التفاعلات النووية

التفاعلات النووية : تقصد بها التحولات التلقائية أو الاصطناعية التي تحدث لبعض النوى الذرية إلى أنوية أخرى ويتضمن ذلك إعادة ترتيب وترتيب محتويات النواة أو التغير الذي يحدث في عدد النيوترونات أو البروتونات داخلها .

- قد يصاحب التفاعلات النووية بعض ما يلي :
  - إضمحلال كامل (تام) لنواة الذرية عندما تقذف بجسيم يحتلك طيف عظيم من الطاقة (طاقة حركة - سرعة) .
  - إستحواذ الجسيم المتساقط على النواة - غالباً يحدث مع النيوترونات .
  - إنقسام النواة المقذوفة إلى جزأين غير متساويين .
  - إنبعاث بروتونات - نيوترونات - جسيمات ألفا و/أو أشعة جاما .

- تتضمن التفاعلات النووية - الإندماج النووي - تكون بذلك أنوية أثقل من الجسيمات المتفاعلة مثل إندماج الهيدروجين لإنتاج الهيليوم منتجة بذلك طاقة تبلغ ثمانية أضعاف الطاقة المتحررة عند إنشطار الأنوية للعناصر الثقيلة .

- بالرغم من أن التفاعلات النووية تأخذ أشكالاً متعددة إلا أنه أشهرها هو :
  - توجيه جسيم متحرك (سريع مقذوف) تجاه أنوية عنصر (تسمى الهدف وهي ثابتة - طاقة حركتها تساوي صفر) وينتج عن ذلك جسيم جديد (الجسيم النابج) ونواة جديدة (النواة النابجة)

مثال : عملية توجيه قذائف من نوابغ النشاط الإشعاعي الطبيعي تجاه شرائح من العناصر كانت معروفة منذ تجارب جيجر ومارسدن وراذرفورد ١٩٠٩ - ١٩١٠ . ونظراً لأن شرائح العناصر كانت مصنوعة من عناصر عددها الذري كبير مثل الذهب ($_{79}Au$) كانت قوة التنافر شديدة بين جسيمات ألفا المنطلقة من البولونيوم - ٢١٠ تجاه أنوية الذهب ولذلك لا تقترب النواة وجسيمات ألفا إلا المسافة لا تكفي لتجاوزها وتسمى نقطة الإستطارة

- إستمر راذرفورد في إجراء هذا النوع من التجارب وكللها مع عناصر أخف من الذهب حتى نجح أخيراً عام ١٩١٩ من إجراء أول تفاعل نووي حقيقي عندما وجه جسيمات ألفا المنطلقة من العناصر المشعة تجاه ذرات غاز النيتروجين المستقرة ($_7N^{14}$) وكانت المفاجأة :

- إختفاء جسيمات ألفا من مسارها بعد التصادم مع النيتروجين وانطلاق بروتون .
- تكون أنوية ذرات الأكسجين . يمكن تمثيل ذلك بالمعادلة التالية .

$$_7N^{14} + {}_2He^4 \longrightarrow {}_8O^{17} + {}_1P^1$$

٥٤

هل تتذكر لماذا تُدعى المعجلات النووية ؟

مثال

- إستخدمت البروتونات المعجلة كقذائف تجاه الأنوية من ذرية من الليثيوم-٧ ($_3Li^7$). حيث تم أول تفاعل نووي باستخدام الجسيمات المعجلة وقد تم ذلك بواسطة من قاموا ببناء أول معجل نووي وهما كوكروفت ووالتون عام ١٩٢٠

• نتيجة هذا التفاعل هو الإختفاء التدريجي لذرية الليثيوم . فأيه ذهبت ؟

- نتيجة التصادم بين البروتونات المعجلة وذرية الليثيوم ينتج كمية هائلة من الحرارة فهل هذه الحرارة تسببت في تبخير ذرات الليثيوم ؟ لو حدث ذلك لوجدت آثار ذرات الليثيوم المتبخرة على جدران الغرفة التي كانت تحتوي ذرية الليثيوم وهي أساساً مفرغة من الهواء .

• الذي حدث هو تحول ذرات الليثيوم بعد اصطدامها بالبروتونات المعجلة إلى أنوية ذات الهليوم . فكيف عرفوا ذلك ؟ ومن ثم يمكن تمثيل التفاعل بالمعادلة التالية

$$_3Li^7 + {}_1P^1 \longrightarrow {}_2He^4 + {}_2He^4$$

- من المثاليين السابقين يمكن تمثيل التفاعلات النووية من هذا النوع بالمعادلة العامة التالية

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

X : نواة الهدف ، a : المقذوف ، Y : النواة الناتجة ، b : الجسيم الناتج

ويمكن أيضاً تمثيل التفاعل بصورة مختصرة كما يلي

$$X(a,b)Y$$

ويوضع في الاعتبار أنه قد تكون جسيم مكون (جسيم ألفا - بروتون ...) أو غير مكون (نيوترون) أو حتى أشعة جاما .

سؤال: ما هي فائدة التفاعلات النووية ؟

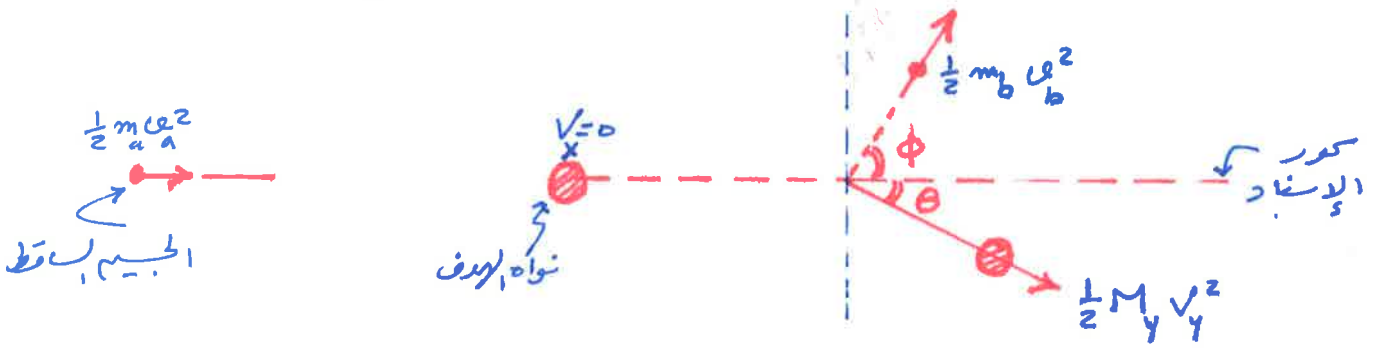
- أجريت هذه التجارب منذ البداية في فترة لم يكن أحد يعلم المكونات الحقيقية للنواة الذرية وإنما مجرد افتراضات لنماذج فقط وقد تراكم كم هائل من نتائج النشاط الإشعاعي ورسخ نموذج يوهر في تفسير بعض الظواهر المتعلقة بالأطياف الذرية وفشل في تفسير بعضها وبقيت النواة تحمل من الخصائص أكثر مما كانت تحمله الذرة قبل تجارب طومسون .

- ساهمت دراسة التفاعلات النووية في فهم أدق وأعمق لتركيب وترتيب مكونات النواة وكذا توزيع الطاقة بين مكونات النواة وقدمت تقييماً للنماذج المقترحة لتركيب النواة من العناصر المتباينة بالجدول الدوري .

* سنتعرف على بعض هذه النماذج فيما بعد .

التحليل الرياضي للتفاعلات النووية

- معظم التجارب التي تجرى على التفاعلات النووية في المختبرات تكون سترمية الهدف وبالتالي الأنوية المكونة لا تابثة في الغالب أي أنه طاقة حركتي تساوي صفر.
- يتطلع القذوف بسرعة ما تجاه الهدف أي له طاقة حركة واتجاه. يؤخذ اتجاه سقوط القذوف على النواة كمحور إسناد.
- بعد التفاعل تتطلع النواة المتكونة والجسيم الناتج كل منهما في اتجاه وتكون حركتها الى الأمام وصوا اتجاه سقوط القذوف. وحيث أنه لتلتيهما مختلفتين فإنه سرعتيهما ستكون مختلفة وسوف يصنعان زاويتين مختلفتين مع محور الإسناد كما يتضح من الرسم التالي:-



- أي تفاعل نووي لابد أنه يتطلع عليه شروط قانونه حفظ الطاقة وقانونه حفظ العزم (الزخم) بحيث أن الطاقة الكلية قبل التفاعل تساوي الطاقة الكلية بعد التفاعل. ويقصد بالطاقة الكلية مجموع طاقتي الحركة ومكافئ الطاقة لكتل الأجسام المتفاعلة طبقاً لقانونه $E=mc^2$.

① بتطبيق قانونه حفظ العزم

بفرض تحليل العزوم وحساباتها المركبات الأفقية وكذلك الرأسية قبل وبعد التفاعل نجد

$$m_a v_a = m_b v_b \cos\phi + M_Y V_Y \cos\theta$$

$$0 = m_b v_b \sin\phi + M_Y V_Y \sin\theta$$

بتربيع طرفي المعادلتين السابقتين نجد

$$(m_a v_a - m_b v_b \cos\phi)^2 = (M_Y V_Y \cos\theta)^2$$

$$(-m_b v_b \sin\phi)^2 = (M_Y V_Y \sin\theta)^2$$

$$\therefore m_a^2 v_a^2 - 2 m_a v_a m_b v_b \cos\phi + m_b^2 v_b^2 \cos^2\phi = M_Y^2 V_Y^2 \cos^2\theta$$

$$m_b^2 v_b^2 \sin^2\phi = M_Y^2 V_Y^2 \sin^2\theta$$

بإضافة المعادلتين (معادلتي مركبات العزوم بعد التربيع) نجد أنه

$$m_a^2 v_a^2 - 2 m_a v_a m_b v_b \cos\phi + m_b^2 v_b^2 = M_Y^2 V_Y^2 \longrightarrow (1)$$

(c) بتطبيق قانون حفظ الطاقة

$$\tfrac{1}{2} m_a v_a^2 + m_a c^2 + 0 + M_X c^2 = \tfrac{1}{2} m_b v_b^2 + m_b c^2 + \tfrac{1}{2} M_Y V_Y^2 + M_Y c^2$$

وتكتب لإعادة صياغة المعادلة بعد تجميع الحدود المتشابهة في الطرفين الفيزيائية كالآتي

$$(M_X + m_a - M_Y - m_b) c^2 = \tfrac{1}{2} M_Y V_Y^2 + \tfrac{1}{2} m_b v_b^2 - \tfrac{1}{2} m_a v_a^2 = Q$$

قيمة Q تعبر عن مقياس تحول الطاقة في التفاعلات النووية وتسمى (Q-value) للتفاعل النووي. فإذا كانت Q موجبة فإنه ذلك يدل على أن كتل الأجسام (الأنوية) المتفاعلة أكبر من كتل الأجسام الناتجة من التفاعل وهذا يعني تحول جزء من كتل الأجسام المتفاعلة إلى طاقة ومن ثم يصبح التفاعل النووي طارد للحرارة exothermal أو exoergic. أما إذا حدث العكس وكانت قيمة Q سالبة فإنه كتل النواتج تكون أكبر من كتل المتفاعلات ويعني هذا تحول جزء من طاقة الحركة إلى كتلة ومن ثم يصبح التفاعل النووي ماص للحرارة endothermal أو endoergic.

$$Q = (m_{initial} - m_{final}) c^2 = (M_X + m_a - M_Y - m_b) c^2 \longrightarrow (2a)$$

$$= (E_{final} - E_{initial}) = \tfrac{1}{2} M_Y V_Y^2 + \tfrac{1}{2} m_b v_b^2 - \tfrac{1}{2} m_a v_a^2 \longrightarrow (2b)$$

من المعادلة (1)

$$2 m_a E_a + 2 m_b E_b - 2 m_a v_a m_b v_b \cos\phi = 2 M_Y E_Y$$

من المعادلة (2b)

$$E_Y = Q - E_b + E_a \longrightarrow 2 M_Y E_Y = (Q - E_b + E_a) \cdot 2 M_Y$$

$$\therefore \frac{m_a}{M_Y} E_a + \frac{m_b}{M_Y} E_b - \frac{m_a v_a m_b v_b}{M_Y} \cos\phi + E_b - E_a = Q$$

$$\therefore Q = E_b \left(1 + \frac{m_b}{M_Y}\right) - E_a \left(1 - \frac{m_a}{M_Y}\right) - 2 \left(\frac{m_a}{M_Y} \frac{m_b}{M_Y} E_a E_b\right)^{\frac{1}{2}} \cos\phi \quad \#(3)$$

عندما تكون ϕ تساوي $90°$ نحصل على حالة خاصة من التفاعلات النووية.

سؤال: (س٢) قيمة Q للتفاعل النووي لا تعتمد على النواة الهدف M_X.

- بإيجاد العلاقة بين E_b والزاوية ϕ نجد بعد تعديل المعادلة ③ أنه

$$M_Y Q = E_b(M_Y+m_b) - E_a(M_Y-m_a) - 2(m_a m_b E_a E_b)^{\frac{1}{2}} \cos\phi$$

أو

$$E_b(M_Y+m_b) - 2(m_a m_b E_a)^{\frac{1}{2}} \cos\phi \; E_b^{\frac{1}{2}} - E_a(M_Y-m_a) - M_Y Q = 0$$

ولحل هذه المعادلة بالنسبة لـ E_b نفترض أن $X^2 = E_b$

$$X^2(M_Y+m_b) - 2(m_a m_b E_a)^{\frac{1}{2}} \cos\phi \; X - E_a(M_Y-m_a) - M_Y Q = 0$$

وهي في هذا الشكل تعتبر معادلة من الدرجة الثانية ويمكن إيجاد جذورها بسهولة من خلال القانون الشهير (قانون الخوارزمي)

$$X = \frac{-b \pm \sqrt{b^2-4ac}}{2a}$$

وبعد ذلك نقوم بالتعويض عن X بـ $E_b^{\frac{1}{2}}$ عندئذ

$$E_b^{\frac{1}{2}} = \frac{(m_a m_b E_a)^{\frac{1}{2}} \cos\phi \pm \left\{ m_a m_b E_a \cos^2\phi + (M_Y+m_b)[M_Y Q + (M_Y-m_a)E_a] \right\}^{\frac{1}{2}}}{(M_Y+m_b)} \quad \#$$

④

هذا التعبير الرياضي قد تم رسمه في الشكل (1,9) للتفاعل النووي $H^3(p,n)He^3$ وقيمة Q لهذا التفاعل سالبة ($Q = -763.75 KeV$).

