

الفصل الثالث

التفاعلات النووية

إن أغلبية المعطيات المتعلقة بالنواة الذرية تأتي في حقيقة الأمر من تحليل نتائج تجارب التفاعلات النووية (nuclear reactions) التي يحدثها الفيزيائيون النوويون في مختبراتهم ، و التي تتمثل في قذف نوى ذرية بنوى أخرى و دراسة ما ينتج عن هذا التفاعلات . فلقد تم اكتشاف النواة الذرية مثلا ، بعد أن قام "رودرفورد" (Rutherford) عام 1911 بتحليل نتائج التجربة الشهيرة المتمثلة في قذف صفيحة ذهبية بجسيمات α ، و اكتشف البروتون سنة 1919 من طرف "رودرفورد" مرة أخرى من خلال عملية قذف نوى الآزوت بجسيمات α ، و تم اكتشاف النوترون بعد أن قام "شادويك" (Chadwick) عام 1932 بفحص دقيق لتجربة تمثلت في قذف نوى البرليوم بجسيمات α ... تعد التفاعلات النووية اليوم الشغل الشاغل للكثير من العاملين في مجال الفيزياء النووية لأنها وسيلة فعالة لدراسة النواة الذرية .

1. الخصائص العامة

عندما يقترب جسم من جسم آخر بالمقدار الذي يؤدي إلى تغيير حركتهما ، نقول أنه قد حدث تصادم أو تفاعل بينهما ، سواء أكان الجسمان المتفاعلان جسيمتين أوليتين أو جملتين مركبتين كالنواة الذرية . التصادم هنا لا يعني حتما أن الجسمين يتلامسان خلال عملية الصدم ، كما يحدث لكرة البليارد مثلا ، وإنما يعني أن الجسمين المتفاعلين تبادلا جزءا من كمية الحركة و من الطاقة عندما اقترب أحدهما من الأخرى بالمقدار الكافي .

التفاعل النووي النموذجي يكتب على الشكل التالي :

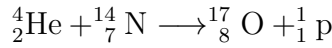


و بشكل مختصر :

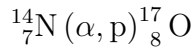
$$X(a, b) Y$$

حيث يمثل a النواة القذيفة (projectile) التي نقوم بتسريعها ، ويمثل X النواة المستهدفة أو الهدف (target) التي تكون عادة ساكنة في نظام المخبر (و هو النظام الذي نحن فيه) . أما b و Y فهما منتجا التفاعل (reaction products) . غالبا ما تكون النواتان X و Y ثقيلتين و النواتان a و b خفيفتين ، و غالبا ما تكون النواة الخفيفة المنتجة b قابلة للكشف (detectable) ، على عكس النواة الثقيلة Y التي تدعى لهذا السبب النواة المتخلفة (residual nucleus) .

أول تفاعل نووي في تاريخ الإنسان أنجزه "روذرفورد" (Rutherford) عام 1919 ، واكتشف من خلاله البروتون (proton) :



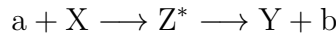
و في شكله المختصر :



القذائف الخفيفة الأكثر استعمالا هي البروتون (p) والجسيم α و الدوتريوم (d) ، لكن هناك أيضا التفاعلات النووية التي تستخدم قذائف ثقيلة . نقتصر في هذا الفصل على دراسة القذائف الخفيفة فقط ($A < 4$) و الطاقات المنخفضة نسبيا ($\simeq 10 \text{ MeV}$) ، مع العلم أن التفاعلات النووية العالية الطاقة تنتج جسيمات أخرى بالإضافة إلى النواتين b و Y .

