المحاضرة 11 / مادة الفيزياء النووية

الفصل الخامس/ التفاعلات النووية Nuclear Reactions

كلية التربية للعلوم الصرفة – ابن الهيثم

قسم الفيزياء / العام الدراسي 2024-2025

المرحلة الرابعة / شعبة ج صباحي

أ.م.د. عدي طارق صبحي

الفصل الخامس

التفاعلات النووية Nuclear Reactions

التفاعل النووي : هو عميلة يحدث فيها تغيير في تركيب نواة الهدف وطاقتها اما في احدهما فقط او كليهما بعد قصف النواة الهدف بجسيمات مشحونة او غير مشحونة او اشعة كاما .

❖ ويعبر عن التفاعل النووي بالمعادلة :

$a+x \rightarrow y+b$ Or $x(a,b)y$ .....(1)

حيث

a : تمثل الجسيم الساقط incident particle

x: النواة الهدف target nucleus

y : النواة الناتجة product nucleus

b: الجسيم الخارج outgoing particle

ملاحظة / ان اول تفاعل نووي اجري مختبريا ذلك الذي اعلنه رذرفورد عام 1911 :

$$^{4}_{2}He + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{1}_{1}H + ^{17}_{8}O$$

❖نظرية التفاعل والنواة المركبة :-

حسب آلية التفاعل فانه يمكن تقسيم تفاعلات التحول النووية الى تفاعلات مباشرة وتفاعلات النواة المركبة . ان آلية التفاعلات المباشرة تختلف تماما عن آلية النواة المركبة ، فالتفاعلات المباشرة هي عمليات آنية سريعة جدا تحدث بزمن بحدود 10^{-22} sec ، في حين تستغرق النواة المركبة فترة زمنية اطول من ذلك بكثير 10^{-16} sec – 10^{-8} .

كما ان التفاعلات المباشرة تحدث بدرجة كبيرة عند سطح النواة الهدف بمشاركة نيوكليون واحد او عدد قليل من النيوكليونات المكافئة الواقعة قرب سطح النواة الهدف ، في حين تبقى النيوكليونات الاخرى في الهدف بدون مشاركة ويخرج نتيجة لذلك نيوكليون منفرد من احد المستويات مما يؤدي الى تفكيك التركيب القشري للنوى ، وكلما زادت طاقة الجسيمات الساقطة (اكثر من 20 MeV) ازدادت احتمالية حدوث التفاعلات المباشرة . ويمكن ان تحدث التفاعلات المباشرة بعدة طرق مثل تفاعل الانتزاع ، وتفاعل الالتقاط وتفاعل الاخراج .

اما في آلية النواة المركبة فيندمج الجسيم الساقط مع النواة الهدف لفترة قصيرة وتتقاسم الطاقة فيما بينها بشكل كامل قبل ان يقذف نيوكليون او مجموعة نيوكليونات خارج النواة المركبة .

واذا لم تكن الطاقة الحركية للجسيم الساقط عالية فانه يمكن تفسير حدوث التفاعل النووي على اساس انه يتم بمرحلتين :-

1- الجسيم الساقط ونواة الهدف يكونان نواة جديدة تسمى النواة المركبة compound nucleus . ان طاقة الجسيم الساقط توزع بين النيوكليونات في النواة المركبة والتي تكون بحالة متهيجة جدا ، فمثلا في حالة تفاعل جسيمات الفا مع نوى النيتروجين تُكون النواة المركبة $\left[{}^{18}_{9}F^{*}\right]$ وعلامة النجمة تدل على حالة التهيج .

$${}^{4}_{2}He + {}^{14}_{7}N \rightarrow \left[{}^{18}_{9}F^{*}\right] \rightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{17}_{8}O$$

2-تنحل النواة المركبة بطريقة او اكثر معتمدة على طاقة تهيجها الى جسيمة او عدة جسيمات خارجة ونواة متبقية ، ان كل طريقة للتحلل تدعى بنمط او قناة Channal وكالاتي:-

$a+x \rightarrow [C_N]^* \rightarrow X+a$ استطارة مرنة

X^*+a استطارة غير مرنة

$y+b$

$d+m+n$

نلاحظ ان الجسيمتين الناتجتين من التصادم في الحالة الاولى والثانية من التفاعل اعلاه هما نفسهما الجسيمتان المتصادمتان فعليه يقال عن كل من هاتين القناتين استطارة ، وحيث ان النواة المتبقية في الحالة الاولى هي في الحالة الارضية وغير متهيجة لذا يقال عن الاستطارة بانها استطارة مرنة حيث تكون الطاقة الحركية محفوظة في هكذا استطارة . اما في التفاعل الثاني او القناة الثانية وحيث ان النواة المتبقية قد تُركت متهيجة فيقال عن الاستطارة بانها غير مرنة .