- فيما عدا منطقة صغيرة جداً من الطاقة بين 1.019 و 1.147 MeV فإنه هناك لكل واحد لواحد لقيمة E_a المعطاة بين E_b والزاوية ϕ. وهذا يعني أنه: بحفظ قيمة الطاقة للقطة (E_a) ثابتة واختيار قيمة ϕ لحظة انطلاق الجسيمات النتائج تلقائياً وحدة تم تختار طاقتي.

- يمكن أيضاً تطبيق المعادلة ④ على تفاعلات أخرى من التفاعلات النووية مثل $C^{14}(p,n)N^{14}$ ويتضح ذلك من الشكل (1,b).

ملاحظات

1- يوجد حد أدنى لقيمة E_a (طاقة حركة الجسيم الساقط) بحيث أنه طاقة الجسيم الساقط إذا كانت أصغر من الحد الأدنى لن يحدث التفاعل. وهذا يحدث فقط عندما تكون $Q < 0$ ولذلك ليس هذا الحد من الطاقة بالطاقة الحرجة E_{Th} Threshold energy

$$E_{Th} = (-Q)\frac{M_Y + m_b}{M_Y + m_b - m_a}$$

⑤

٥

- الحالة الحرجة هذه تحدث دائماً عندما تكون $\phi = 0^\circ$ (ولذلك فإن $\theta = 0^\circ$ أيضاً) وهنا تتحرك كتل النواتج Y ، b في إتجاه مشترك (وكلاهما مازالا أنوية منفصلة). ولا يوجد فقد في الطاقة في إعطاء عزم خطي لهذا الإتجاه المشترك.

- إما إذا كانت $Q > 0$ فلا يوجد هناك حالة حرجة للتفاعل وسوف يتم حدوث التفاعل حتى للقيم الصغيرة جداً من الطاقة بالرغم من مواجهتنا لقوة التنافر بين الجسيمات المتفاعلة وهذا بالفعل سوف تؤدي إلى قذف الجسيم a بالنواة X خارج مجال القوة النووية لكل منهما.

٢- حالة القيمة المزدوجة من E_a تحدث مع الطاقات الساقطة بسببه E_{Th} والحد الأدنى

$$E_a' = (-Q)\frac{M_Y}{M_Y - m_a} \qquad (6)$$

وهذا يحدث فقط عندما تكون $Q < 0$

وهذا مهم فقط للتفاعلات التي تتضمن أنوية مغناطيسية في الكتل. باستخدام المعادلتين (5) ، (6) يمكننا تقريب هذا المدى مثل

$$E_a' - E_{Th} \equiv E_{Th}\frac{m_a m_b}{M_Y(M_Y - m_a)}\left(1 - \frac{m_b}{M_Y} + \cdots\right)$$

ويمكننا أيضاً ملاحظة أنه ، لو إمتلكت كل من a ، b أعداد كتلة A قليلة وكانت Y نواة ثقيلة أو متوسطة ، عندئذ فإن المدى $(E_a' - E_{Th})$ يصبح أكثر صغراً (أقل من) واحد بالمائة (1٪) من الطاقة الحرجة.

٣- يوجد أيضاً قيمة عظمى للزاوية ϕ_m والتي عندها يحدث سلوك القيم المزدوجة.

$$\cos^2\phi_m = \frac{(M_Y + m_b)\left[M_Y Q + (M_Y - m_a)E_a\right]}{m_a m_b E_a}$$

وعندما يتساوى كل من E_a و E_a' فإن سلوك القيم المزدوجة يحدث عند $\phi = 0^\circ$ و $\phi_m = 90^\circ$ وعندما تقترب E_a من E_{Th} أي ($E_a = E_{Th}$) فإن هذا يعني أن ϕ_m تقترب من الصفر أي ($\phi_m = 0^\circ$).

٤- التفاعلات النووية ذات قيمة $Q > 0$ ليس لها قيمة حرجة لطاقة الجسيم الساقط ولا يوجد بها سلوك القيم المزدوجة. وهذا يمكننا أن نراه عندما نتعلم التفاعلات

النووية في الشكل (١,٩) ، (١,٨)

$He^3(n,p)H^3$ and $N^{14}(n,p)C^{14}$

ولكل منها تكون قيمة Q إما سالبة $(-Q)$ أو قيمة موجبة $(+Q)$. وللتأكد من ذلك يتم مراجعة الشكل (٢) حيث رسمت E_b مع E_a للتفاعلين السابقين. التفاعلات تحدث عندما تقترب E_a من الصفر أيضاً، وهذا يعني أن هذه التفاعلات ليس لها طاقة حرجة علاوة على أن المتغيرات مزدوجة القيمة لكل من Φ و E_a.

مثال: احسب الطاقة الحرجة لكل من التفاعلات التالية.

$B^{11}(p,n)C^{11}$ $\quad O^{18}(p,n)F^{18}$ $\quad Na^{25}(p,n)Mg^{23}$

تمت الاستعانة بالمعلومات التالية: (وكتلة بدلالة وحدة الكتلة الذرية amu)

$B^{11} = 11.0009305$ $\quad C^{11} = 11.011433$ $\quad O^{18} = 17.999160$

$F^{18} = 18.000937$ $\quad Na^{23} = 22.989768$ $\quad Mg^{23} = 22.994124$

$n = 1.008665$ $\quad p = 1.007277647$

مثال من التفاعل النووي $B^{11}(d,\alpha)Be^9$، سقط ديوترون بطاقة حركية 1.51MeV بينما انطلقت جسيمات ألفا بطاقة حركية 6.37MeV وخرجت بزاوية مقدارها 90°.

احسب قيمة Q (Q value) للتفاعل السابق.

$B^{11} = 11.009305$ $\quad Be^9 = 9.012182$ $\quad d = 2.01355321$ $\quad \alpha = 4.00150618$

$$\because Q = E_b\left(1+\frac{m_b}{M_f}\right) - E_a\left(1-\frac{m_a}{M_f}\right) - 2\left(\frac{m_a}{M_f}\frac{m_b}{M_f}E_aE_b\right)^{\frac{1}{2}}\cos\Phi$$

$$\therefore Q = E_b\left(1+\frac{m_b}{M_f}\right) - E_a\left(1-\frac{m_a}{M_f}\right) \qquad ; \cos\Phi = \cos 90^\circ = 0$$

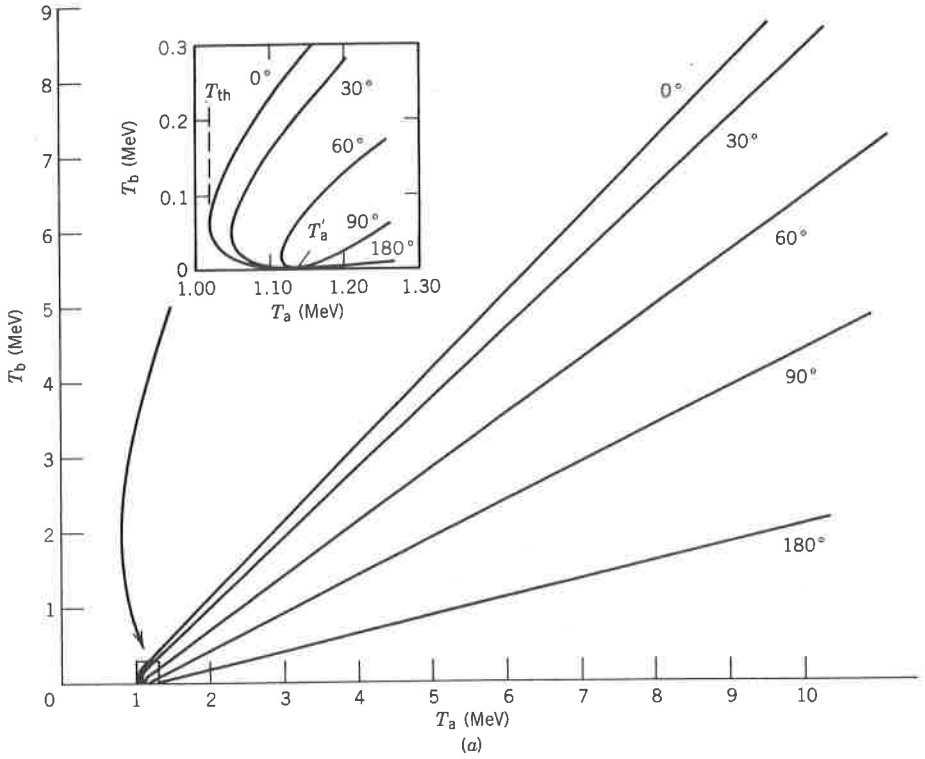
$$= 6.37\left(1+\frac{4.00150618}{9.012182}\right) - 1.51\left(1-\frac{2.01355321}{9.012182}\right)$$

$$= 9.19835 - 1.172627$$

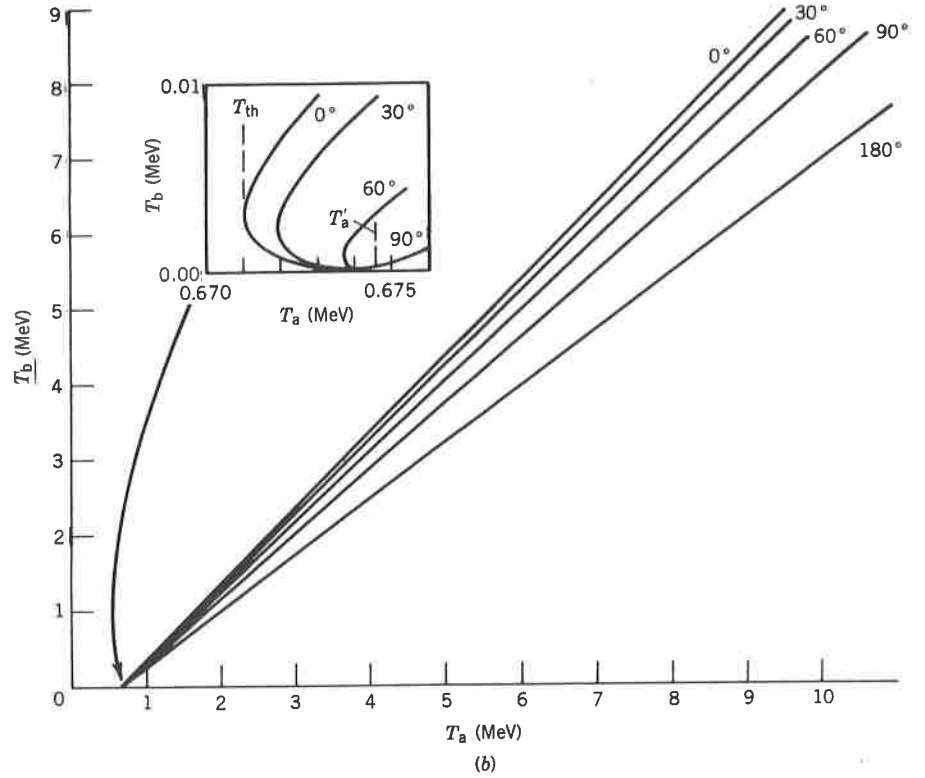
$$= 8.0257 \text{ MeV}$$

طالما أن قيمة Q موجبة فإن التفاعل يكون طارد للحرارة.

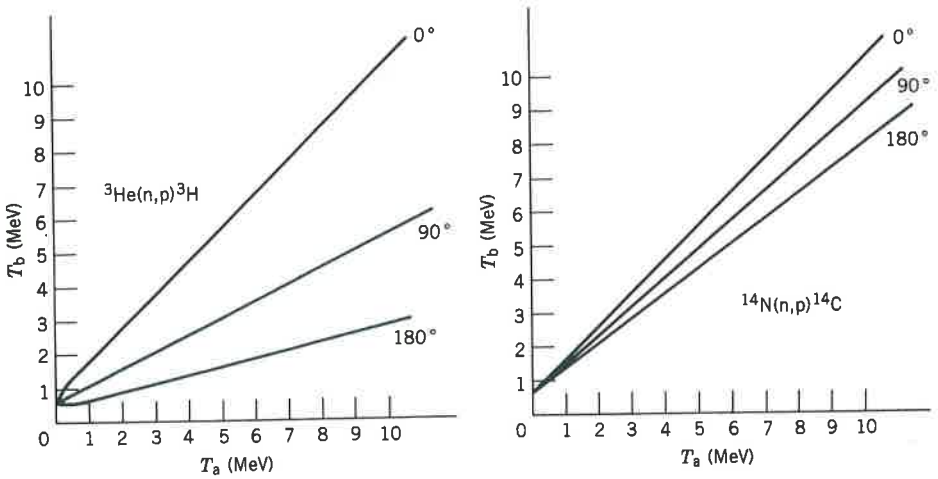
سؤال: احسب الطاقة الحرجة للتفاعل السابق.



* العلاقة بين طاقة حركة الجسيم ب قط والجسيم الناتج من التفاعل $H^3(P,n)He^3$ الشكل الداخلي يوضح أن منطقة القيم المزدوجة تقع بالقرب من 1MeV.



* العلاقة بين طاقة حركة الجسيم ب قط والجسيم الناتج من التفاعل $C^{14}(P,n)N^{14}$ الشكل الداخلي يوضح منطقة القيم المزدوجة.



* العلاقة بين E_a و E_b للتفاعلات النووية $He^3(n,P)H^3$ و $N^{14}(n,P)C^{14}$
نلاحظ أنه سلوك القيم المزدوجة عند موجود في التفاعلين.

سؤال: برهن على أن التفاعل $H^3(P,n)He^3$ ماص للحرارة endoergic بينما إذا عكس التفاعل ليصبح $He^3(n,P)H^3$ سيقول إن تفاعل طارد للحرارة exoergic.

- حيث أن البيانات المتوفرة في المسألة هي فقط كتل الأجسام الداخلة في التفاعل والخارجة منه دون الإشارة إلى طاقة الحركة لأي منهم، عندئذ لا نقصد استخدام علاقة Q المرتبطة بالكتل المتكافئة

$$Q = (M_x + m_a - M_y - m_b)c^2$$

$$= (3.016049 + 1.00727647 - 3.016029 - 1.00866501)c^2$$

$$= -1.36854 \times 10^{-3} \times 931.502 \text{ MeV}/c^2$$

$$= -1.2748 \text{ MeV}$$

وهذا يعني أن التفاعل لن يتم إلا إذا كان الجسيم الساقط عليه طاقة حركة تساوي على الأقل 1.2748 مليون إلكترون فولت.

