



كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الثالثة

المادة : فيزياء نووية 1

المحاضرة : الرابعة / نظري /

{{ مكتبة A to Z }}

مكتبة A to Z Facebook Group :

كلية العلوم

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر (What's app-Telegram) على الرقم 0931497960

2026

6

التفاعلات النووية

مقدمة:

تُشكل دراسة التفاعلات النووية مصدراً هاماً لمعرفة البنية النووية، لذا كانت موضوع بحث معمق على الصعيدين التجريبي والنظري. ويُعرف التفاعل النووي بأنه عملية تؤدي إلى تحول في النوى الهدف بفعل الصدم من قبل جسيمات مسرعة.

يمكن أن يحدث في التفاعل النووي أحد الاحتمالات التالية:

- تفكك كامل للنوى عندما يتم قذفها بجسيم يمتلك كمية كبيرة من الطاقة.
- امتصاص للجسيم الساقط على النواة (غالباً ما يحدث في حال كان الجسيم الساقط نترون).
- انقسام النواة الهدف إلى نواتين جديدتين غير متماثلتين.
- انبعاث بروتونات، نترونات، جسيمات ألفا أو أشعة غاما.
- اندماج نووي بين نواتين خفيفتين مكونةً بذلك نوى أثقل من الجسيمات المتفاعلة. مثل اندماج الهيدروجين لإنتاج الهليوم وبترافق هذا مع طاقة تبلغ ثمانية أضعاف الطاقة المتحررة عند انشطار النوى الثقيلة.

تمثل التفاعلات النووية تصادم جسيمين الأول هو الجسيم القذيفة m_1 والثاني هو النواة الهدف m_2 مما يؤدي إلى إنتاج نوى جديدة m_3 و m_4 تختلف عن m_1 و m_2 .

في أي تفاعل نووي فإن الكميات الفيزيائية التالية يجب أن تبقى محفوظة: الشحنة، كمية الحركة والطاقة. إضافة إلى أن مجموع الأعداد الذرية Z ومجموع الأعداد الكتلية A يجب أن تبقى محفوظة قبل وبعد التفاعل.

التشتت المرن هو حالة خاصة من تصادم جسيمين حيث تكون النواتج مطابقة للجسيمات الداخلة في التفاعل أي $m_1 = m_3$ و $m_2 = m_4$. الطاقة الحركية الكلية وكمية الحركة قبل الصدم تساوي الطاقة الحركية الكلية وكمية الحركة بعد الصدم. جزء صغير جداً وقد يكون مهملاً من الطاقة الحركية ينتقل إلى الهدف.

وفي التشتت غير المرن بين القذيفة m_1 والنواة الهدف m_2 تكون النواتج بعد الصدم مطابقة للأجسام الداخلة في التفاعل $m_1 = m_3$ و $m_2 = m_4$ وينتقل جزء من الطاقة الحركية للجسيم القذيفة إلى النواة الهدف على شكل طاقة

حركية وأيضاً على شكل طاقة اثارة E^* . طاقة الاثارة E^* يمكن أن تكون اثارة لنواة الهدف، اثارة أو تأيين لذرة الهدف أو اصدار أشعة كبح بواسطة القذيفة.

وُرمز لنواتج التفاعلات التصادمية على الشكل التالي:

تفاعل نووي	تشتت مرن	تشتت غير مرن
$m_2(m_1, m_3)m_4$	$m_2(m_1, m_1)m_2$	$m_2(m_1, m_1)m_2^*$

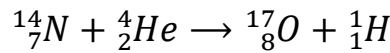
مثال عن تفاعل نووي: $^{14}_7N(d, P)^{15}_7N$

مثال عن تشتت مرن تشتت رذرفورد: $^{197}_{79}Au(\alpha, \alpha)^{197}_{79}Au$

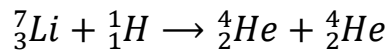
مثال عن تشتت غير مرن: $^A_ZX(\alpha, \alpha)^A_ZX \Rightarrow ^A_ZX^* \rightarrow ^A_ZX + \gamma$

عملية توجيه قذائف من نواتج النشاط الاشعاعي الطبيعي تجاه شرائح من العناصر كانت معروفة منذ تجارب غايغر وماردسون ورذرفورد 1909-1910. ونظراً لأن شرائح العناصر كانت مصنوعة من عناصر عددها الذري كبير مثل الذهب ($Z=79$) كانت قوة التنافر شديدة بين جسيمات ألفا المنطلقة من البولونيوم تجاه نوى الذهب ولذلك لا تقترب ألفا كثيراً من نوى الذهب.