وقد تكون نواتج التفاعل عبارة عن نواة متبقية يصاحبها انبعاث فوتون واحد او اكثر من اشعة كاما او جسيمات نووية وكمثال على الحالات المذكورة نأخذ التفاعل الاتي:-

$$^{27}_{13}Al + ^{1}_{1}H \rightarrow \left[^{28}_{14}Si\right]^{*} \rightarrow {}^{24}_{12}Mg + {}^{4}_{2}He$$

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

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

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

ملاحظة / ان التفاعلات النووية يجب ان تتحقق بها قوانين الحفظ وهي :

1. **قانون حفظ الطاقة والكتلة .**
2. **قانون حفظ الزخم الخطي .**
3. **قانون حفظ الزخم الزاوي.**
4. **قانون حفظ الشحنة الكهربائي (قانون حفظ العدد الذري) .**
5. **قانون حفظ عدد النيوكلونات (قانون حفظ العدد الكتلي) .**

مثال ــــــــــــ $_{2}^{4}He + {}_{7}^{14}N \rightarrow [{}_{9}^{18}F^{*}] \rightarrow {}_{1}^{1}H + {}_{8}^{17}O$

مثال :- اكتب الرموز الناقصة والمشار اليها بالعلامة (؟) في التفاعلات النووية التالية

$^{10}_{5}\mathrm{B}\ (?,\alpha)\ ^{8}_{4}\mathrm{Be}$ ⟶ $^{10}_{5}B\ (d,\alpha)\ ^{8}_{4}Be$

$^{17}_{8}\mathrm{O}\ (\mathrm{d},\mathrm{n})\ ?$ ⟶ $^{17}_{8}O\ (d,n)\ ^{18}_{9}F$

$^{23}_{11}\mathrm{Na}\ (\mathrm{P},?)\ ^{20}_{10}\mathrm{Ne}$ ⟶ $^{23}_{11}Na\ (P,\alpha)\ ^{20}_{10}Ne$

$?\ (\mathrm{P},\mathrm{n})\ ^{37}_{18}\mathrm{Ar}$ ⟶ $^{37}_{17}Cl\ (P,n)\ ^{37}_{18}Ar$

$^{27}_{13}\mathrm{Al}\ (\gamma,?)\ ^{25}_{11}\mathrm{Na}$ ⟶ $^{27}_{13}Al\ (\gamma,2P)\ ^{25}_{11}Na$

❖ اصناف التفاعلات النووية :-

تم تصنيف التفاعلات النووية سابقا حسب الية التفاعل ايضا يمكن تصنيف التفاعلات النووية اعتمادا على طبيعة الجسيم الساقط وطاقة التصادم وطبيعة الهدف ونواتج التفاعل وكالاتي :-

اولا : طبيعة الجسيم الساقط : وتصنف الى :-

أ- تفاعلات الجسيمات المشحونة : حيث يتم التفاعل بقذف النواة الهدف بجسيمة مشحونة مثل البروتون P ، والديوترون $\left({}_{1}^{2}H^{+}\right)d$ وجسيمة الفا ${}_{2}^{4}He^{++}$ ومن امثلة هذه التفاعلات هي :-

$^{14}N(p,p)^{14}N$, $^{14}N(\alpha,P)^{17}O$, $^{18}O(p,n)^{18}F$, $^{14}N(p,p)^{14}N^{*}$