إذا تطابقت القذيفة a مع الجسيمة b (في هذه الحالة ، تكون النواتان X و Y متطابقتين أيضا) ، نقول عن التفاعل أنه استطارة (diffusion) : إذا كانت النواتان المنتجتان b و Y في مستوييهما الأساسيين (fundamental states) نقول أن الإستطارة مرنة (elastic) ، وإذا كانت إحدى هاتين النواتين أو كليهما في حالة إثارة (excited state) نقول أن الإستطارة غير مرنة (inelastic) . وإذا كانت النواتان a و b مختلفتين تماما ، فإننا نستخدم تسمية التفاعل النووي (nuclear reaction) .

عندما تكون طاقة القذيفة ضعيفة نسبيا ، تمتص النواة المستهدفة القذيفة ، و تكون خلال مدة زمنية قصيرة جدا نواة ذات إثارة عالية تدعى النواة المركبة (compound nucleus) :



لكن عندما تكون الطاقة عالية ، يكون التفاعل النووي مباشرا (direct nuclear reaction) ، إذ أنه يحدث دون المرور بمرحلة النواة المركبة ، و يتم في فترة زمنية قصيرة بالكاد تساوي الزمن اللازم لعبور الجسيم (القذيفة) خلال النواة (الهدف) ، و بذلك لا يتفاعل الجسيم مع النواة ككل أثناء مروره خلالها وإنما يتفاعل فقط مع بعض مكوناتها .

2. قوانين الحفظ

تخضع التفاعلات النووية إلى قوانين حفظ (conservation laws) ، و هي قوانين أساسية في الفيزياء تحكم حفظ كميات أساسية لنظام معزول ، مثل الطاقة الكلية (total energy) و كمية الحركة (momentum) و الشحنة الكهربائية (electric charge) .

(أ) حفظ الشحنة الكهربائية

نعتبر تفاعلا نوويا في شكله العام :

$$(1) + (2) \longrightarrow (3) + (4)$$

الشحنة الكهربائية الكلية للنظام المعزول لا تتغير وبالتالي :

$$q_1 + q_2 = q_3 + q_4 \quad (23)$$

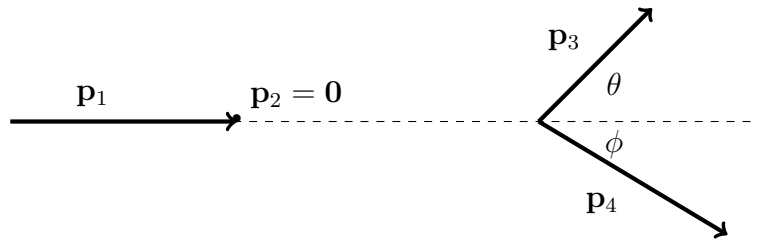
(ب) حفظ كمية الحركة

عند تصادم نواتين ، تبقى كمية الحركة الكلية ثابتة ، مما يجعلنا نكتب :

$$\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_3 + \mathbf{p}_4 \quad (24)$$

بافتراض أن الهدف ساكن في نظام المخبر ($\mathbf{p}_2 = 0$) ، وأن النواتين (3) و (4) تصنعان الزاويتين θ و ϕ على التوالي مع اتجاه الورود (الشكل 15) ، يمكننا أن نسقط العلاقة (24) على محورين متعامدين :

$$\begin{cases} p_1 = p_3 \cos \theta + p_4 \cos \phi \\ 0 = p_3 \sin \theta - p_4 \sin \phi \end{cases} \quad (25)$$



شكل 15: تصادم بين جسيمتين في نظام المخبر .