- أما إذا إنعكس التفاعل سنجد أن قيمة Q ستصبح مساوية لـ 1.2748 MeV وهي هنا قيمة موجبة حيث تم عكس التفاعل عندئذ يصبح طارد للحرارة ويتم عندئذ أي مقدار من طاقة حركة الجسيم الساقط وهو البروتون.

Mechanisms of Nuclear Reactions — آليات التفاعلات النووية

- يمكن تقسيم التفاعلات النووية من حيث كيفية (آلية - ميكانيكية) حدوث الى قسمين رئيسيين
  ١- تفاعلات النواة المركبة.
  ٢- التفاعلات النووية المباشرة.

التفاعلات النووية ذات النواة المركبة.

- من خلال دراسة نواتج التفاعلات النووية المختلفة مع تغيير مدخلاتها من أنوية الهدف والجسيم الساقط وكذلك طاقة حركته وجد أنه هناك العديد من التفاعلات المشتركة من المدخلات وكذلك النواتج مختلفة، مما جعل نيلز بور يقترح في عام ١٩٣٦ نظرية النواة المركبة لتفسير كيفية حدوث التفاعل وتقديم تفسير للنواتج المتباينة للتفاعلات المشتركة في المدخلات.

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

X: نواة الهدف، a: المقذوف، Y: النواة الناتجة، b: الجسيم الناتج

وقد اعتمد نيلز بور على فرضيتين في نظريته لتفسير ما يحدث في التفاعل النووي هما

١- عندما يقترب المقذوف من نواة الهدف يندمج في مكوناتها لتكوين نواة مركبة غير مستقرة.
٢- تضمحل (تتحلل) النواة المركبة بعد فترة وجيزة من الزمن وذلك بإصدار جسيم أو جسيمات أو إشعاعات وتتحول من بذلك إلى النواة الناتجة من كيفية التفاعل.

سؤال: كم تبلغ الفترة الزمنية بين تكوين النواة المركبة ومحللة الإضمحلال؟

- متوسط الفترة الزمنية حوالي المتوسط (10^{-15} ثانية). هذه الفترة بعيدة جداً عن قدرة الإنسان على إلتقاطها علاوة على أنه معظم الأجهزة النووية قد لا تستطيع إلتقاطها.

متى تكونت النواة المركبة؟

- نفترض أن الجسيم الساقط نيوترون ذو طاقة 1 MeV وسقط على نواة كبيرة الحجم ذات نصف قطر تقريباً ١٠ فيرمي (10^{-14} متر). من خلال حساب الفترة الزمنية التي يستغرقها النيوترون من عبور النواة على مسار قطرها (عبور أبعد مسافة) نجد أن

قطر النواة $= 2 \times 10^{-14}$ m

$\because \frac{1}{2} m v_0^2 = 1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13}$ Joul

وحيث أن كتلة النيوترون تؤخذ عادة بالمقدار 1.67×10^{-27} كجم

$\therefore v_0 = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-13}}{1.67 \times 10^{-27}}} = 1.38 \times 10^{7}$ m/s

$\therefore t = \frac{\text{قطر النواة}}{\text{السرعة}} = \frac{2 \times 10^{-14}}{1.38 \times 10^{7}} = 1.449 \times 10^{-21}$ sec

(t: Natural Nuclear time — الزمن المستغرق لعبور النواة يسمى الزمن النووي الطبيعي)

* نلاحظ أنه زمن الإضمحلال بعد فترة صغيرة جداً بمقاييسنا ولكنه طويلة جداً إذا ما قورنت بزمن عبور الجسيم للنواة الهدف (الزمن النووي الطبيعي) وهكذا فإن النواة المتكونة بهذه الطريقة (النواة المركبة) وبعد هذه المدة الزمنية الطويلة جداً قد نسيت كيفية تكوينها وأصبحت ذات سمات أخرى طبقاً لظروف البيئة الفيزيائية المحيطة بها ومن ثم فإن النواتج المنبثقة عن هذه النواة ليست بالضرورة أن تكون واحدة من جميع المخارج أي بغض النظر عن الطريقة التي تكونت بها تلك النواة المركبة.

* إن الفكرة الأساسية في تلك النظرية عديدة وليست قاصرة على نوع معين من نواة الهدف أو الجسيمات الساقطة أو طاقتها. أي أنه ما يقال على النيوترون يمكن تطبيقه على البروتون أو أي جسيم.

مثال عند قذف نواة الألومنيوم $_{13}Al^{27}$ بالبروتونات المعجلة تتكون نواة مركبة (نواة السيليكون) التي تضمحل بعدة طرق كما هو موضح أدناه

$$_{13}Al^{27} + {}_{1}p^{1} \longrightarrow \square^{28} \quad \text{(14)}$$

احتمالات الإضمحلال

الرقم ١٤ للعدد الذري يدل على أن النواة المركبة هي نواة ذرة السيليكون

$$_{13}Al^{27} + {}_{1}p^{1} \longrightarrow \begin{cases} {}_{12}Mg^{24} + {}_{2}He^{4} \\ {}_{14}Si^{27} + {}_{0}n^{1} \\ {}_{11}Na^{24} + 3\,{}_{1}p^{1} + {}_{0}n^{1} \\ {}_{14}Si^{28} + \gamma \\ \vdots \end{cases}$$

سؤال: ما هو سبب إثارة نواة الهدف بعد دخول جسيم القذيفة فيها؟

- نفترض أن أنوية الهدف جميعها مستقرة قبل اصطدام القذيفة بها. الاستقرار يعني أن طاقة الترابط النووي كافية وتمنع تحلل النواة في المستقبل القريب أو البعيد (وهذا يعني أن λ تساوي صفر و $T_{\frac{1}{2}}$ فترة عمر النصف تبلغ مالا نهاية).

- عند دخول القذيفة للنواة، يتزايد مقدار الطاقة الداخلية للنواة المركبة الناتجة بمقدار يكون مساوياً

- طاقة حركة الجسيم الساقط

- طاقة ربط النواة للقذيفة (يبقى عند تناقص للقذيفة).

هذا المقدار من الزيادة في الطاقة الداخلية للنواة كافٍ في جميع الحالات لإثارة النواة الجديدة.

وإذا كان هذا حيث عند اندماج نيوترون مع نواة فإنه بالأحرى حيث عند دخول بروتون إليها.

فما هو السبب في ذلك؟

مثال احسب طاقة الإثارة من النواة الناتجة من تفاعل نيوترون ذو طاقة حركية 1 MeV مع نواة نظير الألومنيوم $_{13}Al^{27}$. وكيف يؤثر ذلك في طبيعة نواتج التفاعل؟

معادلة التفاعل

$$_0n^1 + {}_{13}Al^{27} \longrightarrow {}_{13}Al^{28*}$$

من جدول حساب الكتل بوحدة الكتل الذرية نجد أن

$$_{13}Al^{27} = 26.99008 \text{ amu}$$

$$_0n^1 = 1.00898 \text{ amu}$$

$$_{13}Al^{28} = 27.99077 \text{ amu}$$

بتطبيق قيم الكتل في معادلة التفاعل نجد أن النقص في الكتل يساوي

$$\Delta M = 27.99077 - 26.99008 - 1.00898$$

$$= -0.00829 \text{ amu}$$

أي أن مقدار الكتل الداخلة في التفاعل قد تناقص بعد تكوين النواة المركبة بالمقدار ΔM وعند حساب مكافئ الطاقة لهذا النقص من الكتل نضرب ΔM في 931 MeV

$$\Delta M \longrightarrow 7.71799 \simeq 7.72 \text{ MeV}$$

هذا المقدار من الطاقة يمثل مقدار طاقة الربط للنيوترون (النيوترون) في النواة الجديدة. وهو في نفس اللحظة يمثل الجزء الأول من طاقة الإثارة أما الجزء الثاني فهو مقدار طاقة الحركة للنيوترون قبل اصطدامه بالنواة الهدف ومن ثم فإن طاقة الإثارة الكلية هي

$$E_{ex} = 7.72 + 1 = 8.72 \text{ MeV}$$

- نلاحظ أن مصدر طاقة الإثارة هو النيوترون الذي اصطدم بالنواة الهدف. وحيث أن النيوترون متعادل الشحنة فإنه يصطدم بمكونات النواة (بروتونات ونيوترونات المتواجدة في مداره) بواسطة القوة النووية لأنه ليس له مجال كهربي ونظراً لتقارب الكتل المتصادمة يتم نقل أكبر مقدار من الطاقة أو كما سبق القول: يتم إعادة توزيع الطاقة الزائدة بصورة عشوائية (بمقادير غير متساوية) على مكونات النواة الهدف وهكذا نجد أن بعض النيوكلونات تكتسب مزيداً من الطاقة أكثر من غيرها فإذا وصل أو زاد مقدار الطاقة المكتسب عن قيمة حرجة تسمى طاقة الفصل separation energy فإن بقاء النيوكلون أو النيوكلونات المكتسب لهذه الطاقة من النواة سيعدم أي ينطلق بعيداً مغادراً النواة المركبة. هذه العملية تمثل تحلل (اضمحلال) النواة المركبة.

ملاحظة: متوسط طاقة الفصل للنيوكلون (بروتون - نيوترون) الواحد تساوي 8 مليون إلكترون فولت. أما إذا انطلق جسيم مركب مثل ألفا فإن له حسابات أخرى.

- زمن عبور (إختراق) النيوترون للنواة حوالي 10^{-21} ثانية وعمر إضمحلال النواة بعد 10^{-10} ثانية أي أنه الإضمحلال يحدث بعد فترة زمنية تكافئ مليون مرة زمن إختراق النيوترون للنواة $\left(\frac{10^{-10}}{10^{-21}}\right)$ فهذه الفترة الزمنية الصغيرة جداً بمقاييسنا والطويلة جداً بمقياس الزمن النووي الطبيعي تحدث أحداثاً جيماً داخل النواة كرد فعل لدخول الجسيم الجديد إليها. حيث أنه لا يصدر عن النواة أي إشارات لما يحدث من داخلها، حتى إنطلاق جسيمات أو أشعة جاما - فإننا نعتبر النواة خلال الفترة بين - عبور النيوترون وتحلل النواة المركبة، في حالة شبه إستقرار quasi stationary. وبعد هذه المدة تعلن النواة عن عدم إستقرارها إما بإصدار جسيمات أو أشعة جاما أو كليهما طبقاً لحالة الإثارة التي وصلت إليها.

- حالة شبه الإستقرار لا تعني أن النواة المركبة مستقرة وكل ما يحدث فيها تحولات داخلية من إعادة توزيع الطاقة الزائدة على مكوناتها وبالتالي فإن مكونات النواة المركبة لا تمتلك جميعها نفس مقدار الطاقة وذلك

١- تسمى مستويات الطاقة التي تؤدي إلى إصدار (إنبعاث) مكون أو أكثر من النواة المركبة، بمستويات الطاقة الإفتراضية virtual Energy Levels

٢- تسمى مستويات الطاقة التي تؤدي إلى إنبعاث أشعة جاما بالمستويات المرتبطة bound Energy levels.

أشعة جاما لا تنطلق إلا بعد إنبعاث الجسيمات أي أنها تكون المرحلة الأخيرة من عمر النواة المركبة. وهكذا نستنتج أن

- عدد المستويات الإفتراضية كبير جداً إذا ما قورن بعدد المستويات المرتبطة. والسبب في ذلك يرجع إلى أن تصادم النيوترون أو البروتون أو أي جسيم آخر مع النواة الهدف تحدث موجه وربما موجات من الإهتزاز لمكونات النواة وربما النواة ككل. هذه الموجه أو الموجات تكافئ إعادة توزيع الطاقة الزائدة على مكونات النواة المركبة.

- إحتمال حدوث تفاعل نووي بين الجسيم القذيفة والنواة الهدف يعتمد على مجموع طاقتي القذيفة والنواة علاوة على طبيعتهما الفيزيائية (خصائص كل منهما). وحيث أنه أي قيمة إحتمالية لها حد أدنى وحد أقصى، فإن أقصى إحتمال لحدوث للتفاعل النووي يكافئ حدوث رنين نووي Nuclear Resonance.

- إحتمال تكوين النواة المركبة يتزايد كلما إقترب مجموع طاقتي القذيفة والنواة الهدف من طاقة الإثارة لأحد المستويات الإفتراضية. فإذا تساوى مجموع الطاقة مع مقدار طاقة مستوى إفتراضي يحدث رنين نووي ويصل إحتمال تكوين النواة المركبة إلى ذروته أي أنه المقطع العرضي للتفاعل يكون أكبر ما يمكن.

وعلى النقيض من ذلك كلما إبتعد مجموع الطاقة عن طاقة أحد المستويات الإفتراضية - كلما إنخفض وتضاءل إحتمال حدوث التفاعل وتكوين النواة المركبة.

• سواء كانت النواة مثارة عند مستوى طاقة إثارة اضمحلال أو مرتبط فإنها سوف تضمحل بعد مدة زمنية (طالت أم قصرت). ومن ثم فإنه

- لكل مستوى إثارة فترة متوسط عمر. وهذا ناتج من إختلاف طاقة مستويات الإثارة. من المعروف أن متوسط العمر تكافئ مقلوب معامل الإضمحلال λ

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

حيث τ متوسط عمر أحد مستويات الإثارة سواء كانه إثارة إشعاعية أم مرتبطاً

من خلال مبدأ الشك (اللايقين)

$\hbar$ = ثابت بلانك

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

فإذا كانت Δt تساوي τ فإنه أقل مقدار من الطاقة ΔE يساوي إتساع مستوى الإثارة Level width (يرمز له بالرمز Γ "جاما") تكميم حسابي من العلاقة

$$\Gamma = \frac{\hbar}{2\pi\tau}$$

• عندما تكون النواة مثارة عند مستوى طاقة معين بحيث أن هذا المقدار من الطاقة يمثل من الإضمحلال بعدة طرق فإنه الإتساع لكل مستوى الطاقة هنا يساوي مجموع الإتساع الجزئي لكل إضمحلال.

مثال نفرض أن نواة عند مستوى إثارة ما بحيث يمكن أن تتحلل من خلال إصدار جسيمات ألفا أو إلكترونات أو إشعاعات أشعة جاما.