ب-تفاعلات النيوترون : تمتاز النيوترونات بكونها متعادلة الشحنة لذا فقد امتازت النيوترونات بانها لا تعاني من التنافر الكولومي عند اقترابها من النواة مما يعني نفوذها في النواة اسهل من نفوذ الجسيمات المشحونة. ومن تفاعلات النيوترونات:-

$$^{27}Al(n,\alpha)^{24}Na \ , \ ^{14}N(n,p)^{14}C \ , \ ^{27}Al(n,\gamma)^{28}Al$$

ج-التفاعلات النووية الضوئية : (تفاعل اشعة كاما مع النواة) مثل :

$^{27}Al(\gamma,n)^{26}Al$, $^{25}Mg(\gamma,p)^{24}Na$

ويمكن الحصول على طاقات عالية لاشعة كاما من التفاعلات النووية باستخدام المعجلات، ومن الامثلة على تفاعلات كاما ذلك الذي يتم به تجزئة الديوترون :

$$_1^2H_1 + \gamma \rightarrow [_1^2H^*] \rightarrow {}_1^1H + {}_0^1n_1$$

ثانيا : طاقة التصادم : اي الطاقة الحركية للقذيفة ، حيث تصنف التفاعلات النووية الى:

1. تفاعلات حرارية (Thermal) E=0.025 eV
2. تفاعلات فوق الحرارية (Epithermal) E=1 eV
3. تفاعلات نيوترونات بطيئة (Slow- neutron) $E \sim 1 KeV$
4. تفاعلات نيوترونات سريعة (Fast- neutron) $E \sim 0.1 - 10\ MeV$
5. تفاعلات الجسيمات المشحونة البطيئة (low-energy charged) $E \sim 0.1 - 10\ MeV$
6. تفاعلات ذات طاقة عالية (high – energy reactions) E>10 MeV

ثالثا: الهدف Target : تصنف النواة الهدف الى :