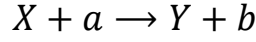
استمر رذرفورد في اجراء هذا النوع من التجارب حتى نجح أخيراً عام 1919 من اجراء أول تفاعل نووي حقيقي عندما وجه جسيمات ألفا المنطلقة من المصادر المشعة تجاه ذرات غاز النيتروجين المستقرة $^{14}_7N$ وكانت المفاجأة هي اختفاء جسيمات ألفا من مسارها بعد التصادم مع النيتروجين وانطلاق بروتون وتشكل نوى ذرات الأوكسجين:



استخدمت البروتونات المسرعة كقذائف تجاه نوى شريحة من الليثيوم 7_3Li وكان ذلك أول تفاعل نووي باستخدام الجسيمات المسرعة. نتيجة هذا التفاعل هو الاختفاء التدريجي لشريحة الليثيوم. نتيجة التصادم بين البروتونات المسرعة وشريحة الليثيوم ينتج كمية هائلة من الحرارة. فهل هذه الحرارة تسببت في تبخير ذرات الليثيوم؟ لو حدث ذلك لوجدنا آثار ذرات الليثيوم المتبخرة على جدران الغرفة التي كانت تحتوي شريحة الليثيوم وهي أساساً مفرغة من الهواء. الذي حدث هو تحول ذرات الليثيوم بعد اصطدامها بالبروتونات المسرعة الى نوى ذرات الهيليوم:



من المثالين السابقين يمكن تمثيل التفاعلات النووية بالمعادلة العامة التالية:

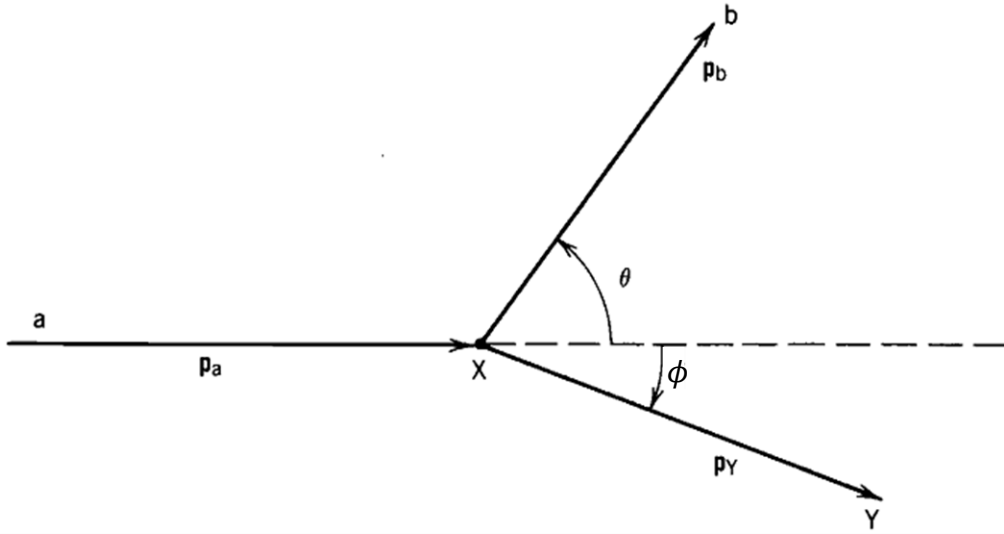


حيث X هي النواة الهدف، a الجسم القذيفة، Y النواة الجديدة المتشكلة، و b الجسم الناتج.

ويكمن تمثيل التفاعل بصورة مختصرة كمايلي: $X(a, b)Y$

حساب حرارة التفاعل Q :

معظم التجارب التي تُجرى على التفاعلات النووية في المختبرات (جملة احداثيات المخبر) تكون فيها شريحة الهدف وبالتالي النوى المكونة لها ثابتة في الفراغ أي أن طاقتها الحركية تساوي الصفر. وينطلق الجسم القذيفة بسرعة ما تجاه النوى الهدف أي يكون له طاقة حركية واتجاه. بعد التفاعل تنطلق النواة الجديدة المتشكلة والجسيم الناتج كل منهما في اتجاه وتكون حركتهما الى الأمام وهو اتجاه سقوط القذيفة. وحيث أن كتليهما مختلفتين فأن سرعتيهما ستكون مختلفتين ويصنعان زاويتين مختلفتين مع اتجاه



الاسقاط.