إذا إفترضنا أن Γ_α ، Γ_β ، Γ_γ تمثل إتساع المستويات الجزئية عند إضمحلال النواة من خلال ألفا أو إلكترون أو أشعة جاما على الترتيب، فإنه الإتساع الكلي لهذا المستوى يكافئ

$$\Gamma = \Gamma_\alpha + \Gamma_\beta + \Gamma_\gamma$$

سؤال: كيف تكميم الحصول على قيمة Γ ؟

من خلال الطاقة المصاحبة لكل احتمال من إحتمالات الإضمحلال للنواة المثارة

وبالتالي تكميم حساب فترة متوسط عمر المستوى τ (معرفة Γ تؤدي الى الكشف عنها).

ملاحظة: بالرغم من أن نظرية البنوية المركبة قدمت تفسيراً للخواص الذي إلتقط النتائج المتباينة للتفاعل النووي. إلا أنها لم تقدم تفسيراً لكل التفاعلات النووية وهكذا إتضح أن بعض التفاعلات النووية تتم بدون تكوين النواة المركبة ومن ثم فإنه بعض التفاعلات تتم تصورة مباشرة أي أن النتائج تعتمد على طريقة قذف نواة الهدف بالجسيم.

التفاعلات النووية المباشرة.

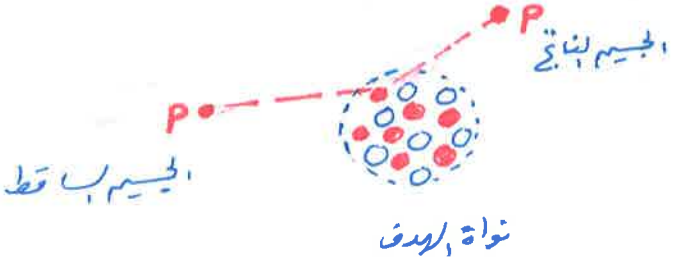
- الزمن النووي الطبيعي هو زمن عبور القذيفة لقطر نواة الهدف ولاحظنا أن عمر النواة المركبة أطول بكثير من الزمن النووي الطبيعي ولذلك تختلف نتائج التفاعل الواحد.
- إذا كانت طاقة القذيفة عالية جداً (٥٠ MeV تقريباً) فيقل زمن حدوث تفاعل مع نكلونات النواة يتضاءل وهذا يؤثر على طبيعة نتائج التفاعل. من ناحية أخرى إذا كانت القذيفة مكونة من عدة نيوكلونات (بروتونات ونيوترونات) وأن طاقة الترابط النووي لكل نيوكلون فإن إحتمال تفكك القذيفة نتيجة التفاعل تتزايد مما يؤثر أيضاً على نواتج التفاعل

• يقال أن التفاعل النووي مباشر إذا كان عمر النواة المركبة إذا تكونت يقدر أصغر من الزمن النووي الطبيعي. من أمثلة ذلك

- التشتت غير المرن. inelastic scattering
- تفاعلات تبادل الشحنات charge exchang reaction
- تفاعلات الإلتقاط pick up reactions
- تفاعلات التجريد stripping reactions.
- تفاعلات ينتج عنها دوران وتذبذب نواة الهدف. rotational and vibrational reactions

• تفاعلات التطاير (التشتت) غير المرن. (n,n) - (p,p)

- حيث هذا النوع إذا كانت القذيفة نيوكلون (بروتون - نيوترون) ذو طاقة عالية جداً وعند إصطدامه بأحد مكونات النواة، يفقد جزء من طاقته (يعتمد الجزء المفقود على عدة عوامل) ويتطلقه بالجزء المتبقي. إحتمال حدوث هذا النوع من التفاعلات النووية تتزايد كلما زادت طاقة القذيفة عن 50 MeV.
- من المتوقع أن يحدث هذا النوع من التفاعل على سطح النواة وليس في عمقها لأن الجسيم الساقط هو الذي يخرج ويكلف بطاقة أقل.



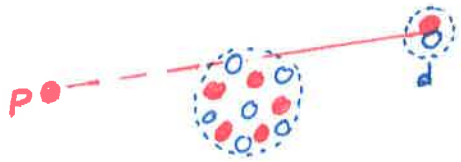
نواة الهدف

• تفاعلات تبادل الشحنات (n,p) - (p,n)

- في هذا النوع من التفاعلات لا يخرج الجسيم الساقط ولكنه بدلاً من ذلك يخرج جسيم آخر من النواة. فإذا سقط نيوترون خرج بروتون وإذا سقط بروتون نتج نيوترون وكأن النيوكلون الساقط قد تبادل أحد الميزونات مع النواة وخرج بخصائص جديدة.

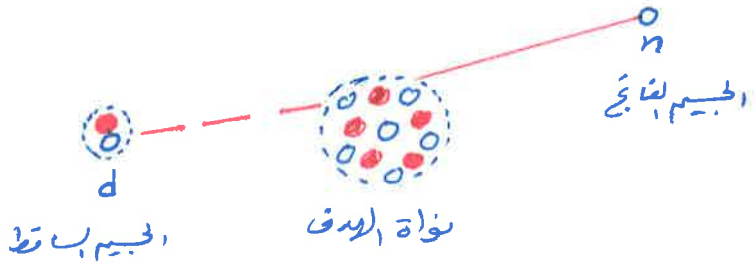
- **تفاعلات الإلتقاط :** (n,d) – (p,d)

- في هذا النوع من التفاعلات يلتقط النيوكلون الساقط على النواة نيوكلون مغاير له من سطح النواة ويخرجا معاً كنواة ديوتيرون . تمت عملية الإلتقاط غالباً على سطح النواة . طاقة ترابط النيوكلون الملتقط أقل من ٢٢٢٦,٠ م أف .



- **تفاعلات الإنخلاع** (d,n) – (d,p)

- على التخصيص من تفاعلات الإلتقاط فإن الجسيم الساقط يكون ديوتيرون (بروتون + نيوترون) وحيث أن طاقة الترابط النووي له ضعيفة فإن إصطدام الديوترون بنواة الهدف يجعله يفقد أحد مكوناته بينما يستمر النيوكلون الآخر من طريقه كناتج للتفاعل . وهذا يعني أن طاقة الترابط أحد نيوكلونات الديوترون مع نواة الهدف تكون أكبر من ٢٢٢٦,٠ م أف وهي طاقة ترابط نواة القذيفة



- **تفاعلات تذبذب ودوران النواة الهدف .**

- في هذا النوع من التفاعلات لا يخترق الجسيم الساقط النواة بل يقترب منها فقط ونتيجة لذلك يحدث رد فعل من نواة الهدف كأن تهتز دورانا أو تذبذبا .

فمثلاً عندما يقترب بروتون أو جسيم ألفا من النواة وكان معامل التصادم أكبر من نصف قطر نواة الهدف ، أو أن البروتون ذو طاقة قليلة ومعامل التصادم أقل من نصف قطر نواة الهدف . في هذه الحالات يتفاعل المجال الكهربي للجسيم الساقط (بروتون - ألفا) مع المجال الكهربي لنواة الهدف مما يدفعها بعيداً عن موضعها الأصلي ثم تعود إليه بعد إبتعاد القذيفة أو تهتز النواة الهدف ودورانها تحت تأثير عدم تجانس المجال الكهربي من المسافة الفاصلة بينها وبين القذيفة مع تغير الموضع المزاحن لعدم التجانس هذا مع تحرك القذيفة من طريقها مبتعدة عن نواة الهدف .

المقطع العرضي للتفاعلات النووية

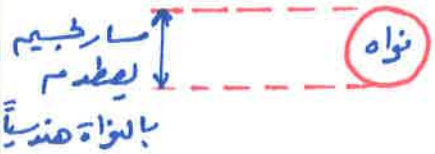
- التفاعل هو فعل ينتج عنه شيء ما، ولذلك فإن التفاعلات النووية هي الأفعال التي تحدث داخل نواة الذرة وينتج عنها تغيرات داخل النواة فإنها قد تكون من عدد كبير من البروتونات والنيوترونات نتيجة انبعاث بعض الجسيمات (بروتون - نيوترون - جسيم ألفا - جسيم بيتا) أو حتى انطلاق أشعة كهرومغناطيسية (أشعة جاما).

ويحدث التفاعل غالباً بين النواة وجسيم آخر منطلق نحوها أو نواة أخرى كما يحدث في عملية الإندماج النووي أو تشعيع جاما يتبعه تحلل (تحلل - ضوئي) للنواة وهو ما يسمى photodisintegration.

- التفاعلات النووية كظاهرة فيزيائية تعتمد على مجموعة من المتغيرات، تتطلب دراسات متعمقة للوقوف على هذه المتغيرات ومعرفة مدى الارتباط بينها وبالتالي يمكن توقع حدوث النتيجة بعد ضبط قيم المتغيرات للتفاعل المطلوب وهذا ما يحدث بالفعل في التفاعلات النووية المستخدمة في انتاج النظائر المشعة صناعياً.

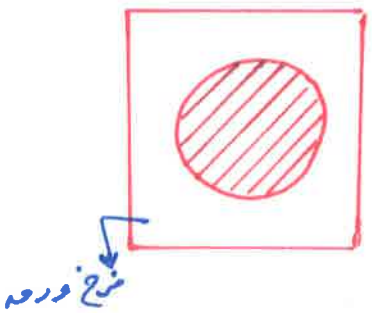
- التفاعل النووي يحدث في الفراغ الذي تشغله النواة ولذلك فإن

- التحليل الأولي للتفاعل النووي عند سقوط جسيم صوب النواة يؤدي إلى حدوث التفاعل النووي إذا كان مسار الجسيم ضمن المقطع العرضي للنواة (مسقط النواة كروية الشكل على اتجاه سقوط الجسيم).



هندسياً، إذا زاد معامل التصادم عن نصف نصف النواة لا يحدث تصادم معلن وخاصة إذا كان غير مشحون.

- نحن لا نرى الذرية وكذلك نطلق الجسيمات تجاهها وهذا يكون تصادم الجسيم الساقط مع النواة الهدف خاضعاً للاحتمال، كالمثال التالي



- إذا كان لدينا مرمى من ورقة مربع أو مستطيل ورسمنا بداخله دائرة كما في الشكل المجاور
- عند القائنا قطع معدنية من بعيد تجاه مرمى الورقة فإن احتمال أن تسقط كل قطعة في الدائرة يساوي

$$\frac{\text{مساحة الدائرة}}{\text{مساحة مرمى الورقة}}$$

وهو وقتنا التصويب سنظل هذه النسبة ثابتة في كل حالة.

وإذا قسمنا الدائرة الواحدة (كما هو بالرسم) إلى مجموعة من الدوائر الصغيرة

فإن: احتمال التصادم = مجموع مساحات الدوائر / المساحة الكلية للغرض المدور

- والآن تمثيل شريحة الهدف المغرض المدور. والأنوية المكونة له بمجموعة الدوائر المرسومة على غرض مدور كما يراها الجسيم بالنقط. وحيث أن ذرات العنصر الواحد متماثلة فإن أنوية النظير الواحد تكون أيضاً متماثلة في الحجم (عدد البروتونات والنيوترونات قليل متساوي)

وبافتراض أنه نصف قطر كل نواة يساوي R

فإن المستطيل المرئي للهدف تكون نواة من الهدف

$$\sigma = \pi R^2$$

فإذا كانت مساحة شريحة الهدف تساوي S وعدد الأنوية المكونة لأي من طبقة واحدة (شمل الشريحة ذرة واحدة) N_s فإن المساحة المشغولة بالأنوية تساوي $\frac{\sigma N_s}{S}$

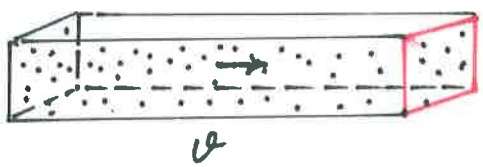
- نظراً لصغر حجم الأنوية من مقابل حجم الذرات فإن المسافة الفراغية بين أنوية الذرات المجاورة تكون كبيرة جداً وهذا يعني أن شريحة الهدف المكونة من عدة طبقات من الذرات (ذات سمك t) ينطبق عليها نفس المفهوم. فإذا كانت N تساوي عدد الأنوية في السنتيمتر المكعب وسمك الشريحة t سم.

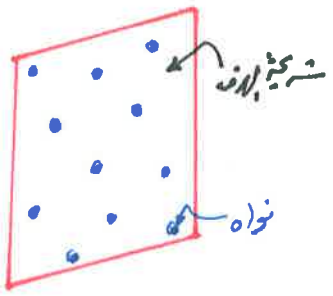
$$\therefore \frac{N_s}{S} = \frac{Nt}{S} \quad \rightarrow \quad \frac{\sigma N_s}{S} = \frac{\sigma Nt}{S}$$

- تنطلق الجسيمات المساقطة عمودياً على شريحة الهدف في شكل سيل (منبعث) ذو سرعة خطية v. فإذا كانت كثافة الجسيمات في وحدة الحجوم من هذا السيل تساوي n فإن

«عدد الجسيمات التي تسقط على سم² واحد من الهدف في الثانية الواحدة» =

«عدد الجسيمات التي تحتويها متوازي مستطيلات مساحة قاعدته 1 سم وطوله يساوي v»





$$n\,(\text{particle}/\text{cm}^3) \times v\,(\text{cm}/\text{sec})$$

$$= nv\left(\frac{\text{particle}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}}\right)$$

- عدد التصادمات المحتمل N_c من $x=0$ إلى $x=x$ في الثانية مع سرعة الهدف

= عدد الجسيمات الساقطة على المساحة المربعة كل ثانية × احتمال اصطدام الجسيم مع نواة الهدف

$\therefore N_c = n_t \sigma N_t$; N_c = number of collisions

$\therefore$ المقطع العرضي للتصادم

$$\sigma = \frac{N_c}{n_t N_t}$$

- في التفاعلات النووية يوجد نوعين من التصادم
  - تصادم مرن
  - تصادم غير مرن

تصادم مرن ← Elastic Collision ← يحتفظ كل من الجسيم الساقط ونواة الهدف بحالته.

تصادم غير مرن ← inelastic Collision ← يؤدي إلى تحولات داخل نواة الهدف.

تعتمد مساحة مقطع التفاعل وتعتمد على نوع الجسيم وطاقته ونوع نواة الهدف

مثال ترمز للمقطع العرضي للتفاعل المتضمن جسيم ألفا كقذيفة ينتج عنه بروتون بالرمز $\sigma(\alpha,p)$ بينما $\sigma(p,\alpha)$ تمثل رمز المقطع العرضي لتفاعل يكون البروتون هو الجسيم الساقط وجسيم ألفا هو الناتج.

