كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الثالثة

المادة : نووية١

المحاضرة : الرابعة/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

٦

2025

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

# 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 الى 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 مايحدث في حال كان الجسيم الساقط نترون).
- انقسام النواة الهدف الى 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 ويترافق هذا مع طاقة تبلغ ثمانية أضعاف الطاقة المتحررة عند انشطار النوى الثقيلة.

تُمثل التفاعلات النووية تصادم جسيمين الأول هو الجسيم القذيفة $m_1$ والثاني هو النواة الهدف $m_2$ مما يؤدي الى انتاج نوى جديدة $m_3$ و $m_4$ تختلف عن $m_1$ و $m_2$.

في أي تفاعل نووي فأن الكميات الفيزيائية التالية يجب أن تبقى محفوظة: الشحنة، كمية الحركة والطاقة. اضافةً الى 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 مهمل من الطاقة الحركية ينتقل الى 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 الى 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.

ونُرمز لنواتج التفاعلات التصادمية على الشكل التالي:

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

مثال عن تفاعل نووي: ${}^{14}_{7}N(d,P){}^{15}_{7}N$

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

مثال عن تشتت غير مرن: ${}^{A}_{Z}X(\alpha,\alpha){}^{A}_{Z}X \implies {}^{A}_{Z}X^* \longrightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma$

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 ${}^{14}_{7}N$ وكانت المفاجأة هي اختفاء جسيمات ألفا من مسارها بعد التصادم مع النيتروجين وانطلاق بروتون وتشكل نوى ذرات الأوكسجين:

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

استخدمت البروتونات المسرعة كقذائف تجاه نوى شريحة من الليثيوم ${}^{7}_{3}Li$ 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:

$$ {}^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{4}_{2}He $$

من المثالين السابقين يمكن تمثيل التفاعلات النووية بالمعادلة العامة التالية:

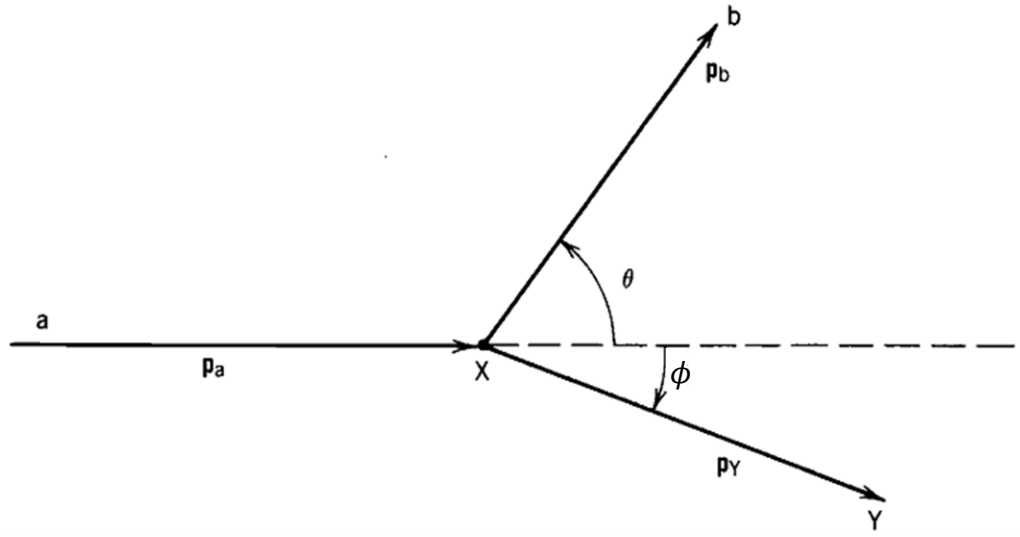
$$X + a \longrightarrow Y + b$$

حيث $X$ هي النواة الهدف، $a$ الجسيم القذيفة، $Y$ النواة الجديدة المتشكلة، و $b$ الجسيم 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 الجسيم 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 كتلتيهما 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 $Y$ تتشتت بالزاوية $\emptyset$ عن اتجاه سقوط القذيفة، و جسيم $b$ يتشتت بالزاوية $\theta$ عن اتجاه سقوط القذيفة.

كمية الحركة والطاقة الكلية في أي تفاعل نووي تكون محفوظة:

1-نُطبق قانون انحفاظ كمية الحركة:

بالاسقاط على المحور $X$

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

بالاسقاط على المحور Y

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

بتربيع طرفي المعادلتين السابقتين نجد:

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

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

بفك المتطابقة المجودة في العلاقة 3:

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

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

بجمع المعادلتين 5 و 6 نجد:

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

2-وبتطبيق قانون انحفاظ الطاقة:

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

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. فاذا كانت $Q > 0$ فأن 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 $Q < 0$ فأن 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:

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

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

بالعودة للمعادلة ( 7) نكتب:

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

نعوض $v_a$ و $v_b$ في العلاقة 18:

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

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

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

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

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

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

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

بفرض أن $E_b = x^2$ فأن $E_b^{1/2} = x$ فأن 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 فأن $E_b$ تُعطى بالعلاقة:

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

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

## 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 مايُسمى المقدار الثابت في نظرية النسبية:

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

يكون هذا المقدار ثابت مهما كانت جملة الاحداثيات المستخدمة (احداثيات المخبر أو مركز الكتل). حيث تمثل $E$ الطاقة الكلية قبل التصادم والطاقة الكلية بعد التصادم، $P$ تُمثل 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 الكتل.