الشكل 1 تفاعل نووي في جملة احداثيات المخبر حيث تصطدم القذيفة a مع النواة الساكنة X وينتج نواة جديدة Y تنشتت بالزاوية ϕ عن اتجاه سقوط القذيفة، و جسيم b يتشتت بالزاوية θ عن اتجاه سقوط القذيفة.

كمية الحركة والطاقة الكلية في أي تفاعل نووي تكون محفوظة:

1- تُطبق قانون انحفاظ كمية الحركة:

بالاسقاط على المحور X

$$m_a v_a = m_b v_b \cos\theta + m_Y v_Y \cos\phi \dots \dots \dots (1)$$

بالاسقاط على المحور Y

$$0 = m_b v_b \sin\theta - m_Y v_Y \sin\phi \dots \dots \dots (2)$$

بتربيع طرفي المعادلتين السابقتين نجد:

$$(m_a v_a - m_b v_b \cos\theta)^2 = (m_Y v_Y \cos\phi)^2 \dots \dots \dots (3)$$

$$(m_b v_b \sin\theta)^2 = (m_Y v_Y \sin\phi)^2 \dots \dots \dots (4)$$

بفك المتطابقة الموجودة في العلاقة 3:

$$m_a^2 v_a^2 - 2m_a v_a m_b v_b \cos\theta + m_b^2 v_b^2 \cos^2\theta = m_Y^2 v_Y^2 \cos^2\phi \dots \dots \dots (5)$$

$$m_b^2 v_b^2 \sin^2\theta = m_Y^2 v_Y^2 \sin^2\phi \dots \dots \dots (6)$$

بجمع المعادلتين 5 و 6 نجد:

$$m_a^2 v_a^2 - 2m_a v_a m_b v_b \cos\theta + m_b^2 v_b^2 = m_Y^2 v_Y^2 \dots \dots \dots (7)$$

2- وبتطبيق قانون انحفاظ الطاقة:

$$\frac{1}{2} m_a v_a^2 + m_a c^2 + 0 + m_X c^2 = \frac{1}{2} m_b v_b^2 + m_b c^2 + \frac{1}{2} m_Y v_Y^2 + m_Y c^2 \dots \dots \dots (8)$$

وبعد تجميع الحدود المتشابهة في الخصائص الفيزيائية:

$$(m_X + m_a - m_Y - m_b) c^2 = \frac{1}{2} m_Y v_Y^2 + \frac{1}{2} m_b v_b^2 - \frac{1}{2} m_a v_a^2 = Q \dots \dots \dots (9)$$

قيمة Q تُعبر عن حرارة التفاعل وهو مقياس تحول الطاقة في التفاعلات النووية. فإذا كانت $Q > 0$ فإن ذلك يدل على أن كتل النوى المتفاعلة أكبر من كتل النوى الناتجة عن التفاعل وهذا يعني تحول جزء من كتلة النوى المتفاعلة الى طاقة. وعندما $Q > 0$ يكون التفاعل النووي ناشر للحرارة (Exothermic). أما اذا حدث العكس وكانت $Q < 0$ فإن كتل النوى الناتجة تكون أكبر من النوى المتفاعلة وهذا يعني تحول جزء من الطاقة الحركية للنوى الداخلة في التفاعل الى كتلة للنوى الناتجة عن التفاعل. وفي هذه الحالة عندما $Q < 0$ يكون التفاعل ماص للحرارة (Endothermic).

من المعادلة 9:

$$Q = (m_X + m_a - m_Y - m_b)c^2 = (m_{initial} - m_{final})c^2 \dots \dots \dots (10)$$

$$Q = \frac{1}{2}m_Y v_Y^2 + \frac{1}{2}m_b v_b^2 - \frac{1}{2}m_a v_a^2 = E_{final} - E_{initial} \dots \dots \dots (11)$$

بالعودة للمعادلة (7) نكتب:

$$2m_a \frac{1}{2}m_a v_a^2 + 2m_b \frac{1}{2}m_b v_b^2 - 2m_a v_a m_b v_b \cos\theta = 2m_Y \frac{1}{2}m_Y v_Y^2 \dots \dots (12)$$

$$2m_a E_a + 2m_b E_b - 2m_a v_a m_b v_b \cos\theta = 2m_Y E_Y \dots \dots \dots (13)$$