(ج) حفظ الطاقة الكلية

الطاقة لا تفنى ولا تستحدث من العدم ، وإنما تتحول من شكل لآخر . وهذا يعني أن الطاقة الكلية لنظام معزول تبقى دائما ثابتة ولا تتغير ، أي أنها تحفظ . بالنسبة للتفاعل النووي السابق يمكننا أن نكتب :

$$m_1c^2 + T_1 + m_2c^2 + T_2 = m_3c^2 + T_3 + m_4c^2 + T_4 \quad (26)$$

حيث تمثل m كتلة السكون (rest mass) و T الطاقة الحركية (kinetic energy) . نعرف القيمة Q للتفاعل (Q -value) على النحو التالي :

$$Q = [(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)] c^2 = (T_3 + T_4) - (T_1 + T_2) \quad (27)$$

وهي تمثل كمية الطاقة المحررة في التفاعل . عندما تكون القيمة Q منعدمة ($Q = 0$) ، نقول أن التصادم مرن (elastic) . في هذه الحالة يكون لدينا :

$$\begin{cases} m_1 + m_2 = m_3 + m_4 \\ T_1 + T_2 = T_3 + T_4 \end{cases}$$

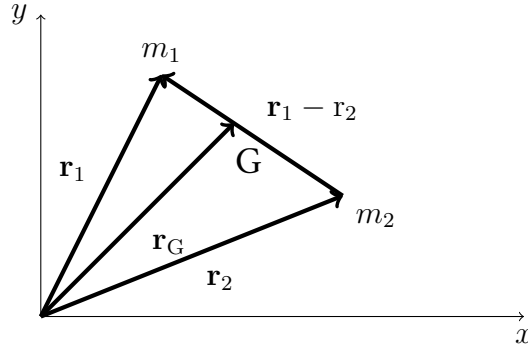
وهذا يعني أن الكتلة والطاقة الحركية تحفظان إذا كان التصادم مرنا . عندما تكون القيمة Q غير منعدمة ($Q \neq 0$) ، نقول أن التصادم غير مرن (inelastic) : إذا كانت Q موجبة ($Q > 0$) ، يكون التفاعل منتجا للطاقة (exoergic reaction) ، وفيه يتحول جزء من كتلة الجسيمات الابتدائية إلى طاقة ، بحيث تقل كتلة الجسيمات الناتجة عن التفاعل عن كتلة الجسيمات الداخلة في التفاعل :

$$\begin{cases} m_1 + m_2 > m_3 + m_4 \\ T_1 + T_2 < T_3 + T_4 \end{cases}$$

وعندما تكون القيمة Q سالبة ($Q < 0$) ، يكون التفاعل ماصا للطاقة (endoergic reaction) ، وفيه يتحول جزء من طاقة الحركة الداخلة في التفاعل إلى إضافة في كتلة الجسيمات الناتجة عن التفاعل :

$$\begin{cases} m_1 + m_2 < m_3 + m_4 \\ T_1 + T_2 > T_3 + T_4 \end{cases}$$

وبذلك لا يحدث التفاعل إلا بتوفير قدر من الطاقة . الحد الأدنى من الطاقة الحركية للقذيفة ، في نظام المخبر ، اللازمة لإحداث تفاعل نووي ماص للطاقة يدعى عتبة الطاقة (threshold energy) .



شكل 16: نظام مركز الكتلة .

3. نظام مركز الكتلة

إن حركة الجملة الفيزيائية المركبة من جسمين مسألة معقدة ، و ذلك لأنها بستة (6) أبعاد (3 أبعاد لكل جسم) . بتطبيق قانون "نيوتن" (Newton) للحركة على كل جسم ، نحصل على المعادلتين :

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 \mathbf{r}_1}{dt^2} = \mathbf{F}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \\ m_2 \frac{d^2 \mathbf{r}_2}{dt^2} = -\mathbf{F}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \end{cases}$$

حيث يمثل m_1 و m_2 كتلتي الجسمين ، و يمثل $\mathbf{r}_1$ و $\mathbf{r}_2$ متجهي موضعهما ، أما $\mathbf{F}$ فهي القوة الموجودة بينهما . لتبسيط هذه المسألة ، نعمل غالباً إلى إجراء التغيير التالي :

$$\begin{cases} \mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 \\ \mathbf{r}_G = \frac{m_1 \mathbf{r}_1 + m_2 \mathbf{r}_2}{m_1 + m_2} \end{cases}$$

