاعل، A هي المساحة الكلية. ومع العلم أنه لا يوجد فرق بين نواة وأخري في الشريحة فإنه يمكن توزيع المساحة الفعلية A' علي عدد الأنوية الموجودة في الشريحة فنحصل علي المساحة الفعلية لكل نواة وتسمي σ وتعطي من المعادلة:

$$\sigma = \frac{A'}{Andx} \qquad (5\text{-}24)$$

وتعرف σ علي أنها مساحة مقطع التفاعل وأحياناً تعرف بمساحة المقطع العرضي الدقيق للتفاعل microscopic cross section ومن المعادلتين السابقتين نحصل علي:

$$P = \frac{An\sigma dx}{A} = n\sigma dx \qquad (5\text{-}25)$$

نعوض في المعادلة (5-22) فنحصل علي:

$$dI = -n\sigma Idx \Rightarrow \frac{dI}{I} = -n\sigma dx \qquad (5\text{-}26)$$

تكامل المعادلة (5-26) نحصل علي:

$$\int_{I_0}^{I}\frac{dI}{I} = -\int_0^x \sigma n\,dx \Rightarrow \quad I = I_0 e^{-n\sigma x} \qquad (5\text{-}27)$$

حيث: I شدة الشعاع النافذ، I_0 شدة الشعاع الساقط، x سمك الشريحة، n عدد الأنوية في وحدة الحجوم، σ مساحة مقطع التفاعل وتقاس بوحدة البارن. يوجد كمية أخري تعرف علي أنها المقطع العرضي للتفاعل ويرمز لها بالرمز Σ ووحداته cm^{-1} (وهو يمثل كثافة عدد أنصاف الأقطار المؤثرة التي إذا مر فيها الجسيم يحدث التفاعل لوحدة الطول) حيث:

$$\Sigma = n\sigma \qquad (5\text{-}28)$$

وتكتب المعادلة (5-27) علي الشكل التالي:

$$I = I_0 e^{-\Sigma x} \qquad (5\text{-}29)$$

وإذا كان التعامل علي أساس امتصاص الشعاع بواسطة الشريحة فيمكن أن يعوض عن Σ بمعامل الامتصاص μ ووحداته cm^{-1} علي اعتبار أن وحدات سمك الشريحة x هي cm حيث:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \qquad (5\text{-}30)$$

يمكن كتابة مساحة المقطع الكلي للتفاعل:

$$\sigma_{Tot} = \sigma_{ela} + \sigma_{inel} + \sigma_{ab} \qquad (5\text{-}31)$$

حيث σ_{ela} مساحة مقطع التفاعل أو التصادم المرن. σ_{inel} مساحة مقطع التفاعل أو التصادم الغير مرن. σ_{ab} مساحة مقطع تفاعل الامتصاص أي أن:

$$\sigma_{Tol} = \sum_i \sigma_i \qquad (5\text{-}32)$$

حيث σ_i هي مساحة مقطع أي نوع من أنواع التفاعلات الممكنة أو ما يسمى بمساحة المقطع الجزئي Partial Cross Section وفي

التفاعلات النووية توجد أهمية لعدد التفاعلات التي تحدث خلال وحدة الزمن ويسمي هذا بمعدل التفاعل. ولحساب معدل التفاعل Reaction Rate نفرض أن لدينا جسيمات تتدفق بمقدار ϕ علي وحدة المساحات خلال وحدة الزمن في شريحة مساحاتها A وبالتالي سيكون التدفق الكلي خلال وحدة الزمن ϕA ومن المعادلة (5-25) نحصل علي احتمال حدوث التفاعل لكل جسيم ويكون معدل التفاعل:

$$\mathrm{Re}\,actionRate = (\phi A)n\sigma x = \phi n\sigma V \qquad (5\text{-}33)$$

حيث V هو حجم الشريحة ويساوي Ax .