أ- نوى خفيفة إذا كان $A \leq 40$

ب- نوى متوسطة $40 < A < 150$

ج- نوى ثقيلة $A > 150$

رابعا : الجسيمات الناتجة (نواتج التفاعل) : -

X(p,p) X , elastic scattering

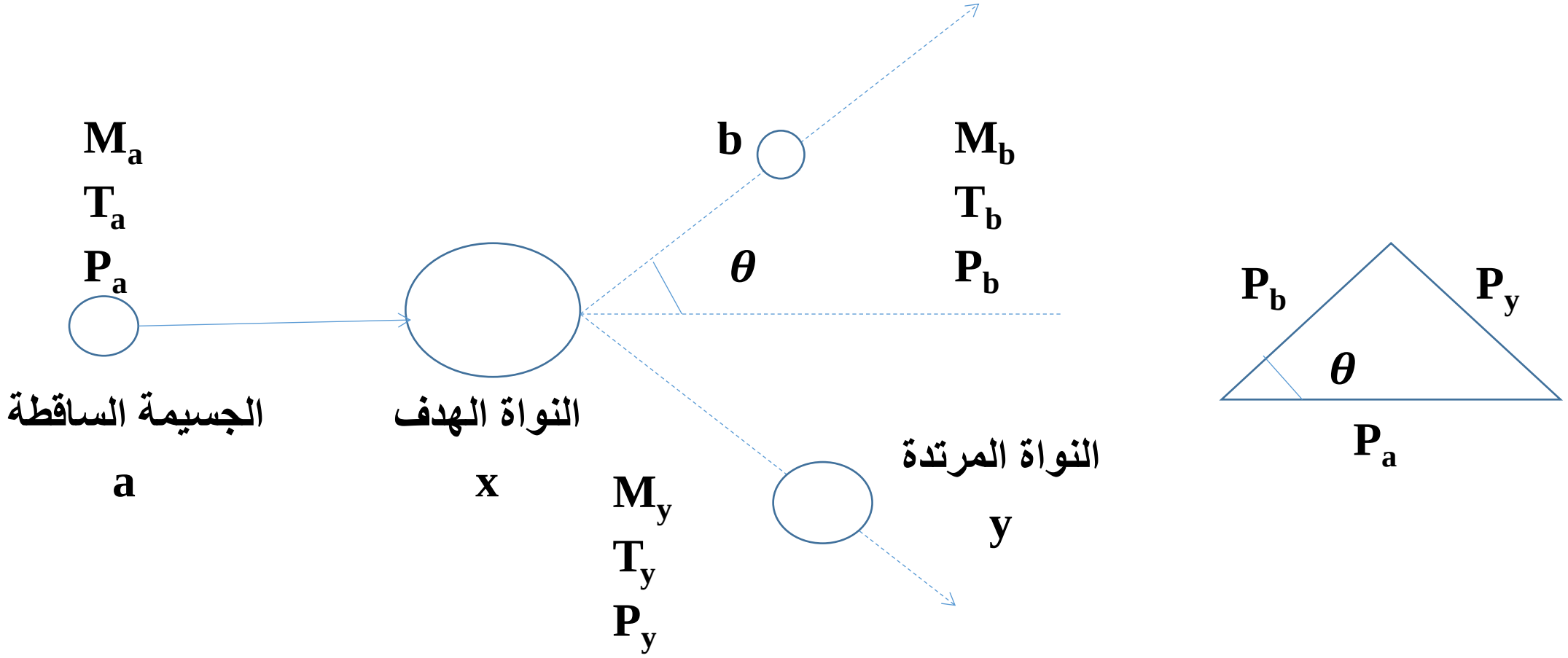
X(p,p) X^* , inelastic scattering

$^{14}N(p,\gamma)\ ^{15}O$, capture reaction

$^{235}_{92}U\left(n, ^{92}_{36}K + 3n\right)^{141}_{56}Ba$ **nuclear fission , spallation reaction**

حساب الطاقة في التفاعلات النووية :-

الشكل ادناه يمثل تفاعلا نوويا اعتياديا



نلاحظ ان (a) تمثل الجسيمة الساقطة او الجسيمة المقذوفة ، وان M_a , T_a , P_a هي على التوالي الكتلة والطاقة الحركية والزخم للجسيمة الساقطة التي تتفاعل مع نواة الهدف (X) والتي تكون مستقرة تقريبا ($T_x=0$) وذات كتلة M_x ، وبعد التفاعل تنبعث الجسيمة (b) ، بكتلة M_b وبطاقة حركية T_b وبزخم P_b ، والنواة المرتدة بكتلة M_y وطاقة حركية T_y ، وباستخدام قانون حفظ الطاقة يكون لدينا :-

$$M_aC^2+ T_a + M_xC^2 +T_x = M_bC^2 + T_b + M_yC^2 +T_y \ldots\ldots (2)$$

ولكن $T_x=0$ فيكون لدينا :

$$(M_a + M_x)C^2 - (M_b + M_y)C^2 = T_b + T_y - T_a \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

ان طاقة التفاعل (Q) تعرف بانها الفرق بين الطاقات الحركية النهائية والابتدائية ولهذا فان:

$$Q=T_{final} - T_{in} = (T_b + T_y) - (T_a + T_x)$$

وحيث ان $T_x=0$ فان :

$$Q= T_b + T_y - T_a \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

وبالتعويض عن قيمة Q في المعادلة (3) نحصل على :

$$Q= (M_a + M_x)C^2 - (M_b + M_y)C^2 \quad \ldots\ldots\ldots(5)$$

تستخدم العلاقة (5) لحساب طاقة التفاعل إذا كانت كتل الجسيمات الداخلة والناتجة في التفاعل معروفة بدقة عالية .