يمثل $\mathbf{r}$ المسافة النسبية بين الجسمين بينما يمثل $\mathbf{r}_G$ متجه موضع مركز الكتلة (centre of mass) للجسمين (الشكل 16) . نشق الآن العلاقتين السابقتين :

$$\begin{cases} \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \frac{d^2 \mathbf{r}_1}{dt^2} - \frac{d^2 \mathbf{r}_2}{dt^2} = \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \mathbf{F}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\mu} \mathbf{F}(\mathbf{r}) \\ \frac{d^2 \mathbf{r}_G}{dt^2} = \frac{1}{m_1 + m_2} \left(m_1 \frac{d^2 \mathbf{r}_1}{dt^2} + m_2 \frac{d^2 \mathbf{r}_2}{dt^2} \right) = \mathbf{F}(\mathbf{r}) - \mathbf{F}(\mathbf{r}) = 0 \end{cases}$$

تعرف μ بالكتلة المختزلة (reduced mass) و هي تعطى بالعلاقة :

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}$$

بفضل هذا التغيير ، فصلنا حركة الجملة المركبة من جسمين إلى حركتين مستقلتين . الحركة الأولى تخص جسماً وهمياً كتلته μ تتعرض للقوة $\mathbf{F}$:

$$\mu \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F}(\mathbf{r})$$

و الحركة الثانية تخص مركز الكتلة (G) لهذه الجملة و هي حركة مستقيمة منتظمة ما دام لدينا :

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_G}{dt^2} = 0$$

باشتقاق الشعاع $\mathbf{r}_G$ يمكننا حساب سرعة مركز الكتلة :

$$\mathbf{v}_G = \frac{d\mathbf{r}_G}{dt} = \frac{1}{m_1 + m_2} \left(m_1 \frac{d\mathbf{r}_1}{dt} + m_2 \frac{d\mathbf{r}_2}{dt} \right) = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \mathbf{v}_1$$

حيث تمثل $\mathbf{v}_1$ سرعة القذيفة (افترضنا هنا أن الهدف ساكن في نظام المخبر أي أن $\mathbf{v}_2 = 0$) . بما أن السرعة $\mathbf{v}_1$ ثابتة ، فإن السرعة $\mathbf{v}_G$ هي أيضا ثابتة .

نظام مركز الكتلة (centre of mass system) هو هيكل الإسناد الذي يتحرك مع مركز الكتلة بنفس السرعة الثابتة ، و يكون مبدؤه مطابقا لمركز الكتلة ، و هو بذلك نظام عطالي (inertial) ما دامت حركته مستقيمة و منتظمة . أهم ميزة لنظام مركز الكتلة هي أن كمية الحركة الكلية تكون دائما منعدمة سواء قبل التفاعل أو بعده :

$$\mathbf{p}_1^* + \mathbf{p}_2^* = \mathbf{p}_3^* + \mathbf{p}_4^* = 0$$

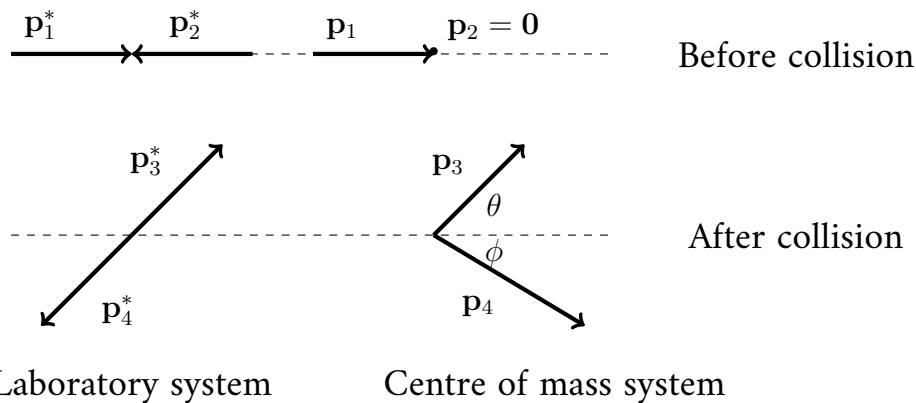
و ذلك لأنه في هذا النظام :