ملاحظة في حالة عدوث أكثر من نوع من التفاعل بين جسيمات النيوترون الساقط ونواة شريحة الهدف فإن كل تفاعل يوصف بمقطع عرضي ويكون المقطع العرضي الكلي مساوياً لمجموع المقاطع العرضية الجزيئية.

- إذا التزمنا بالمفهوم الهندسي للمقطع العرضي للتفاعلات النووية فإن

$$\sigma = \pi R^2 = 3.14 \times \left[1.25 \times 10^{-13} A^{\frac{1}{3}}\right]^2$$

$$= 1.0575 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 \quad \leftarrow A = 100$$

$$\approx 1 \text{ barn}$$

بمعنى ذلك أن مساحة مقطع التفاعل لنواة متوسطة ($A=100$) لا تزيد عن بارن واحد يعرف التفاعل من نوع وعدد الجسيمات الساقطة من وحدة الحجوم n وسرعتها على وكثافة الذرات في الشريحة علاوة على سمك الشريحة للهدف.

وتثبت النتائج العملية أن الالتزام بهذا المفهوم يؤدي الى توقعات بعيدة تماماً عن الحقيقة حيث أن المقطع العرضي لبعض التفاعلات النووية تكون جزء من الألف من البارن بينما لبعض التفاعلات أخرى ذات مقطع عرضي يزيد عن عدة آلاف من البارن.

ما هي الأسباب التي تؤدي إلى هذا التناقض الشديد؟

- من ناحية أخرى فإن النواة الواحدة تحتاج أن تشترك في عدد كبير من التفاعلات النووية وتكون إستجابتها من كل منهم مستقلة أي أن لكل تفاعل مقطع عرضي محدد يختلف في معظم الأحيان عن المقاطع العرضية للتفاعلات الأخرى التي تشارك فيها نفس النواة وهذا يقتضي أن المقطع العرضي يمثل الإحتمال النسبي لحدوث تفاعل ما بين نواة ما وجسيم أو نواة أخرى.

سؤال: إذا كان المقطع العرضي يمثل إحتمال حدوث تفاعل نووي فكيف يكون له وحدة وهي البارن؟

- يعتمد الإنسان في فهمه للظواهر الفيزيائية على بناء نماذج تصويرية يتخيل من خلالها حدوث الظاهرة وبالتالي تمكنه تلك النماذج من الإقتراب أكثر في فهم الإطار العام للظاهرة ومحاولة تفسير كيفية الحدوث وحصر المتغيرات المؤثرة فيها والعلاقة أو المعادلات التي تربط تلك المتغيرات معاً.

- إن فكرة المقطع العرضي هي تصور أولي لما قد يحدث بين النواة والجسيم الساقط وبالرغم من التناقض الشديد بين المتوقع والموجود في قيمة المقطع العرضي فإنه وللآن لا يزال الفكرة من أساسها وكذلك تعديل بديل:-

- أن المقطع العرضي لا يعتمد على فيض الجسيمات الساقطة (nv)
- أن المقطع العرضي لا يعتمد على كثافة مادة الهدف (عدد أنوية الهدف في وحدة الحجوم)

وذلك لأن المقطع العرضي خاص بنواة محددة مع جسيم محدد بطاقة محددة وعليه فإذا تطابقت تلك الشروط حصلنا على نفس المقطع العرضي بدون تأثير من عدد الجسيمات الساقطة أو كثافة أنوية شريحة الهدف.

سؤال: ما هي أهمية تغير الفيض في التفاعل النووي؟

- بالرغم أن قيمة الفيض لا تؤثر على إحتمال حدوث التفاعل على مستوى النواة الواحدة مع جسيم ساقط عليها بطاقة محددة إلا أن الفيض يمثل مضاعفات لقيمة إحتمال حدوث نفس التفاعل مع النواة (أو الأنوية المماثلة الموجودة) في شريحة الهدف وبالتالي يمكن حساب عدد الذرات التي ستحول نتيجة حدوث هذا التفاعل في الكاينة الواحدة.

∴ nv = عدد الجسيمات الساقطة عمودياً في وحدة المساحات كل ثانية

∴ إحتمال حدوث تفاعل معين مع أي نواة من أنوية الهدف لجسيم واحد وهي تمثل المقطع العرضي للتفاعل.

∴ قيمة الفيض تسبب تضاعف قيمة إحتمال حدوث تفاعل محدد مع أنوية شريحة الهدف. ما هو تأثير زيادة سقوط الفيض على شريحة الهدف؟

كيف يمكننا تقدير فترة التقطع بعرض ؟

- إتضح أنه نادرا التقطع بعرض الهندسي لا تكفي وحدها نظراً لأنه بعض التفاعلات النووية تكون مقطع العرض كبير جداً مقارنة بالقيمة الهندسية المتوقعة πR^2 . ومصدر التقدير يتبع من كون النواة ليست مجرد كتلة مشحونة بشحنة موجبة فقط وكلها مكونات من البروتونات والنيوترونات تمتلك طاقة . طاقة الوضع (طاقة الترابط النووي) تتسبب في تماسك مكونات النواة لتبقى هكذا دون أن تضمحل أطول فترة ممكنة من الزمن .

* أي مقدار إضافي من الطاقة يرتقي بالنواة إلى مستوى إثارة جديد وكل مستوى إثارة فترة متوسط عمر τ (تختلف قيمة τ من مستوى إثارة لآخر) وبالتالي فإنه معدل (معامل) الإضمحلال للنواة الواحدة λ تختلف من مستوى إثارة لآخر حيث أنه $\tau = \frac{1}{\lambda}$

* من البديهي أنه كلما كانت طاقة الإثارة كبيرة (مقدار الطاقة الزائد عن طاقة الترابط النووي) كلما زاد إحتمال إضمحلال النواة λ وبالتالي تتناقص فترة عمر النصف لها . ويمكن تفسير ذلك بإستخدام مبدأ الشك

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

* إذا كان مقدار الطاقة المكتسب صغير ويقترب من الصفر ، زادت فرصة بقاء النواة دون إضمحلال . أما إذا كان مقدار الطاقة المكتسب كبير ، زادت فرصة النواة في الإضمحلال . علاوة على ذلك فإن التحولات التي تحدث في النواة قد تأخذ أشكالاً متعددة مثل

- إنطلاق جسيمات من النواة أو إنطارها ← تحولات عنيفة
- إنطلاق أشعة جاما ← تحولات خفيفة .

كل تحول يستهلك جزء من طاقة الإثارة ويرمز له بالرمز Γ_i ويمثل مقياس إتساع مستوى الإثارة ، الرمز i يشير إلى نوع الإضمحلال الذي قد يكون $\alpha, \beta, \gamma \dots$

$$\Gamma_i = \frac{\hbar}{2\pi \tau_i} = \frac{\hbar}{2\pi} \lambda_i$$

الإتساع الكلي لمستوى الإثارة

$$\Gamma = \sum_{i=1}^{n} \Gamma_i$$

وحيث أن الاتساع الجزئي لمستوى الطاقة ليس بالضرورة أن يكون متساوي

$$\Gamma_1 \neq \Gamma_2 \quad \text{or} \quad \Gamma_\gamma \neq \Gamma_\beta \neq \Gamma_\alpha \cdots$$

$$\therefore \tau_\gamma \neq \tau_\beta \neq \tau_\alpha \cdots$$

وهكذا تختلف فترة اضمحلال النواة طبقاً لنوع الأشعة الصادرة منها - أي سلوك النواة للتخلص من الطاقة الزائدة حتى تصل إلى مرحلة الاستقرار - وهذا يدرس كحالة خاصة لكل نواة مركبة نتجت من تفاعل نووي

* مما سبق يتضح أن التعديل المقترح لمفهوم المقطع العرضي سوف يشمل فكرة اتساع مستوى طاقة الإثارة

- لابد أن يصطدم الجسيم الساقط بالنواة لتكوين نواة مركبة وهذا الاحتمال يعتمد على نوع الجسيم الساقط وطاقته وخصائص نواة الهدف.
- ما هو مقدار الطاقة المكتسبة وسلوك النواة بعد ذلك (اتساع مستوى طاقة الإثارة الكلي والمستويات الفرعية)

مثال التفاعل النووي $X(a,b)Y$ ∝ احتمال حدوث يمكن التعبير عنه من خلال المقطع العرضي للتفاعل $\sigma(a,b)$ حيث

$$\sigma(a,b) = \sigma_c(a)\,\frac{\Gamma_b}{\Gamma}$$

حيث $\sigma_c(a)$ المقطع العرضي لتكوين النواة المركبة عند قذف نواة الهدف بالجسيم a.

Γ_b اتساع المستوى الجزئي للإثارة وينطلق من خلاله جسيم b عند التحلل.

Γ اتساع مستوى الإثارة الكلي (يشمل كل التحولات الممكنة للنواة المركبة).

Γ/Γ_b نسبة اتساع المستوى الجزئي إلى اتساع المستوى الكلي وهي تحدد "الاحتمال النسبي لانبعاث الجسيم b عند اضمحلال النواة المركبة"

سؤال: كيف يمكن حساب قيمة كل من Γ ، Γ_b ، $\sigma_c(a)$ نظرياً؟

- التفاعلات النووية تحدث بين جسيمات دون ذرية. يقطع الجسيم (القذيفة) تجاه الهدف بقدر من الطاقة (صغيراً أو كبيراً) ونظراً للحيز المتناهي للمقدار الكتلي (كتلة النواة أو الجسيم الساقط) مقارنة بالأجسام المادية من حولنا، يجعل التحديد الكامل لموضع الجسيم المتحرك من الفراغ تجاه النواة يشوبه شيء من القصور ويجعل الظاهرة قابلة لتطبيق مبدأ الشك (اللايقين)

$$\Delta P = \Delta(mv) \quad , \quad \Delta P \cdot \Delta x \geq h$$

وهذا يعني أن احتمال التوزيع (الانتشار) الفراغي للجسيم الساقط صيغة شرعية بمعنى أنه

- إذا زاد احتمال تواجد الجسيم من حيز فراغي أكبر مما تشغله كتلة الجسيم كلاسيكياً يصبح مفهوم الموجة المصاحبة لحركة الجسيم واقعي فيزيائي ويتم التعبير عن حركة الجسيم المتحرك بدلالة الطول الموجي λ (طول موجة دي برولي)

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

(m كتلة الجسيم، v سرعته الخطية، E طاقة الحركة)

في حالة السرعات المنخفضة لا يؤخذ تأثير السرعة على تغير مقدار الكتلة أما إذا كانت طاقة حركة الجسيم كبيرة جداً وتقترب سرعته من سرعة الضوء لابد أنه تحسب قيمة الكتلة بدلالة كتلة السكون

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

وفي جميع الحالات (سرعة الجسيمات دون الذرية كبيرة أم صغيرة) كيف تطبيق مبادئ ميكانيكا الكم وصولاً لما تم استخدامه بواسطة برايت وفيجنر من أجل حساب المقطع العرضي للتفاعلات النووية وتم التوصل إلى الصيغة التالية.

$$\sigma(a,b) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E_0 - E)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}$$

$\sigma(a,b)$ المقطع العرضي للتفاعل النووي المتضمن a (الجسيم الساقط) و b الجسيم الناتج من التفاعل

λ طول الموجة المصاحبة لحركة الجسيم الساقط a.

E_0 الطاقة الممكنة لحدوث أكبر احتمال للتفاعل النووي - طاقة الذروة peak energy (طاقة الرنين النووي) بينما E هي طاقة حركة الجسيم الساقط.

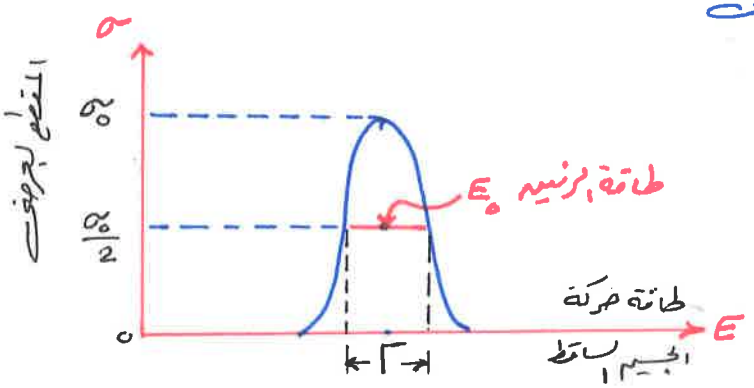
$\frac{\lambda^2}{4\pi}$ إحتمال تكوين النواة المركبة (نلاحظ أنه لا يعتمد على خصائص نواة الهدف من حيث الأبعاد الهندسية أو غيرذلك و إنما يعتمد فقط على كتلة الجسيم الساقط وسرعته).

$\frac{1}{(E_0-E)^2+(\Gamma/2)^2}$ إحتمال حدوث الرنين النووي (مقياس للتجانس بين طاقة الجسيم الساقط والطاقة المكافئة لأكبر قدر للمقطع المرضي - يبلغ المقطع المرضي قيمته العظمى) نلاحظ كلما اقتربت E من E_0 زادت قيمة الإحتمال فإذا كانتا متساويتين يبلغ الإحتمال أقصى قيمة له

Γ_a Γ_b إحتمال حدوث إضمحلال للنواة ينتج من فعله الجسيم b.

سؤال كيف يمكن إختبار معادلة برايت وفيجنر ؟

كل المعادلات الموضوعة كقوانين يمكن إختبار صحتها من خلال التطبيق العملي ومطابقة النتائج بما هو متوقع. ما يمكن قياسه عملياً هو طاقة حركة الجسيم الساقط وبالتالي يمكن حساب π من خلال مراقبة تأثير طاقة حركة الجسيم الساقط على إحتمال حدوث التفاعل نحصل على منحنى كالآتي



- يتغير مقدار المقطع المرضي مع زيادة مقدار طاقة حركة الجسيم الساقط من مدى محدد حول E_0
- عند بعض الطاقات لا يوجد إحتمال للتفاعل ($\sigma=0$).
- يصل التفاعل (المقطع المرضي) إلى قيمته (قيمة عظمى) عند طاقة واحدة محددة تسمى طاقة الرنين E_0 يتناقص حولها إحتمال حدوث التفاعل حتى يصل إلى الصفر على الجانبين
- يؤخذ عرض مستوى الإثارة الكلي Γ كمقدار من الطاقة من مدى محدد حول E_0 بشرط أن يكون المقطع المرضي مساوياً أو أكبر من ($\geq$) نصف القيمة العظمى له عند E_0.