وبتطبيق قانون حفظ الزخم نحصل على :-

$$P_{a=} P_b + P_y \quad \text{.....(6)}$$

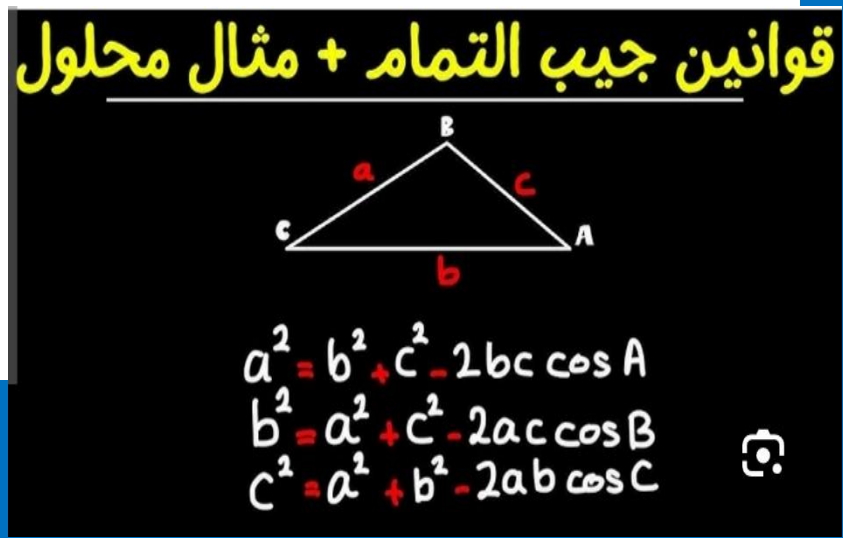
وبتطبيق قانون الجيب تمام على المثلث في الشكل السابق :

$$P_y^2 = P_a^2 + P_b^2 - 2P_aP_b\,cos\theta \quad \text{.....(7)}$$

وبما ان $P^2= 2MT$ ، $P= \sqrt{2MT}$ وبالتعويض عن قيم الزخوم في معادلة (7) :

$$2M_yT_y = 2\,M_aT_a + 2M_bT_b - 4\sqrt{M_aT_aM_bT_b}\,cos\theta$$

$$\therefore\ T_y = \frac{M_a}{M_y}T_a + \frac{M_b}{M_y}T_b - 2\frac{\sqrt{M_aT_aM_bT_b}}{M_y}cos\theta \quad \text{.....(8)}$$



وبتعويض معادلة (8) في (4) نحصل على :-

$$Q=\left(1+\frac{M_b}{M_y}\right)T_b-\left(1-\frac{M_a}{M_y}\right)T_a-2\frac{\sqrt{M_aT_aM_bT_b}}{M_y}cos\theta \qquad \text{.....(9)}$$

ملاحظة / ان الكتل في المعادلة (9) يمكن التعويض عنها بالاعداد الكتلية .

ان قيمة (Q) في المعادلة (9) يمكن ان تكون موجبة او سالبة او تساوي صفراً ، وعلى هذا الاساس يمكن تقسيم التفاعلات النووية الى قسمين تفاعلات باعثة للطاقة وتفاعلات ماصة للطاقة وكالاتي:-

❖ التفاعلات الباعثة للطاقة Exoergic reactions (Q>0):

تسمى التفاعلات النووية بالباعثة للطاقة عندما تكون طاقة التفاعل كمية موجبة Q>0 ، وهذا يعني ان الكتل الابتدائية اكبر من الكتل النهائية او ان الطاقات الحركية النهائية اكبر من الطاقات الحركية الابتدائية ، وهكذا فان تفاعلات من هذا النوع يمكن ان تحدث حتى عندما تكون طاقة الجسيمة الساقطة قريبة من الصفر ($T_{a\approx 0}$) ، ان ابرز نوع من هذه التفاعلات واهمها هي تفاعلات النيوترونات الحرارية (التي تكون طاقتها مساوية الى 0.025 eV تقريبا وذلك كما في التفاعل الاتي :

$$^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He \quad (Q = 2.8\ MeV)$$

فاذا كانت طاقة الجسيمة الساقطة تساوي صفراً تقريبا $T_{a\approx 0}$ ، يمكن ايجاد T_b من المعادلة (9) بدلالة طاقة التفاعل Q وفق المعادلة الاتية :-

$$Q=\left(1+\frac{M_b}{M_y}\right)T_b-\left(1-\frac{M_a}{M_y}\right)T_a-2\frac{\sqrt{M_aT_aM_bT_b}}{M_y}cos\theta \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(9)$$

$$T_b=\frac{M_y}{M_y+M_b}Q \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10)$$

من علاقة (10) نلاحظ ان الطاقة الحركية للجسيمات المنبعثة لا تعتمد على الزاوية θ وبهذا تكون T_b متساوية في جميع الاتجاهات .

❖التفاعلات الماصة للطاقة Endoergic reactions (Q<0):

تسمى التفاعلات ماصة للطاقة عندما تكون Q<0 ، فعندما تكون Q كمية سالبة وان $T_a=0$ فان طاقة الجسيمة المنبعثة في معادلة (9) تكون كمية سالبة ، وهذا يعني ان تفاعلات من هذا النوع لا يمكن ان تحدث بطاقات $T_a=0$ ، اي تفاعلات ذات عتبة Threashold reactions .