$$m_1 \mathbf{r}_1^* + m_2 \mathbf{r}_2^* = 0$$

حيث يمثل $\mathbf{r}_1^*$ و $\mathbf{r}_2^*$ متجهي الموضع للجسيمين في نظام مركز الكتلة ، و منه :

$$m_1 \frac{d\mathbf{r}_1^*}{dt} + m_2 \frac{d\mathbf{r}_2^*}{dt} = \mathbf{p}_1^* + \mathbf{p}_2^* = 0 = \mathbf{p}_3^* + \mathbf{p}_4^*$$

يعطينا الشكل (17) مخطط تصادم بين جسيمتين في نظام المخبر و نظام مركز الكتلة .



شكل 17: تصادم بين جسيمتين في نظام المخبر و نظام مركز الكتلة .

4. عتبة الطاقة

نعتبر تفاعلا ماصا للطاقة ، أي أن :

$$Q = (m_1 + m_2)c^2 - (m_3 + m_4 + \dots)c^2 < 0$$

لحساب عتبة الطاقة نستخدم لا متغير "لورنتس" (Lorentz invariant) :

$$E^2 - p^2c^2 = E^{*2} = m_0^2c^4$$

حيث يمثل E الطاقة الكلية و p كمية الحركة الكلية في نظام المخبر ، و E^* الطاقة الكلية في نظام مركز الكتلة . نحصل على عتبة الطاقة عندما يكون E^* مساويا على الأقل لحاصل جمع كتل منتجات التفاعل :

$$E^* = m_3c^2 + m_4c^2 + \dots$$

من جهة أخرى لدينا (نفترض أن الهدف ساكن في نظام المخبر) :

$$E^2 - p^2c^2 = (E_1 + m_2c^2)^2 - p_1^2c^2 = m_1^2c^4 + m_2^2c^4 + 2E_1m_2c^2$$

بكتابة :

$$E_1 = m_1c^2 + E_{th}$$

حيث يمثل E_{th} عتبة الطاقة (threshold energy) ، يصبح لدينا :

$$E^2 - p^2c^2 = (m_1 + m_2)^2c^4 + 2m_2c^2E_{th} = (m_3 + m_4 + \dots)^2c^4$$

و منه نستنتج :

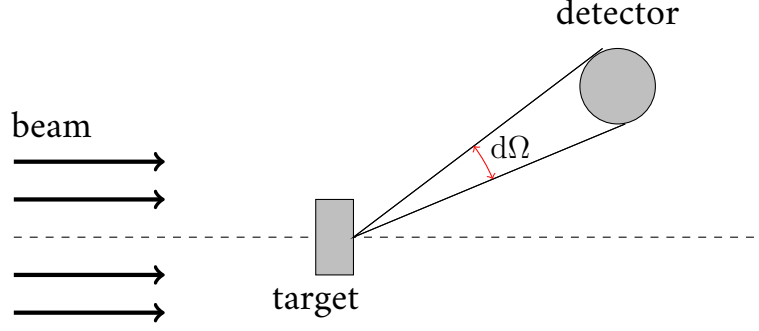
$$E_{th} = -\frac{(m_3 + m_4 + \dots)^2 - (m_1 + m_2)^2}{2m_2}c^2$$

أي أن :

$$E_{th} = -\frac{M}{2m_2}Q \quad (28)$$

حيث يمثل M حاصل جمع كل الكتل :

$$M = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + \dots$$



شكل 18: المقطع العرضي للتفاعل .