Γ له حد أدنى وحد أعلى.

- سنحاول مراقبة إحتمال حدوث التفاعل (σ) مع تغير طاقة حركة الجسيم الساقط تمكننا الحصول على قيم المتغيرات التالية.

- القيمة العظمى للمقطع العرضي σ_0
- طاقة الرنين النووي E_0
- عرض مستوى الإثارة المعني Γ
- حساب الطول الموجي للجسيم الساقط λ

- سنحاول مراقبة نواتج التفاعل النووي الذي يحدث حول E_0 تمكننا الحصول على
- عرض المستويات الجزئية وهي تمثل إحتمال إنطلاق الجسيمات مثل b عند تحلل النواة المركبة (Γ_b).

* بعد معرفة قيم كل هذه المتغيرات، تمكننا توقع إحتمال حدوث تفاعل ما $\sigma(a,b)$ عند سقوط الجسيم a بطاقة حركة مقدارها E ومن ثم تمكننا إجراء التفاعل النووي تحت شروط محددة للحصول على النواتج المطلوبة.

Classifications of nuclear reactions — تصنيف التفاعلات النووية

- أكثر أنواع التفاعلات النووية حدوثاً هو توجيه قذيفة (جسيم أو فوتون) ناحية نواة الهدف ولذلك يمكن تقسيم التفاعلات على أساس ما تحدث متغيرات

- نوع القذيفة تجاه النواة
- طاقة القذيفة
- العدد الذري A لنواة الهدف .

- تصنيف التفاعلات النووية على أساس نوع القذيفة

نوع المقذوف

- photons فوتونات: تفاعلات نووية مستحثة بالفوتونات
- particles جسيمات: protons بروتونات — neutrons نيوترونات — deutrons ديوترونات

- تصنيف التفاعلات النووية على أساس طاقة القذيفة

- تفاعلات منخفضة الطاقة: $1000 > E > 0$ الكترون فولت
- " " متوسطة الطاقة: $500\,keV > E > 1\,keV$
- " " الطاقة العالية: $10\,MeV > E > \frac{1}{2}\,MeV$
- " " العالية جداً: $50\,MeV > E > 10\,MeV$
- " " فوق العالية: $50\,MeV < E$

- تصنيف التفاعلات النووية على أساس العدد الذري A لنواة الهدف

- تفاعلات النوية الخفيفة: $25 > A > 1$
- " " المتوسطة: $80 > A > 25$
- " " الثقيلة: $250 > A > 80$

تفاعلات نووية مستحثة بواسطة أشعة جاما

$${}_8O^{16} + \gamma \longrightarrow {}_8O^{15} + n \qquad {}_8O^{16}(\gamma, n)\,{}_8O^{15}$$

$${}_{13}Al^{27} + \gamma \longrightarrow {}_{11}Na^{25} + {}_1p^1 + {}_1p^1 \qquad {}_{13}Al^{27}(\gamma, 2{}_1p^1)\,{}_{11}Na^{25}$$

كيف يستطيع نيوترون (عديم الشحنة) إخراج بروتون أو أكثر من النواة ؟

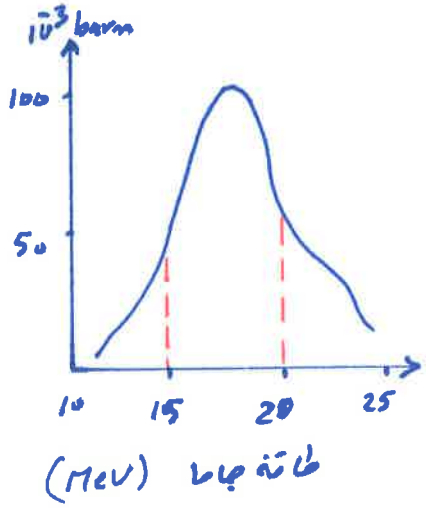
بقاء النيوكلونات (البروتونات والنيوترونات) مرهون بطاقة الترابط النووي وحيث أنه متوسط طاقة الترابط النووي للنيوكلون الواحد داخل النواة حوالي 8MeV فيما عدا ${}_1H^2$ و ${}_4Be^9$

B.E. for ${}_1H^2 = 2.226$ MeV

B.E for ${}_4Be^9 = 1.666$ MeV

فإذا زادت الطاقة المصاحبة للنيوكلون عن متوسط طاقة الترابط فإنه بذلك يستطيع الإنطلاق خارج النواة وتسمى تلك الطاقة بالطاقة الحرجية المستحثة عن النيوترونات

- كلما زادت طاقة الفوتون إزداد تردده ونقص الطول الموجي له وبالتالي يتناقص الحجم الفراغي الذي تشغله دالة الإحتمال للفوتون wavepacket وصدر تم عند طاقة محددة فإن المدى من 15 الى 20 مليون الكترون فولت يصل المقطع العرضي للنيوترونات إلى أقصى قيمة له (حوالي 100 m barn ≈ 0.1 barn) ويتناقص المقطع العرضي مع الطاقات خارج نطاق هذا المدى .



تفاعلات مستحثة بالنيوترونات ($_0n^1$)

$$_{13}Al^{27} + {}_0n^1 \longrightarrow {}_{13}Al^{28} + \gamma$$

* تقل التفاعلات على طاقة النيوترون والنوية بدرجة لنواة الهدف
- المقطع العرضي = $\sim 10^{-24}$ بارن
- بزيادة الطاقة يتحول التفاعل الى السوي (غير المرن).
- $E_n > 10MeV$ ← التفاعل فيتي بالحبيبات المتعددة مثل
... $(n,3n)$ (n,np) $(n,2n)$

تفاعلات مستحثة بالبروتونات ($_1H^1$)

$$_4Be^9 + {}_1H^1 \longrightarrow {}_3Li^9 + {}_2He^4 + \gamma$$
$$_{13}Al^{27} + {}_1H^1 \longrightarrow {}_{14}Si^{28} + \gamma$$

} تفاعل البروتون مع النوية الخفيفة يصدر أشعة جاما

$$_{13}Al^{27} + {}_1H^1 \rightarrow {}_{12}Mg^{24} + {}_2He^4$$

التفاعل (p,α) تكون النواة الناتجة ← مستقرة
مستقر ↑

$$_{13}Al^{27} + {}_1H^1 \rightarrow {}_{11}Na^{24} + 3({}_1H^1) + {}_0n^1$$

عدد الحبيبات الناتج يعتمد على طاقة البروتون الساقط.

* التفاعل التالي

يحدث التفاعل بين البروتون ونواة الليثيوم بأقل احتمال ممكن (أقل مقطع عرضي للتفاعل)
عند طاقة حركة للبروتون تساوي 0.77 MeV
↓
رنين نووي

$$_3Li^7 + {}_1p^1 \longrightarrow {}_4Be^8 + \gamma$$

$Q = 17.2\ MeV$

- أعلى طاقة ممكن الحصول عليها بواسطة أشعة جاما المستحثة بالتفاعلات النووية
- كل أشعة جاما الصادرة ذات طاقة واحدة.

تفاعلات مستحثة بالديوترونات $({}_1H^2)$

- كل تفاعلاتك من النوع المباشر ولا ينتمي إلى تفاعلات النواة المركبة.

$$ {}_1H^2 + {}_1H^3 \longrightarrow {}_2He^4 + {}_0n^1 + Q $$

$$ \downarrow \qquad \downarrow $$

$$ 14MeV \qquad 17.6\ MeV $$

لكلور $\quad {}_{17}Cl^{37} + {}_1H^2 \longrightarrow {}_{16}S^{35} + {}_2He^4 + Q$

سؤال: أي من التفاعلين (d,n)، (d,p) ذو مقطع عرضي أكبر؟ ولماذا

* مساعدة: التفاعل (d,α) ذو مقطع عرضي صغير بالنسبة للتفاعل (d,p).

تفاعلات مستحثة بجسيمات ألفا $({}_2He^4)$

* هي أقدم التفاعلات النووية المعروفة وذلك لتوفر مصدرها الطبيعي وهي باعثات ألفا من المواد المشعة الطبيعية.

* قدمت أشهر تفاعل نووي، كان سبباً في تغيير نظرية تركيب نواة الذرة وهو

$$ {}_4Be^9 + {}_2He^4 \longrightarrow {}_6C^{12} + {}_0n^1 $$

هذا التفاعل كان سبباً في اكتشاف النيوترون نظراً للاختلاف الواضح بين الفرضية والنتائج، فقد كان مفترضاً خروج نواة ${}_6C^{13}$ + شعاع جاما وتلك بجانب طاقة التفاعل وجد أن كل الاحتمالات مرفوضة ماعدا أنه ينتج جسيم ذو كتلة تساوي تقريباً كتلة البروتون ولكنه متعادل الشحنة «إنه النيوترون».

سؤال: هل يمكن أن تتم تفاعلات جسيمات ألفا مع الأنوية المتوسطة والثقيلة عند أي طاقة؟ لماذا؟

* يعتبر التفاعل السابق مصدراً جيداً للنيوترونات وخاصة أنه لا يتطلب تجهيزات معقدة. يمكن الحصول على مزيد من النيوترونات عند تفاعل جسيمات ألفا المعجلة مع بعض الأنوية مثل

$In^{115}(\alpha, n)\ Sb^{118}$

$In^{115}(\alpha, 2n)\ Sb^{117}$

$In^{115}(\alpha, 3n)\ Sb^{116}$

↓ باتجاه زيادة طاقة جسيم α

التفاعلات المتحكمة بواسطة الجسيمات الثقيلة والأنوية

- هذا النوع من التفاعلات لم يكن ليحدث بدون التطور الهائل في المعجلات النووية وبالتالي فإن الأنوية المرصودة (الحالة تكتسب مقدار كبير من الطاقة يتغلب على قوة الطرد (التنافر) الشديدة بين البروتونات (الهدف والقذيفة) عند اقترابها. كل الأنوية الخفيفة وبعض الأنوية المتوسطة (قيمة A) تدخل في هذا السياق تكون قذائف معجلة بينما أنوية الهدف غالباً تكون إما متوسطة أو أنوية ثقيلة.

مثال

$$_{12}Mg^{26} + {}_{7}N^{14} \longrightarrow {}_{12}Mg^{27} + {}_{7}N^{13}$$

سؤال: أي من الأنوية يكون القذيفة وأيها يكون الهدف؟

يبين من نتيجة التفاعل أنه من النوع (n,n) حيث تم اقتناص نيوترون من ذرة النيتروجين ومن ثم لم يحدث تحول كبير بين النواتج والمتفاعلات إلا تكوين نظير جديد.

$$_{13}Al^{27} + {}_{7}N^{14} \longrightarrow {}_{12}Mg^{27} + {}_{8}O^{14}$$

هذا التفاعل حدث فيه تحول كبير باختفاء أنوية القذيفة والهدف وظهور نواتين جديدتين. من قراءة الوزن الذري لها وحساب نسبة النيوترونات إلى البروتونات نعلم أنها غير مستقرتين (مشعتين). ما هو نوع الإشعاع المتوقع من كل منها؟

- بالرغم من ذلك فإن هناك تفاعلات تتسم بالتعقيد وفيها يتم تبادل عدد أكبر من النيوكلونات في التفاعل الواحد مثل (2p و 3n) لدرجة ذلك إلا إذا كانت نواة الهدف كبيرة ومن ثم فإن النواة المركبة الناتجة من التفاعل تكون مثارة (محتوية على قدر كبير من طاقة الإثارة) ومن ثم يحدث تحلل (اضمحلال لها) في زمن قصير جداً.

- أحياناً يحدث اندماج بين نواة الهدف والقذيفة. فإذا كانت نواة الهدف مثل اليورانيوم حصلنا على نواة ثقيلة جداً قد تعيش فترة وجيزة من الزمن وكلما تسعى لمتابعة دراسة بعض خصائصها وتسمى أنوية خائقة الشكل ($A > 250$) وتقع مجموعة الصناعية ما بعد اليورانيوم.

مسائل حول التفاعلات النووية

① العزم الذي لجسيم ألفا هو $\sqrt{2mE_\alpha}$ ، حيث m تمثل كتلة الوحدة في اتجاه سقوط جسيم ألفا على نواة الليثيوم Li^6. نفرض أن العزم للجسيم ألفا هو $\vec{P}_\alpha$ وعزم نواة الليثيوم $\vec{P}_{Li}$. باستخدام قانون حفظ العزم

$$\therefore \vec{P}_\alpha + \vec{P}_{Li} = \sqrt{2mE_\alpha} \quad i$$

بتربيع الطرفين

$$P_\alpha^2 + P_{Li}^2 + 2P_\alpha P_{Li} \cos\theta = 2mE_\alpha \rightarrow ①$$

θ هي الزاوية بين $\vec{P}_{Li}$ و $\vec{P}_\alpha$

وباستخدام قانون حفظ الطاقة

$$\frac{1}{2}m v_\alpha^2 + \frac{1}{2}M v_{Li}^2 = E_\alpha$$

$$\therefore \frac{P_\alpha^2}{2m} + \frac{P_{Li}^2}{2M} = E_\alpha$$

$m \equiv$ كتلة جسيم ألفا

$M \equiv$ كتلة نواة الليثيوم Li^6.