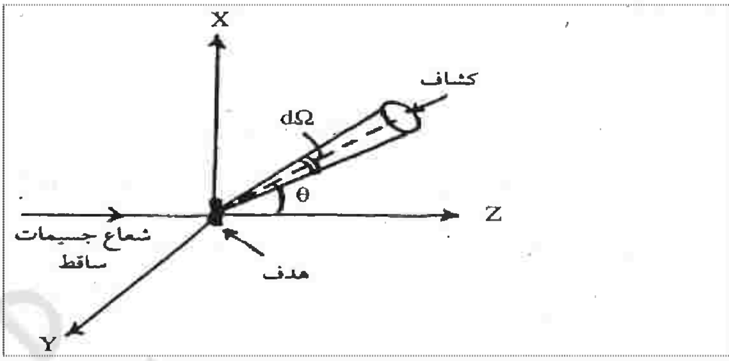
٥-٥ المقطع العرضي التفاضلي Differential Cross Section

تعرف مساحة المقطع العرضي التفاضلي $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)$ علي أنة يساوي مساحة المقطع لكل زاوية مجسمة $d\Omega$ أي أن الجسيمات الناتجة من التفاعل تكون المحصورة خلال زاوية مجسمة $d\Omega$ وبالتالي يعرف المقطع العرضي التفاعلي علي انه المقطع العرضي σ علي وحدة الزاوية المجسمة $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ حسب شكل (٣-٥).

من المعادلة (5-22) و (5-24) نستطيع أن نحصل علي:

$$\frac{dI}{I} = \frac{An\sigma dx}{A} \Rightarrow \frac{\Delta I}{I} = \frac{An\sigma\Delta x}{A} \qquad (5\text{-}34)$$

$$\frac{1}{I}\frac{dI}{d\Omega} = \frac{An\Delta x}{A}\frac{d\sigma}{d\Omega} \Rightarrow \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{A}{AIn\Delta x}\left(\frac{dI}{d\Omega}\right) \qquad (5\text{-}35)$$



شكل (٣-٥) يوضح المقطع العرضي للتفاعل

وستعرف مساحة المقطع العرضي علي أنها:

$$\sigma = \int_0 \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \qquad (5\text{-}36)$$

حيث أن Ω هي الزاوية المجسمة وهي بصفة عامة تعتمد عل (θ,ϕ) ولكنها في بعض الأحيان لا تعتمد ϕ علي θ وبالتالي تكون متماثلة بالنسبة لها ونستطيع أن نكتب:

$$\sigma = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} \frac{d\sigma}{d\Omega} \sin\theta\, d\theta\, d\phi = 2\pi \int_0^{\pi} \frac{d\sigma}{d\Omega} \sin\theta\, d\theta \qquad (5\text{-}37)$$

أذن سيكون:

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = \frac{d\sigma}{d\Omega}(2\pi \sin\theta) \qquad (5\text{-}38)$$

ومن الممكن أن نلاحظ أن:

$$d\Omega = \sin\theta\, d\theta\, d\phi \qquad (5\text{-}39)$$

وبالتالي فإن الزاوية المجسمة الكلية Ω تعطي من العلاقة:

$$\Omega = \int d\Omega = \int_0^{\pi} \sin\theta\, d\theta \int_0^{2\pi} d\phi = 4\pi \qquad (5\text{-}40)$$

٥-٦ استطارة رذرفورد Rutherford Scattering

لمعرفة التركيب النووي للذرة طور رذرفورد نظرية تشتت جسيمات ألفا علي أساس أنها شحنات كهربية نقطية ذات كتل كبيرة وحصل علي علاقة توضح ارتباط زاوية التشتت θ وعدد الجسيمات المشتتة. عند سقوط جسيمات ألفا α والتي شحنتها هي $(2eZ_e)$ بسرعة v_α وكتلة m_α علي شريحة من الذهب شحنة نواتها هي Z_e وكتلتها ثابتة وعند اعتبار أن نواة الذهب وجسيم α نقطة مشحونة تتركز في المركز لكل منهما وطبقاً لقانون التنافر لكولوم تكون القوة الكهربية الناتجة هي:

$$F = \frac{Z_e(2eZ_e)}{r^2} \qquad (5\text{-}41)$$

حيث r هي المسافة بين جسيم α ونواة الذهب ولو فرض أن نصف قطر نواة الذهب R وأن المسافة العمودية بين مركز الشحنة في نواة الذهب ومسار جسيمات α هي b وتعرف بمعامل التصادم Impact Parameter كما في الشكل (5-4) فإن المعادلة (5-33) تكتب كالتالي:

$$F = \frac{Ze^2}{b^2} \qquad (5\text{-}42)$$

ومع العلم أن القوة الأفقية التي في اتجاه السرعة الساقطة لا تؤثر في انحراف مسار الجسيمات الساقطة بل تغير من سرعتها ولذلك القوة العمودية هي التي تؤثر في مسار الجسيمات الساقطة وأن هذه القوة تعمل فترة من الزمن وتساوي $\Delta t = \frac{b}{v}$. ونتيجة لهذه الفترة الزمنية فإن كمية التحرك الابتدائية ستتغير بمقدار Δp وهي تساوي الفرق بين كمية الحركة الابتدائية وكمية الحركة النهائية حيث:

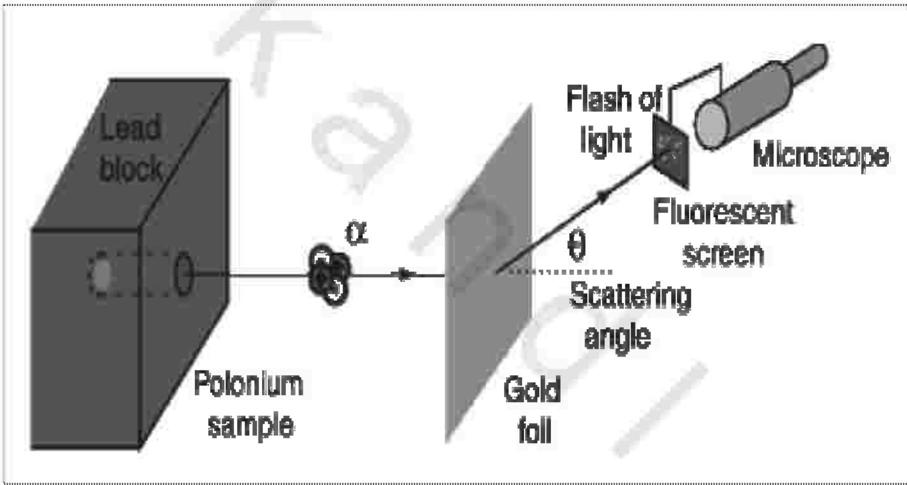
$$\Delta p = F\Delta t = \frac{2Ze^2}{b^2}\frac{b}{v} = \frac{2Ze^2}{bv} \qquad (5\text{-}43)$$

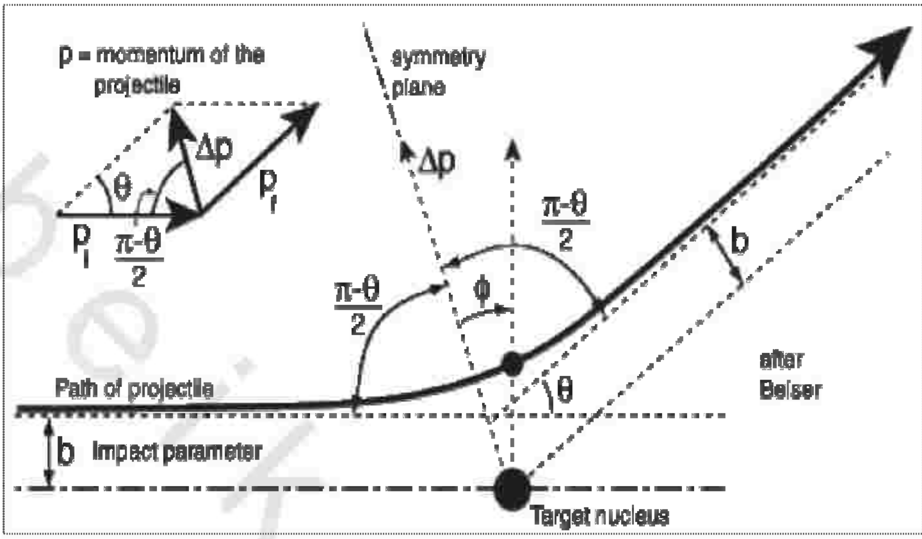
والزاوية التي تنشأ بين اتجاه كمية الحركة الابتدائية وكمية الحركة النهائية هي □ حسب شكل (4-5). وعندما تكون □ صغيرة فإن $\sin □ □ \tan □ □ □$ وتكون:

$$□ □ \frac{□p}{P_i} □ (\frac{zZe^2}{bv})/m_□ v_□ □ \frac{zZe^2}{bv^2} \qquad (5\text{-}44)$$

ومنها نحسب قيمة معامل التصادم b:

$$b □ \frac{zZe^2}{m_□ v_□^2 □} \qquad (5\text{-}45)$$





شكل (5-4) يوضح استطارة رذرفورد