من المعادلة (11) $E_{final} = E_Y + E_b$

$$E_Y = Q + E_a - E_b \dots \dots \dots (14)$$

بضرب طرفي العلاقة 14 ب $2m_Y$:

$$2m_Y E_Y = 2m_Y(Q + E_a - E_b) \dots (15)$$

بتعويض 15 في العلاقة 13 نجد:

$$2m_a E_a + 2m_b E_b - 2m_a v_a m_b v_b \cos\theta = 2m_Y(Q + E_a - E_b) \dots (16)$$

$$\frac{m_a}{m_Y} E_a + \frac{m_b}{m_Y} E_b - \frac{m_a v_a m_b v_b}{m_Y} \cos\theta + E_b - E_a = Q \dots \dots \dots (17)$$

$$Q = -E_a \left(1 - \frac{m_a}{m_Y}\right) + E_b \left(1 + \frac{m_b}{m_Y}\right) - \frac{m_a v_a m_b v_b}{m_Y} \cos\theta \dots \dots \dots (18)$$

من علاقة الطاقة الحركية $E_a = \frac{1}{2}m_a v_a^2$ ومنه $v_a = \sqrt{\frac{2E_a}{m_a}}$

$E_b = \frac{1}{2}m_b v_b^2$ ومنه $v_b = \sqrt{\frac{2E_b}{m_b}}$

نعوض v_b و v_a في العلاقة 18:

$$Q = -E_a \left(1 - \frac{m_a}{m_Y}\right) + E_b \left(1 + \frac{m_b}{m_Y}\right) - \frac{m_a \sqrt{\frac{2E_a}{m_a}} m_b \sqrt{\frac{2E_b}{m_b}}}{m_Y} \cos\theta \dots \dots \dots (19)$$

$$Q = -E_a \left(1 - \frac{m_a}{m_Y}\right) + E_b \left(1 + \frac{m_b}{m_Y}\right) - \frac{\sqrt{\frac{m_a^2 2E_a}{m_a}} \sqrt{\frac{m_b^2 2E_b}{m_b}}}{m_Y} \cos\theta \dots \dots \dots (20)$$

$$Q = -E_a \left(1 - \frac{m_a}{m_Y}\right) + E_b \left(1 + \frac{m_b}{m_Y}\right) - \sqrt{\frac{4m_a m_b E_a E_b}{m_Y^2}} \cos\theta \dots \dots \dots (21)$$

$$Q = -E_a \left(1 - \frac{m_a}{m_Y}\right) + E_b \left(1 + \frac{m_b}{m_Y}\right) - 2 \sqrt{\frac{m_a m_b E_a E_b}{m_Y^2}} \cos\theta \dots \dots \dots (22)$$

$$m_Y Q = E_b(m_Y + m_b) - E_a(m_Y - m_a) - 2(m_a m_b E_a E_b)^{\frac{1}{2}} \cos\theta \dots \dots (23)$$

لايجاد العلاقة بين E_b و $\cos\theta$ نعيد ترتيب العلاقة 23 على الشكل التالي:

$$E_b(m_Y + m_b) - 2(m_a m_b E_a)^{\frac{1}{2}} \cos\theta E_b^{\frac{1}{2}} - E_a(m_Y - m_a) - m_Y Q = 0 \quad (24)$$

بفرض أن $E_b = x^2$ فإن $E_b^{1/2} = x$ فإن العلاقة 24 يمكن كتابتها على شكل معادلة من الدرجة الثانية: $ax^2 - 2bx - c = 0$

حيث $a = m_Y + m_b$ ، $b = (m_a m_b E_a)^{\frac{1}{2}} \cos\theta$ ، $c = E_a(m_Y - m_a) - m_Y Q$

حل معادلة من الدرجة الثانية يُعطى بالعلاقة:

$$x = \frac{-b \mp \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

وبالتالي فإن E_b تُعطى بالعلاقة:

$$E_b^{1/2} = \frac{(m_a m_b E_a)^{1/2} \cos\theta \mp [m_a m_b E_a \cos^2\theta + (m_Y + m_b)[m_Y Q + (m_Y - m_a)E_a]^{1/2}}{m_Y + m_b}$$

وهذه العلاقة تُعطي الطاقة الحركية للجسيم b الناتج عن التفاعل باستخدام نظام احداثيات المخبر وفي التقريب اللانسبي $c \ll v$.