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

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

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

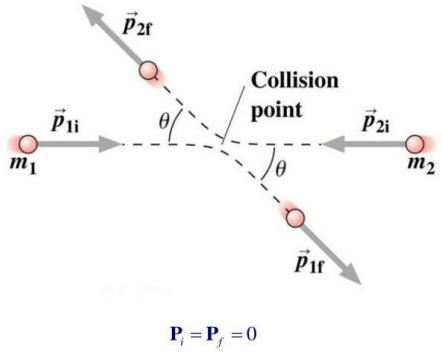
ثانياً- بعد التصادم: تُكتب الطاقة الكلية في جملة مركز الكتل كمايلي:

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

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 الكتل أي أنها لاتمتلك طاقة حركية.

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

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



الشكل 2 التصادم في جملة احداثيات مركز الكتل

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

$$E^2 - \vec{P}^2c^2 = \left( \sqrt{m_1^2c^4 + \vec{P}_1^2} + m_2c^2 \right)^2 - \vec{P}_1^2c^2 = (m_3c^2 + m_4c^2\ )^2 - 0(\ 4)$$

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

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

$$E_{thr} = \frac{(\ m_3c^2 + m_4c^2)^2 - (m_1^2c^4 + m_2^2c^4)}{2m_2c^2} \dots\dots\dots\dots (5)$$

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

$$E_{thr} = (E_K)_{thr} + m_1c^2 \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (6)$$

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

$$(E_K)_{thr} = \frac{(\ m_3c^2 + m_4c^2)^2 - (m_1c^2 + m_2c^2)^2}{2m_2c^2} \dots\dots (7)$$

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

$$Q = (m_1c^2 + m_2c^2) - (m_3c^2 + m_4c^2)$$

ومن هذه العلاقة نجد أن:

$$(m_3c^2 + m_4c^2)^2 = (m_1c^2 + m_2c^2)^2 + Q^2 - 2Q(m_1c^2 + m_2c^2) \dots (8)$$

وبتعويض ( 8) في العلاقة (7 ) نجد:

$$(E_K)_{thr} = -Q\left[\frac{m_1c^2 + m_2c^2}{m_2c^2} - \frac{Q}{2m_2c^2}\right] \approx -Q(1 + \frac{m_1}{m_2}) \dots\dots\dots (9)$$

حيث $Q \ll m_2c^2$ لذلك يمكن اهمال الحد $\frac{Q}{2m_2c^2}$ .

## طاقة الحاجز الكولوني:

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

$$E_{coul} \approx \int_{\infty}^{R_{sep}} F_{coul}\, dr = \frac{z_1 e\, z_2 e}{4\pi\varepsilon_0} \int_{\infty}^{R_{sep}} \frac{dr}{r^2} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} \frac{z_1 z_2}{R_{sep}}$$

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 $R_0 = 1.25\ fm$.

$$E_{coul} \approx \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} \frac{z_1 z_2}{R_0 (A_1^{\frac{1}{3}} + A_2^{\frac{1}{3}})}$$

مع $c = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 R_0} = 1.15\ MeV$ ثابت الحاجز الكولوني.

ومنه:

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

تمرين1: ليكن لدينا التفاعل النووي $^{12}_{6}C(n,\alpha)^{9}_{4}Be$

- احسب Q.
- احسب $(E_K)_{thr}$ للقذيفة.

$m_n = 939.5653\ MeV, m^{12}_{6}C = 11174.8625\ MeV,$
$m_\alpha = 3727.3791\ MeV, \quad m^{9}_{4}Be = 8392.7499\ MeV$

-احسب طاقة الحاجز الكولوني.

تمرين2 : من أجل التفاعل النووي $^{14}_{6}C(p,n)^{14}_{7}N$ فأن $\mathrm{Q} = -0.63\ \mathrm{MeV}$

- احسب $(E_K)_{thr}$ للقذيفة

$m_p = 938.272\ MeV, m_{^{14}_{6}C} = 13040.87\ MeV.$

تمرين3 : من أجل التفاعل النووي $^{14}_{7}N(n,\alpha)^{11}_{5}B$

- احسب Q.

$m_n = 939.5653\ MeV, m^{14}_{7}N = 13040.2028\ MeV,$
$m_\alpha = 3727.3791\ MeV, \qquad m^{11}_{5}B = 10252.547\ MeV$

- احسب طاقة العتبة للتفاعل.

مكتبة A to Z