ونعيد بإعادة كتابة المعادلة الأخيرة مرة أخرى

$$P_\alpha^2 + \frac{m}{M}P_{Li}^2 = 2mE_\alpha \rightarrow ②$$

بمساواة المعادلتين ① ، ② نجد أن

$$P_\alpha^2 + P_{Li}^2 + 2P_\alpha P_{Li}\cos\theta = P_\alpha^2 + \frac{m}{M}P_{Li}^2$$

$$\therefore P_{Li}\left[\left(1-\frac{m}{M}\right)P_{Li} + 2P_\alpha \cos\theta\right] = 0$$

وحيث أن نواة الليثيوم كانت ثابتة أو مرتدة للخلف، لذا فإنه لدينا إحتمالين:

$$P_{Li} = 0 \quad \text{or} \quad P_{Li}\left(1-\frac{m}{M}\right) = -2P_\alpha \cos\theta$$

$$\therefore P_\alpha = -\frac{1}{2}\left(1-\frac{m}{M}\right)P_{Li}\sec\theta$$

وحيث أنه عادة P_α ، P_{Li} قيم موجبة (أرقام موجبة) لأنها قيم متحركة ، لذا لابد:

$$-1 \leq \cos\theta \leq 0 \qquad \text{if } m < M$$

$$P_{Li}\left(1-\frac{m}{M}\right) > 0 \Rightarrow -2P_\alpha \underbrace{\cos\theta}_{\downarrow} > 0$$

$$-1 \leq \cos < 0$$

بالتعويض عن P_α في المعادلة ② ، نجد أنه

$$\frac{1}{4}\left(1-\frac{m}{M}\right)^2 P_{Li}^2 \sec^2\theta + \frac{m}{M} P_{Li}^2 = 2m E_\alpha$$

بالقسمة على $2m$

$$\therefore \quad P_{Li}^2 \frac{m}{2mM} + \frac{1}{4}\left(\frac{M-m}{2mM}\right)^2 \cdot 2m\, P_{Li}^2 \sec^2\theta = E_\alpha$$

$$\frac{P_{Li}^2}{2M}\left[1 + \frac{M}{4m}\left(1-\frac{m}{M}\right)^2 \sec^2\theta\right] = E_\alpha$$

$\frac{P_{Li}^2}{2M}$ = طاقة الارتداد لنواة البيريليوم

$$\frac{P_{Li}^2}{2M} = \frac{E_\alpha}{1+\frac{M}{4m}\left(1-\frac{m}{M}\right)^2 \sec^2\theta} = \frac{E_\alpha}{1+\frac{(M-m)^2}{4mM}\sec^2\theta}$$

⑤ النيوترون ذو طاقة حركة E_n يصطدم بديوتيرون ساكن

(P) في حالة التصادم رأسي يبين النيوترون المتحرك والديوتيرون الساكن

• من قانون حفظ العزم ← العزم قبل التفاعل (التصادم) = العزم بعد التصادم

$$\sqrt{2mE_n} = P_d + P_n \quad \rightarrow ①$$

$\sqrt{2mE_n}$ ← طاقة حركة النيوترون

P_d ← عزم الديوتيرون

P_n ← عزم النيوترون

• من قانون حفظ الطاقة

طاقة الحركة قبل التصادم $(E_n + 0)$

= " " بعد التصادم

$$\therefore E_n = \frac{P_d^2}{2M} + \frac{P_n^2}{2m} \quad \rightarrow ②$$

E_n ← طاقة حركة النيوترون

$\frac{P_d^2}{2M}$ ← طاقة حركة الديوتيرون

$\frac{P_n^2}{2m}$ ← طاقة حركة النيوترون

* تربيع المعادلة ① نجد

$$2mE_n = P_d^2 + P_n^2 + 2P_dP_n \quad \rightarrow ③$$

② × المعادلة $2mE_n = \frac{m}{M}P_d^2 + P_n^2 \quad \rightarrow ④$

بمساواة المعادلتين ③ ، ④

$$P_d^2 + P_n^2 + 2P_dP_n = \frac{m}{M}P_d^2 + P_n^2$$

$$\therefore P_d^2\left(1 - \frac{m}{M}\right) = -2P_dP_n \Rightarrow P_n = -\frac{1}{2}\left(1 - \frac{m}{M}\right)P_d \quad \rightarrow ⑤$$

بالتعويض في المعادلة ② باستخدام المعادلة ⑤ ← بالتعويض عن P_n

$$E_n = \frac{P_d^2}{2M} + \frac{1}{2m}\cdot\frac{1}{4}\left(1 - \frac{m}{M}\right)^2 P_d^2$$

$$= \frac{P_d^2}{2M}\left[1 + \frac{M}{4m}\left(1 - \frac{m}{M}\right)^2\right] \Rightarrow \frac{P_d^2}{2M}\left[1 + \frac{M}{4mM^2}(M-m)^2\right]$$

$$\frac{P_d^2}{2M}\left(\frac{4mM + M^2 + m^2 - 2Mm}{4mM}\right)$$

$$\frac{P_d^2}{2M}\left(\frac{(M+m)^2}{4mM}\right)$$

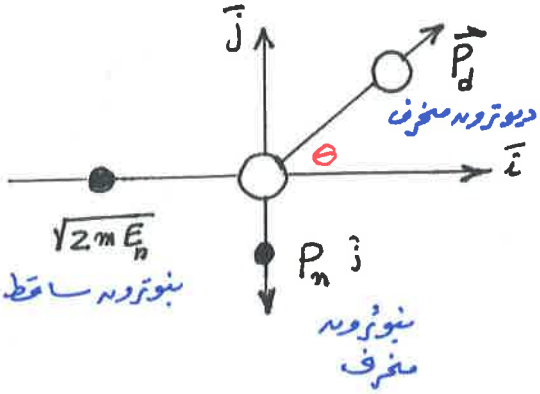
$$\therefore \frac{P_d^2}{2M} = \frac{4mM}{(M+m)^2}E_n =$$

مقدار الطاقة المفقود بواسطة النيوترون وهو نفس المقدار المكتسب بواسطة الديوتيرون

∴ نسبة الطاقة المفقودة ←

$$\eta = \frac{4mM}{(M+m)^2}\cdot\frac{E_n}{E_n} = \frac{4mM}{(M+m)^2} = \frac{4\times1\times2}{(2+1)^2} = \frac{8}{9}$$

(ب) في حالة إنحراف النيوترون بزاوية $90°$. فيمكنه تحليل هذه العملية من خلال الرسم التوضيحي



$$\sqrt{2mE_n}\ \bar{i} = \vec{P}_d \cos\theta\ \bar{i}$$

$$-P_n\ \bar{j} = \vec{P}_d \sin\theta\ \bar{j}$$

بالتربيع والجمع للمعادلتين

$$P_d^2 = 2mE_n + P_n^2 \longrightarrow (1)$$

من قانون حفظ الطاقة :

الطاقة قبل التصادم = الطاقة بعد التصادم

$$E_n = \frac{P_n^2}{2m} + \frac{P_d^2}{2M}$$

$$= \frac{P_n^2}{2m} + \frac{2mE_n + P_n^2}{2M}$$

$$\therefore E_n - \frac{2mE_n}{2M} = \frac{P_n^2}{2m}\left(1+\frac{m}{M}\right)$$

$$E_n\left(1-\frac{m}{M}\right) = \frac{P_n^2}{2m}\left(1+\frac{m}{M}\right) \Longrightarrow \underbrace{\frac{P_n^2}{2m}}_{\text{طاقة النيوترون بعد التصادم}} = \frac{M-m}{M+m}\underbrace{E_n}_{\text{طاقة النيوترون قبل التصادم}}$$

تكملة لإيجاد حساب مقدار الطاقة الذي فقده النيوترون على إثر التصادم بالديوترون

$$E_n - \frac{P_n^2}{2m} = E_n\left(1-\frac{-m+M}{M+m}\right) = \frac{M+m+m-M}{M+m}E_n = \frac{2m}{M+m}E_n$$

وهكذا نجد أن نسبة الطاقة المفقودة η

$$\eta = \frac{2m}{M+m}\frac{E_n}{E_n} = \frac{2m}{M+m} = \frac{(2\times1)m}{(2+1)m} = \frac{2}{3}$$

③ العلاقة بين نصف قطر النواة R وعدد الكتلة A هي

$R = 1.3\ A^{1/3}$ fm • fm = فيرمي $= 10^{-15}$ m

وهنا نجد أنه حجم النواة (بفرضه أنها كروية الشكل)

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3$$
$$= \frac{4}{3}\pi\ (1.3)^3\ A\ \times(10^{-15})^3$$

وبالتالي فإن عدد النيوكليونات في وحدة الحجم

$$\frac{A}{\frac{4}{3}\pi\ (1.3)^3\ A\ \times(10^{-15})^3} = \frac{A}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$
$$= \frac{3}{4\pi}\ (1.3)^{-3} \times 10^{45}\ m^{-3}$$
$$= 1.09 \times 10^{44}\ m^{-3}$$
$$= 1.09 \times 10^{38}\ cm^{-3}$$

ولإيجاد كثافة كتلة داخل النواة الذرية ρ

• m تمثل كتلة النيوكليون

$$\rho = 1.09 \times 10^{38} \times m\ \ cm^{-3}$$
$$= 1.09 \times 10^{38} \times 1.667 \times 10^{-27}$$
$$= 1.817 \times 10^{11}\ \ kg/cm^3$$

---

④

- $^{10}B(x,\alpha)\ ^{8}Be \longrightarrow x \equiv d \longrightarrow\ ^{10}B(d,\alpha)\ ^{8}Be$
- $^{17}O(d,n)\ x \longrightarrow x \equiv\ ^{18}F \longrightarrow\ ^{17}O(d,n)\ ^{18}F$
- $^{23}Na(P,x)^{20}Ne \longrightarrow x \equiv \alpha \longrightarrow\ ^{23}Na(P,\alpha)\ ^{20}Ne$
- $x(P,n)\ ^{37}Ar \longrightarrow x \equiv\ ^{37}Cl \longrightarrow\ ^{37}Cl(P,n)\ ^{37}Ar$

⑤ بفرض أن Δ_H ، Δ_n ، Δ تمثل كتلة ذرة الهيدروجين وكتلة النيوترون وكتلة الذرة التي تنتمي إليها النواة

طاقة الترابط يساوي الفرق بين الكتل بوحدة amu (وحدة الكتل الذرية)

Δ_H تعادل كتلة ذرة الهيدروجين وإلكترون.

E_b ≡ طاقة الترابط النووي

$$E_b = Z m_H + (A-Z) m_n - M$$

$$\Delta_H = m_H - 1 \text{ amu}$$

$$\Delta_n = m_n - 1 \text{ amu}$$

$$\Delta = M - A \text{ amu}$$

$$\therefore E_b = Z \Delta_H + (A-Z) \Delta_n - \Delta$$

---

⑦ نصف قطر نواة الألمنيوم ^{27}Al

نصف قطر نواة العنصر المطلوب

وحيث أن R_1 أكبر ١,٥ مرة من R_2

$$R_1 = r_0 (27)^{\frac{1}{3}}$$

$$R_2 = r_0 A^{\frac{1}{3}}$$

$$R_1 = \frac{3}{2} R_2$$

$$r_0 (27)^{\frac{1}{3}} = r_0 A^{\frac{1}{3}} \times \frac{3}{2}$$

$$\therefore 27 = \left(\frac{3}{2}\right)^3 A \implies A = \frac{27}{(3/2)^3} = \frac{8 \times 27}{9 \times 3} = 8$$

وهكذا نجد أن عدد كتلة النواة المطلوبة يساوي 8

هذا العدد من البيوكليونات يعني أن عدد البروتونات يساوي عدد النيوترونات

$$\therefore Z = 4 \quad , \quad N = 4$$

∴ العنصر المطلوب هو $^{8}_{4}Be$ (نظير البريليوم)

$$\therefore E_b = 4 \times 0.00867 + 4 \times 0.00783 - 0.00531$$

$$= 0.06069 \text{ amu} \quad ; \ 1 \text{ amu} = 931 \text{ MeV}$$

$$= 56.5 \text{ MeV}$$

⑦ ٩- حساب متوسط طاقة الترابط لكل نيوكليون من نواة الأكسجين ^{16}O

$$E_b = 8 \times 0.00867 + 8 \times 0.00783 + 0.00509 \ amu$$

$$= 0.13709 \ amu$$

$$= 127.6 \ MeV.$$

$$E_b \text{ لكل نيوكليون } = E_b/16 = \frac{127.6}{16} = 7.975 \ MeV$$

ب- طاقة ترابط نيوترون وحيد ألفا من نواة البورون ^{11}B.

طاقة ترابط نيوترون من نواة ^{11}B = طاقة الترابط لـ ^{11}B − طاقة الترابط لـ ^{10}B

وذلك لأنه عند إزالة نيوترون من ^{11}B فإننا نحصل على ^{10}B

$$E_b|_n = \Delta_n - \Delta_{B_{11}} + \Delta_{B_{10}}$$

$$= 0.00867 - 0.00930 + 0.01294$$

$$= 0.01231 \ amu$$

$$= 11.46 \ MeV$$

وحساب طاقة ترابط جسيم ألفا من نواة البورون ^{11}B. نتخيل إنفصال جسيم ألفا من نواة ^{11}B، فإننا نحصل على نواة الليثيوم ^{7}Li.

طاقة ترابط جسيم α = طاقة ترابط ^{11}B − طاقة ترابط ^{7}Li − طاقة ترابط جسيم α من ^{11}B ∴

$$= -\Delta_{B_{11}} + \Delta_{Li_7} + \Delta_\alpha$$

$$= -0.00930 + 0.01601 + 0.00260$$

$$= 0.00931 \ amu$$

$$= 8.66761 \ MeV.$$

(ج) الطاقة اللازمة لفصل نواة ^{16}O إلى أربعة جسيمات متماثلة.

* بما أن العدد الذري للأكسجين يساوي 8 ولذلك يمثل فصل النظير $^{16}_{8}O$ إلى أربعة جسيمات ألفا $^{16}_{8}O = 4 * {}^{4}_{2}He$

$$E_b\left({}^{16}_{8}O\right) + 4\,E_b\left({}^{4}_{2}He\right)$$

$$= 4\,\Delta_\alpha - \Delta_{^{16}O}$$

$$= 4 * 0.00260 - 0.00509$$

$$= 0.01549 \quad amu$$

$$= 14.42\ MeV$$

---

(٨) لإيجاد طاقة ترابط نيوترون في ^{11}B، لابد من إيجاد المقدار الذي يمثل الطاقة اللازمة لتفكك النظير ^{10}B + نيوترون ونظير البورون ^{11}B.

$$E_p|_n = \Delta_n + \Delta_{^{10}B} - \Delta_{^{11}B} \quad \longrightarrow ①$$

ولإيجاد طاقة ترابط البروتون في ^{11}B، نوجد المقدار الذي يمثل الطاقة اللازمة لتفكك النظير البريليوم ^{10}Be + بروتون ونظير البورون ^{11}B.

$$E_p|_p = \Delta_p + \Delta_{^{10}Be} - \Delta_{^{11}B} \quad \longrightarrow ②$$

بطرح المعادلة ② من ① نحصل على المقدار الذي يمثل طاقة ترابط النيوترون والبروتون

$$E_p|_n - E_p|_p = (\Delta_n + \Delta_{^{10}B} - \Delta_{^{11}B}) - (\Delta_p + \Delta_{^{10}Be} - \Delta_{^{11}B})$$

$$= \Delta_n - \Delta_p + \Delta_{^{10}B} - \Delta_{^{10}Be}$$

$$= 0.00867 - 0.00783 + 0.01294 - 0.01354$$

$$= 0.00024\ amu$$

$$= 0.223\ MeV$$

نلاحظ أن طاقة ترابط النيوترون أكبر من طاقة ترابط البروتون وذلك بسبب قوة التنافر بين البروتون والباقي مكونات نظير البريليوم ^{10}Be.