طاقة العتبة للتفاعلات النووية:

تُعرف طاقة العتبة بأنها الحد الأدنى للطاقة الكلية أو الحد الأدنى للطاقة الحركية التي يجب أن تمتلكها القذيفة حتى يمكن حدوث تفاعل تكون فيه $Q < 0$. يمكن تحديد طاقة العتبة من أجل تفاعلات تصادمية يكون فيها $Q < 0$ باستخدام ما يُسمى المقدار الثابت في نظرية النسبية:

$$E^2 - \vec{P}^2 c^2 = Const \dots \dots \dots (1)$$

يكون هذا المقدار ثابت مهما كانت جملة الاحداثيات المستخدمة (احداثيات المخبر أو مركز الكتلة). حيث تمثل E الطاقة الكلية قبل التصادم والطاقة الكلية بعد التصادم، P تمثل كمية الحركة قبل التصادم وكمية الحركة بعد التصادم، و c هي سرعة الضوء.

سنكتب شروط الانحفاظ قبل التصادم في جملة احداثيات المخبر وسنكتب شروط الانحفاظ بعد التصادم في جملة مركز الكتلة.

أولاً- قبل التصادم: تُكتب الطاقة الكلية في جملة احداثيات المخبر كمايلي:

$$E_{thr} + m_2 c^2 = \sqrt{m_1^2 c^4 + \vec{P}_1^2} + m_2 c^2 \dots \dots \dots (2)$$

حيث $E_{thr} = \sqrt{m_1^2 c^4 + \vec{P}_1^2}$ تمثل طاقة العتبة للقذيفة. و \vec{P}_1 كمية الحركة للقذيفة قبل التصادم.

ثانياً- بعد التصادم: تُكتب الطاقة الكلية في جملة مركز الكتلة كمايلي:

$$E = m_3 c^2 + m_4 c^2 \dots \dots \dots (3)$$

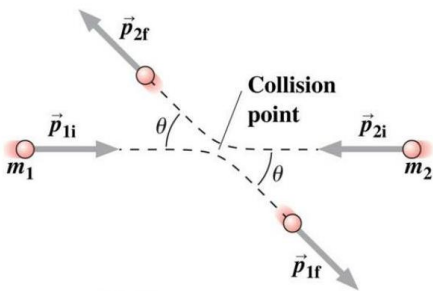
حيث m_3 و m_4 هي كتل النوى الناتجة بعد التصادم والطاقة الكلية لهذه النوى هي طاقتها الكامنة فقط لأنها تُعتبر ثابتة في جملة مركز الكتلة أي أنها لا تمتلك طاقة حركية.

وكمية الحركة الكلية بعد التصادم في جملة مركز الكتلة تكون معدومة:

$$\sum \vec{P} = 0$$

باستخدام المقدار الثابت $E^2 - \vec{P}^2 c^2$ مهما كانت جملة الاحداثيات:

Center of Mass Frame



$$P_i = P_f = 0$$

الشكل 2 التصادم في جملة احداثيات مركز الكتلة

$$E^2 - \vec{P}^2 c^2 = \left(\sqrt{m_1^2 c^4 + \vec{P}_1^2} + m_2 c^2 \right)^2 - \vec{P}_1^2 c^2 = (m_3 c^2 + m_4 c^2)^2 - 0 \quad (4)$$

حيث تم كتابة العلاقة (4) لتمثل الطاقة الكلية قبل الصدم في جملة المخبر و بعد الصدم في جملة مركز الكتل.

وبحل العلاقة (4) باستخدام $E_{thr} = \sqrt{m_1^2 c^4 + \vec{P}_1^2}$ طاقة العتبة الكلية للقذيفة نجد:

$$E_{thr} = \frac{(m_3 c^2 + m_4 c^2)^2 - (m_1^2 c^4 + m_2^2 c^4)}{2m_2 c^2} \dots \dots \dots (5)$$