5. المقطع العرضي

في الواقع ، تمثل التفاعلات النووية في تصويب حزمة (beam) من الجسيمات السريعة - التي نحصل عليها مثلاً بواسطة مسرع (accelerator) - نحو هدف (target) مكون من نوى ساكنة في نظام المخبر ، ثم كشف (detection) منتجات التفاعل بعيداً عن منطقة التفاعل (الشكل 18) . نسبة الجسيمات المتفاعلة (dN/N) ، التي تمثل أيضاً احتمال التفاعل ، تتناسب مع سمك الهدف (dx) و كثافة النوى (n) التي يحتويها :

$$\frac{dN}{N} = \sigma n dx \quad (29)$$

يعبر معامل التناسب σ عن شدة احتمال تفاعل معين بين نوى ساقطة وأخرى مستهدفة ، وهو يساوي أيضاً النسبة بين عدد التفاعلات في وحدة الزمن لكل نواة مستهدفة (R) وعدد الجسيمات الساقطة في وحدة الزمن و وحدة المساحة (I) :

$$\sigma = \frac{R}{I} \quad (30)$$

غالباً ما يتوقف σ على اتجاه الكاشف المعروف بالزاويتين θ و ϕ وكذلك الطاقة E للجسيمات الواردة :

$$\sigma = \sigma(E, \theta, \phi)$$

و هو متجانس مع المساحة :

$$[\sigma] = \frac{[dN/N]}{[n][dx]} = L^2$$

لذلك يدعى σ المقطع العرضي (cross-section) للتفاعل ويعطى عادة بوحدة البارن (barn) ، رمزها b . لدينا :

$$1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$$

عمليا نقوم بقياس المقطع الفعال بالنسبة للزاوية الصلبة $d\Omega$ (الشكل 18) ، و الذي يعرف بالمقطع الفعال التفاضلي (differential cross-section) ، نكتبه على شكل $(d\sigma/d\Omega)$ ، ثم نستنتج المقطع الفعال الكلي :

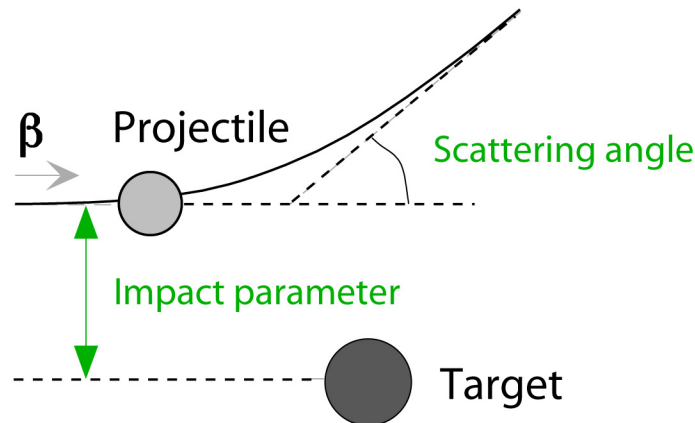
$$\sigma_{\text{tot}} = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega$$

6. استطارة "رودرفورد"

بما أن النواة الذرية تملك شحنة كهربائية ، فإمكاننا إذن أن ندرسها من خلال التفاعل الكولومي الذي تتعرض له حين نقوم بقذفها بجسيمات مشحونة . قد يكون هذا التفاعل مرنا و قد يكون غير مرن . يسمى التفاعل الكولومي المرن استطارة "رودرفورد" (Rutherford scattering) ، و ذلك نسبة إلى التجارب الأولى التي أجراها "رودرفورد" و زملاؤه و التي أدت إلى اكتشاف النواة الذرية عام 1911 . يعطينا الشكل 19 مثالا عن استطارة "رودرفورد" . بما أن القوة الكهربائية تتناسب عكسا مع مربع المسافة ($\propto 1/r^2$) ، فإن مسار الجسيمة يكون على شكل قطع مكافئ (hyperbola) . في حالة غياب قوة التنافر الكهربائية ، فإن الجسم الساقط سيقترّب من الهدف وفق خط مستقيم يكون على بعد مسافة b من مركز الإستطارة : تدعى هذه المسافة متغير التصادم (impact parameter) . في حضور القوة الكهرومغناطيسية ، تنحرف الجسيمة الساقطة عن مسارها الأصلي بزاوية قدرها θ . باستخدام قانون "نيوتن" (Newton) للحركة ، يمكننا أن نكتب :