⑨ طاقة التفاعل

تحليل حسبكي باستخدام $^{7}_{3}Li + P \rightarrow 2\ ^{4}_{2}He$

- طاقة الترابط لكل نيوكليون في ^{7}Li تساوي 5.6 MeV
- " " " " ^{4}He " 7.06 MeV

$E_b|_{^7Li} + P \rightarrow 2 * E_b|_{^4He}$

$E_b|_{^7Li}$: طاقة الترابط لليثيوم

P: بالتأكيد تفاعل بروتون مع الليثيوم وهو يمتلك طاقة حركة للتغلب على التنافر مع نواة الليثيوم

$2 * E_b|_{^4He}$: طاقة تجاذب الهيليوم

$\therefore$ طاقة التفاعل $= 2 * E_b|_{^4He} - E_b|_{^7Li}$

$= 2 * 4 * 7.06 - 7 * 5.60$

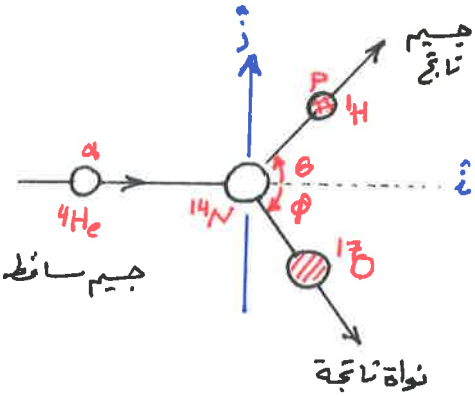
$= 17.28$ MeV.

---

⑩ طاقة التفاعل

$^{14}N\ (^{4}He, P)\ ^{17}O$ ← طاقة ارتداد تحليل تجاهلي

- نواة الهدف كانت ثابتة
- طاقة الحركة ← $E_\alpha = 4$ MeV
- $E_p = 2.09$ MeV
- $\theta = 60^\circ$



من خلال قانون حفظ الزخم، تحليل على محورين متعامدين

هما محور سقوط جسيم ألفا (محور x) والمحور العمودي (y)

$$\sqrt{2m_\alpha E_\alpha}\,\hat{i} = \sqrt{2m_p E_p}\cos\theta\,\hat{i} + \sqrt{2m_o E_o}\cos\phi\,\hat{i} \quad (1)$$

$$0 = \sqrt{2m_p E_p}\sin\theta\,\hat{j} - \sqrt{2m_o E_o}\sin\phi\,\hat{j} \quad (2)$$

(1) بتربيع $\rightarrow$ $2m_\alpha E_\alpha + 2m_p E_p \cos^2\theta = 2m_o E_o \cos^2\phi$ (3) $+2\sqrt{2m_\alpha E_\alpha \cdot 2m_p E_p}\cos\theta$

(2) بتربيع $\rightarrow$ $2m_p E_p \sin^2\theta = 2m_o E_o \sin^2\phi$ (4)

$$\therefore 2m_o E_o (\cos^2\phi + \sin^2\phi) = 2m_p E_p (\cos^2\theta + \sin^2\theta) + 2m_\alpha E_\alpha - 2\sqrt{2m_\alpha E_\alpha \cdot 2m_p E_p}\cos\theta$$

($\cos^2\phi + \sin^2\phi = 1$, $\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1$)

بتبسيط المعادلة السابقة

$$2m_0E_0 = 2m_pE_p + 2m_\alpha E_\alpha - 4\sqrt{m_\alpha m_p E_\alpha E_p}\cos\theta$$

$$\therefore E_0 = \frac{m_p}{m_0}E_p + \frac{m_\alpha}{m_0}E_\alpha - 2\sqrt{\frac{m_\alpha}{m_0}\cdot\frac{m_p}{m_0}E_\alpha E_p}\cos\theta$$

ولحساب طاقة التفاعل (قيمة Q، Q-value) باستخدام مزدوج الكتلة أو مزدوج طاقات الحركة

$$Q = M_{^{14}N}c^2 + m_{^4He}c^2 - m_{^1H}c^2 - M_{^{17}O}c^2 = E_p + E_0 - E_\alpha - 0$$

طاقة حركة نواة الهدف (نواة النيتروجين)

$$\therefore Q = E_p - E_\alpha + E_0$$

أكسجين ألفا بروتون

$$= E_p - E_\alpha + \frac{m_p}{m_0}E_p + \frac{m_\alpha}{m_0}E_\alpha - \frac{2}{m_0}\sqrt{m_\alpha m_p E_\alpha E_p}\cos\theta$$

$$= E_p\left(1+\frac{m_p}{m_0}\right) - E_\alpha\left(1-\frac{m_\alpha}{m_0}\right) - \frac{2}{m_0}\sqrt{m_\alpha m_p E_\alpha E_p}\cos\theta$$

بالتعويض عن المتغيرات في المعادلة السابقة

$E_p = 2.09$ MeV , $m_p = 1.007825$ amu

$E_\alpha = 4.0$ MeV , $m_\alpha = 4.002603$ amu

$m_0 = 15.999914$ amu.

$$\therefore Q = 2.09\,(1+0.062989) - 4.0(1-0.250164) - 0.362952$$

$$= -1.14 \text{ MeV}.$$

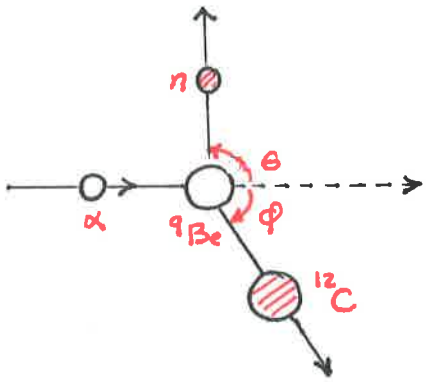
وهذا يعني أنه التفاعل ماص للحرارة.

$$^{9}Be\ (\alpha, n)\ ^{12}C$$

$E_{^9Be} = 0$

$E_\alpha = 5.3\ MeV$. $Q = +5.7\ MeV$

$E_n = ??$ $\theta = 90^\circ$



سم لمفترض أن نواة البريليوم ^9Be والتي تمثل الهدف كانت غير متحركة قبل بدء التفاعل ولذا فإن عزمها الكلي يساوي صفر.

سم نحلل اتجاه العزم قبل وبعد التفاعل على محور x ومحور y

$$\sqrt{2m_n E_n}\ \hat{j} - \sqrt{2m_c E_c}\ \sin\phi\ \hat{j} \quad \rightarrow ①$$

$$\sqrt{2m_\alpha E_\alpha}\ \hat{i} = \sqrt{2m_c E_c}\ \cos\phi\ \hat{i} \quad \rightarrow ②$$

بتربيع المعادلتين ① ، ② والإضافة

$$2m_c E_c (\sin^2\phi + \cos^2\phi) = 2m_n E_n + 2m_\alpha E_\alpha \quad \Rightarrow E_c = \frac{m_n}{m_c} E_n + \frac{m_\alpha}{m_c} E_\alpha$$

سم قانون حفظ الطاقة وحساب الفرق بين طاقات الحركة، عندئذ

$$Q = E_c + E_n - E_\alpha$$

$$= \frac{m_n}{m_c} E_n + E_n + \frac{m_\alpha}{m_c} E_\alpha - E_\alpha$$

$$= E_n \left(1 + \frac{m_n}{m_c}\right) - E_\alpha \left(1 - \frac{m_\alpha}{m_c}\right)$$

$m_n = 1.008665\ amu$

$m_\alpha = 4.002603\ amu$

$m_c = 12.000000\ amu$

$$\therefore E_n = \frac{Q + E_\alpha \left(1 - \frac{m_\alpha}{m_c}\right)}{\left(1 + \frac{m_n}{m_c}\right)} = \frac{5.7 + 5.3\ (1 - 0.33355)}{(1 + 0.084055)}$$

$$= 8.516\ MeV$$

(١٢) الطاقة الحرجة للنيوترونات لبدء التفاعل

$^{11}B(n,\alpha)\ ?$

$E = 0$ ← ^{11}B ، $E_n = 4\,MeV$ ← n ، $\alpha \rightarrow {}^{8}_{3}Li$

- m_n كتلة النيوترون
- m_B كتلة البورون ^{11}B
- E_{th} الطاقة الحرجة للتفاعل

$$\because\ E_{th} = -Q\left(1 + \frac{m_n}{m_B}\right)$$

$$4 = -Q\left(1 + \frac{1.008665}{11.009305}\right)$$

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

---

(١٣) أقل طاقة حركية لبدء التفاعل تعني الطاقة الحرجة للتفاعل

$$^{7}Li(\alpha, n)\,^{10}B$$

لحساب الطاقة الحرجة للتفاعل، لابد من حساب Q أولاً

Q تحسب بكتل بوحدة كتل ذرية ←

$$Q = (M_{Li} + m_\alpha - m_n - M_B) \times 931$$

$$= (7.016004 + 4.002603 - 1.008665 - 10.012937) \times 931\ MeV$$

$$= -2.995 \times 10^{-3}\ amu$$

$$= -2.788\ MeV$$

$$E_{Th} = -Q\left(1 + \frac{m_\alpha}{M_{Li}}\right)$$

$$= +2.788 * \left(1 + \frac{4.002603}{7.016004}\right)$$

$$= 4.378\ MeV$$

لتكملة حساب سرعة نواة ^{10}B الناتجة

$$v_{^{10}B} = \frac{\sqrt{2\, m_\alpha\, E_{Th}}}{m_\alpha + M_{^7Li}} = \frac{\sqrt{2 * 4.002603 * 4.378 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{6}} \times \sqrt{1.66053892 \times 10^{-27}}}{(4.002603 + 7.016004) * 1.66053892 \times 10^{-27}}$$

($1.66053892 \times 10^{-27} \equiv$ amu)

$$= 5.27 \times 10^{6}\ m/s$$

ملاحظة: تم استخدام معادلة السرعة النسبية على اعتبار أن n، ^{10}B ثابتين ($v_n = 0$) في إطار الإسناد CM للتبسيط فقط.

مسائل حول التفاعلات النووية

(١) جسيم ألفا يتحرك بطاقة E_α=7.0 MeV تم استطارته بواسطة نواة نظير الليثيوم ^6Li عندما كانت ثابتة (طاقة حركتها تساوى صفر). احسب طاقة الحركة للنواة المرتدة للخلف إذا كانت زاوية الاستطارة بين الجسيمين تساوى 60^o.

(٢) اصطدم نيوترون تصادمًا مرنًا مع ديوترون غير متحرك. أوجد جزء طاقة الحركة الذى فقده النيوترون

١. فى حالة التصادم رأس برأس Head on Collision أى زاوية السقوط تساوى صفر.

٢. عند التصادم بزاوية قائمة.

(٣) بفرض أن نصف قطر نواة R بالمتر حيث $R=1.3\ A^{1/3}\times10^{-12}$ ، A عدد الكتلة . احسب كثافة النواة وعدد النيوكليونات لكل وحدة حجم داخل النواة.

(٤) أكتب الرموز الناقصة والمشار إليها بالرمز x فى التفاعلات النووية التالية

$^{10}B(x,\alpha)\ ^8Be,$ $^{17}O(d,n)\ x,$ $^{23}Na(P,x)^{20}Ne,$ $x(P,n)^{37}Ar$

(٥) برهن على أن طاقة الترابط النووى بدلالة العدد الكتلى A والشحنة Z، يمكن حسابها من المعادلة

$$E_b = Z\,\Delta_H + (A-Z)\,\Delta_n - \Delta$$

حيث Δ_H، Δ_n، Δ هى كتل ذرة الهيدروجين وكتلة النيوترون وكتلة الذرة التى تنتمى إليها النواة.

(٦) احسب طاقة الترابط النووى لنواة تتكون من عدد متساوى من البروتونات والنيوترونات وذات نصف قطر يساوى 1.5 مرة أقل من نصف قطر نواة الألمونيوم ^{27}Al.

(٧) باستخدام جداول الكتل الذرية، أوجد

١. متوسط طاقة الترابط لكل نيوكليون فى نواة الأكسجين ^{16}O.

٢. طاقة الترابط للنيوترون وجسيم ألفا فى نواة البورون ^{11}B.

٣. الطاقة اللازمة لفصل نواة ^{16}O إلى أربعة جسيمات متماثلة.

(٨) أوجد الفرق فى طاقة الترابط للنيوترون والبروتون فى النواة ^{11}B. اشرح سبب وجود فرق في القيمة؟

(٩) احسب طاقة التفاعل $^7Li + P \rightarrow 2\ ^4He$ إذا كانت طاقة الترابط لكل نيوكليون فى نظير الليثيوم ^7Li و نظير الهيليوم ^4He تساوى 5.6 MeV و 7.06 MeV على الترتيب.

(١٠) احسب طاقة التفاعل $^{14}N\ (\alpha, P)\ ^{17}O$ إذا كانت طاقة الحركة لجسيم ألفا E_α=4 MeV وانطلق البروتون بطاقة E_P=2.09 MeV عند زاوية 60^o مع اتجاه حركة جسيم ألفا.

(١١) جسيم ألفا ذو طاقة حركة $E_{\alpha}=5.3$ MeV تشارك فى التفاعل $^{9}Be\ (\alpha, n)\ ^{12}C$ حيث $Q=+5.7$ MeV. احسب طاقة الحركة للنيوترونات المنطلقة عند زاوية قائمة بالنسبة لاتجاه حركة جسيمات الفا.

(١٢) إذا كان من الضرورى أن تمتلك النيوترونات أقل طاقة حركة $E_{Th}=4.0$ MeV، لبدء التفاعل (n, α) مع نواة البورون ^{11}B ثابتة. أوجد طاقة هذا التفاعل.

(١٣) باستخدام جداول الكتل الذرية، احسب أقل طاقة حركة لجسيمات ألفا مطلوبة لبدء التفاعل النووى $^{7}Li\ (\alpha, n)\ ^{10}B$. ما هى سرعة نواة البورون ^{10}B فى هذه الحالة.