بما أن E_{thr} هي الطاقة الكلية فهي حاصل جمع الطاقة الكامنة والطاقة الحركية:

$$E_{thr} = (E_K)_{thr} + m_1 c^2 \dots \dots \dots (6)$$

وبالتعويض عن E_{thr} من العلاقة (5) في العلاقة (6) نجد أن طاقة العتبة الحركية للقذيفة $(E_K)_{thr}$:

$$(E_K)_{thr} = \frac{(m_3 c^2 + m_4 c^2)^2 - (m_1 c^2 + m_2 c^2)^2}{2m_2 c^2} \dots \dots \dots (7)$$

سنحاول إيجاد العلاقة بين $(E_K)_{thr}$ و حرارة التفاعل Q حيث وجدنا سابقاً أن Q تُعطى بالعلاقة:

$$Q = (m_1 c^2 + m_2 c^2) - (m_3 c^2 + m_4 c^2)$$

ومن هذه العلاقة نجد أن:

$$(m_3 c^2 + m_4 c^2)^2 = (m_1 c^2 + m_2 c^2)^2 + Q^2 - 2Q(m_1 c^2 + m_2 c^2) \dots \dots (8)$$

وبتعويض (8) في العلاقة (7) نجد:

$$(E_K)_{thr} = -Q \left[\frac{m_1 c^2 + m_2 c^2}{m_2 c^2} - \frac{Q}{2m_2 c^2} \right] \approx -Q \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right) \dots \dots \dots (9)$$

حيث $Q \ll m_2 c^2$ لذلك يمكن اهمال الحد $\frac{Q}{2m_2 c^2}$.

طاقة الحاجز الكولوني:

هي طاقة مهمة في التفاعلات النووية عندما تكون القذيفة جسيم مشحون مثل جسيم ألفا α ، الديتريوم 2_1H ، التريتيوم 3_1H و البروتون 1_1H والنوى الثقيلة. وذلك لأن الجسيم المشحون حتى يتمكن من اختراق الحاجز الكولوني للنواة فإنه يجب أن يمتلك طاقة حركية كافية تمكنه من التغلب على قوة التنافر الكولوني حتى لو كانت حرارة التفاعل $Q > 0$. في هذه الحالة فإن الحاجز الكولوني E_{coul} تمثل طاقة العتبة الفعلية للقذيفة مالم تكون الطاقة الحركية للقذيفة $(E_K)_{thr}$ أكبر من طاقة الحاجز الكولوني.

$$E_{coul} \approx \int_{\infty}^{R_{sep}} F_{coul} dr = \frac{z_1 e z_2 e}{4\pi\epsilon_0} \int_{\infty}^{R_{sep}} \frac{dr}{r^2} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{z_1 z_2}{R_{sep}}$$

حيث: $R_{sep} = R_1 + R_2$ المسافة الفاصلة بين مركز النواة الهدف و مركز الجسيم القذيفة. $R_1 = R_0 A_1^{1/3}$ و $R_2 = R_0 A_2^{1/3}$ و $R_0 = 1.25 fm$.

$$E_{coul} \approx \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{z_1 z_2}{R_0 (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})}$$

مع $c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R_0} = 1.15 MeV$ ثابت الحاجز الكولوني.

ومنه:

$$E_{coul} \approx 1.15 \frac{z_1 z_2}{(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})}$$

تمرين 1: ليكن لدينا التفاعل النووي $^{12}_6C(n, \alpha)^9_4Be$

- احسب Q.

- احسب $(E_K)_{thr}$ للقذيفة.

$$m_n = 939.5653 MeV, m_{^{12}_6C} = 11174.8625 MeV,$$

$$m_\alpha = 3727.3791 MeV, m_{^9_4Be} = 8392.7499 MeV$$

- احسب طاقة الحاجز الكولوني.

تمرين 2: من أجل التفاعل النووي $^{14}_6C(p, n)^{14}_7N$ فإن $Q = -0.63 MeV$

- احسب $(E_K)_{thr}$ للقذيفة

$$m_p = 938.272 MeV, m_{^{14}_6C} = 13040.87 MeV.$$

تمرين 3: من أجل التفاعل النووي $^{14}_7N(n, \alpha)^{11}_5B$

- احسب Q.
- $m_n = 939.5653 \text{ MeV}, m_{\text{}^{14}_7\text{N}} = 13040.2028 \text{ MeV},$
 $m_{\alpha} = 3727.3791 \text{ MeV}, m_{\text{}^{11}_5\text{B}} = 10252.547 \text{ MeV}$
- احسب طاقة العتبة للتفاعل.



مكتبة
A to Z