❖ طاقة العتبة (Threashold Energy) (T_{th}) :-

ان اقل قيمة لطاقة الجسيمة الساقطة $T_{a(min)}$ التي يمكن ان تحدث تفاعلا نوويا تسمى بطاقة العتبة (T_{th}) حيث :

$$T_{a(min)} = T_{threashold} = -Q \frac{M_y + M_b}{M_y + M_b - M_a} \quad \text{.....(11)}$$

ان العلاقة العامة التي تربط بين Q وكتل السكون هي :-

$$M_a + M_x = M_b + M_y + Q/C^2$$

وبما ان $M_x >> Q/C^2$ فان :

$$M_y = M_a + M_x - M_b \quad \text{..... (12)}$$

نعوض (12) في (11) فنحصل على طاقة العتبة :

$$T_{th} = -Q \frac{M_a + M_x}{M_x} \quad \text{.....(13)}$$

وبدلالة الاعداد الكتلية تصبح المعادلة (13)

$$T_{th} = -Q \left[\frac{A_a + A_x}{A_x}\right] = -Q \left[1 + \frac{A_a}{A_x}\right] \quad \text{.....(14)}$$

❖تفاعلات الاستطارة المرنة :-

بالنسبة الى الاستطارة المرنة ، حيث لا يكون هناك ربح او خسارة في الطاقة

قبل الاستطارة وبعدها فان $(Q=0)$ وان $M_a=M_b$ ، $M_x=M_y$.

ملاحظة / في حالة الاستطارة غير المرنة ، حيث ان النواة المقصوفة تنتقل الى مستوى اثارة (او تهيج) بعد التصادم نتيجة لاكتسابها جزءا من طاقة الجسيمة الساقطة ، لذا فان معادلة طاقة التفاعل يجب ان تضم طاقة مستوى الاثارة حيث ان :

$$Q_{ex} = 931.5 \left(M_a + M_x - M_y^* - M_b \right)$$

$$Q_0 = 931.5 \left(M_a + M_x - M_y - M_b \right)$$

$$Q_0 - Q_{ex} = 931.5 \left(M_y^* - M_y \right) = E_{ex}$$

$$E_n = Q_0 - Q_n$$

مثال/ إذا كانت قيمة Q للتفاعل التالي $^{26}Mg\ (p,\alpha)^{22}Na$ هي (-0.7 MeV) ، احسب الزاوية التي تصنعها جسيمات الفا الناتجة من التفاعل مع اتجاه البروتونات الساقطة علما ان الطاقة الحركية لجسيمات الفا هي (2 MeV) وان طاقة البروتونات الحركية هي (3 MeV) ؟

الحل /

$$Q= \left(1+\frac{M_b}{M_y}\right)T_b - \left(1-\frac{M_a}{M_y}\right)T_a - \frac{2}{M_y}\sqrt{M_a T_a M_b T_b}\,cos\theta$$

$$-0.7 = \left(1+\frac{4}{22}\right)*2 - \left(1-\frac{1}{22}\right)*3 - \frac{2}{22}\sqrt{1\times 3\times 4\times 2}\,cos\theta$$

$$-0.7 = 2.363 - 2.863 - 0.445\ \cos\theta$$

$$0.445\ \cos\theta = 0.2 \rightarrow \cos\theta = \frac{0.2}{0.445} = 0.449$$

$$\theta \cong 63.3^{o}$$

مثال / إذا كانت قيمة Q_0 للتفاعل $^{27}_{13}Al(p,\propto)^{24}_{12}Mg$ هي 1.594 MeV جد طاقة العتبة للتفاعل $^{24}_{12}Mg(\propto,p)^{27}_{13}Al$ عندما تكون نواة $^{27}_{13}Al$ متهيجة في مستوى طاقتة 0.842 MeV ؟

الحل / عندما يعكس التفاعل فان قيمة طاقة التفاعل (Q_0) للتفاعل الاصلي سوف تكون سالبة.

اذن قيمة Q_0 للتفاعل $^{24}_{12}Mg(\propto,p)^{27}_{13}Al$ تكون $Q_0 = -1.594$ MeV

$Q_n = Q_0 - E_n \rightarrow Q_n = -1.594 - 0.842 = -2.436$ MeV

$$E_{th} = -Q_n\left[1 + \frac{A_a}{A_x}\right] = -(-2.436) * \frac{28}{24}$$

$E_{th} = 2.842$ MeV

مثال / أ / في الاستطارة الكولومية لبروتونات بطاقة 7.5 MeV بواسطة هدف من $^{7}_{3}Li$ ، ما هي طاقة البروتونات المستطارة استطارة مرنة بزاوية 90^{o}؟

ب/احسب طاقة البروتونات المستطارة بزاوية 90^{o} باستطارة غير مرنة عندما ترتفع نواة $^{7}_{3}Li$ الى مستوى الاثارة الاولى ذي طاقة 0.477 MeV ؟

الحل/ أ- في الاستطارة المرنة فان $M_a = M_b$, $M_x = M_y$, $Q=0$

$$Q= \left(1+\frac{M_b}{M_y}\right)T_b - \left(1-\frac{M_a}{M_y}\right)T_a - 2\frac{\sqrt{M_aT_aM_bT_b}}{M_y}cos\theta$$

$$0 =(1+\frac{1}{7})\,T_b - \left(1-\frac{1}{7}\right)\times 7.5$$

$$0 = \frac{8}{7}\,T_b - \frac{6}{7}\times 7.5 \rightarrow\ T_b = 5.625\ MeV$$

ب- في الاستطارة غير المرنة $Q_{ex} = - E_{ex}$ وتساوي Q=-0.477 MeV

$$-0.477 = (\,1+\frac{1}{7})T_b - \left(1-\frac{1}{7}\right)\times 7.5$$

T_b= 5.2 MeV

مثال :- اذا كانت الطاقة الحرجة لبدء التفاعل ? $^{11}B(n,\alpha)$ هي (4 MeV) جد طاقة هذا التفاعل؟

علما ان $m_n = 1.008665\ u$, $m_B = 11.009305\ u$

الحل :-

$$E_{th} = -Q\left[1 + \frac{m_a}{m_x}\right]$$

$$E_{th} = -Q\left[1 + \frac{m_n}{m_B}\right]$$

$$4 = -\,Q\left[1 + \frac{1.008665}{11.009305}\right]$$

$$4 = -\,Q\,(\,1.09162)$$

$$Q = -\frac{4}{1.09162} = -\,3.6643\ MeV$$

واجب رقم 8

1. من التفاعل $^{11}_{5}B\ (d,\alpha)\ ^{9}_{4}Be$ ، سقط الديوترون بطاقة حركية (2.5 MeV) بينما انطلقت جسيمات الفا بطاقة حركية مقدارها (7 MeV) وخرجت بزاوية قائمة ، احسب قيمة طاقة التفاعل Q المذكور؟

2. برهن على ان التفاعل $^{3}H\ (p,n)^{3}He$ هو ماص للطاقة Endoergic reactions بينما اذا عُكس التفاعل ليصبح $^{3}He\ (n,p)^{3}H$ يتحول الى تفاعل باعث للطاقة Exoergic reactions ؟ علما ان

$M(p)=1.00727\ u$ ، $M(n)=1.00866\ u$

$M(^{3}He)= 3.016029\ u$ ، $M(^{3}H)= 3.01604\ u$

3. احسب طاقة التفاعل $^{14}N\ (\alpha,p)\ ^{17}O$ اذا كانت طاقة الحركة لجسيم الفا هي 4 MeV وانطلق البروتون بطاقة 2.09 MeV عند زاوية مقدارها 60^{o} مع اتجاه حركة جسيم الفا ؟

4. اذا كان من الضروري ان تمتلك النيوترونات اقل طاقة حركة 5 MeV لبدء التفاعل $(n\ ,\ \alpha)$ مع نواة البورون ^{10}B ثابتة ، اوجد طاقة التفاعل؟

الى هنا ننتهي من محاضرة هذا

اليوم وان شاء الله التقيكم

بالمحاضرة القادمة