$$\mu \frac{d^2 r}{dr^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

حيث تمثل μ الكتلة المختزلة و q_1 و q_2 شحنتي القذيفة و الهدف . حل هذه المعادلة يؤدي إلى علاقة



شكل 19: استطارة "رودرفورد" .

تربط بين متغير التصادم b و زاوية الإنحراف θ :

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{b_0}{b} \quad (31)$$

حيث يمثل b_0 ثابتا يعطى بالعلاقة :

$$b_0 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \mu v_0^2}$$

تمثل v_0 السرعة الابتدائية للجسيمة الساقطة . كل الجسيمات التي يكون تغير تصادمها محصورا بين b و $b + db$ ، تكون زاوية انحرافها محصورة بين θ و $d\theta$. و من هنا يمكننا استنتاج المقطع العرضي التفاضلي :

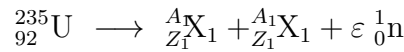
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{b_0^2}{4 \sin^2(\theta/2)} \quad (32)$$

7. الطاقة النووية

الطاقة النووية (nuclear energy) من أهم تطبيقات الفيزياء النووية . هذه الطاقة التي تحررها النواة الذرية خلال تفاعلات الانشطار النووي (nuclear fission) أو تفاعلات الانصهار النووي (nuclear fusion) تستغل في إنتاج الكهرباء و في صناعة القنابل النووية وغيرها ، و هي أيضا الطاقة التي تصدرها الشمس و مختلف النجوم الأخرى الموجودة في الكون .

(أ) الانشطار النووي

عندما تمتص نواة ثقيلة نوترونا ساقطا ، فإنها تتحول أحيانا إلى نواة مركبة و تنشط إلى شظيتين نوويتين مصدرة في نفس الوقت بعض النوترونات الإضافية . هذا النوع من التفاعلات يمثل انشطارا نوويا . التفاعل النموذجي في حالة اليورانيوم (U) هو كالتالي :



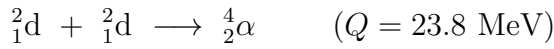
بحيث $Z_1 + Z_2 = 92$ و $A_1 + A_2 + \varepsilon = 235$. عدد صحيح تتراوح قيمته بين 2 و 3 . النسبة بين كتلي الشظيتين في الانشطار تعادل تقريبا 3/2 .

ب) الانصهار النووي

الانصهار النووي تفاعل يحدث خلاله اتحاد نواتين خفيفتين نسبيا ($A < 20$) لتكونا نواة أثقل محررة في نفس الوقت كمية من الطاقة . كمثال عت تفاعل الإنصهار النووي ، نذكر تشكيل دوتون انطلاقا من بروتون و نوترون :

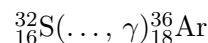
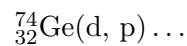
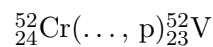
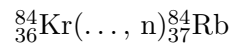


و كذلك تشكيل جسيم α بعد انصهار دوتونين :



بالرغم من أن هذه الطاقات أقل من الطاقة المحررة خلال تفاعل انشطار نووي ، إلا أن الطاقة في وحدة الكتلة أكبر نظرا إلى الكتل الأصغر للجسيمات المتفاعلة . نعتقد أنه يحدث بداحل النجوم تفاعلات انصهار نووي تعرف باسم دورة الكربون-نيتروجين-أكسجين (CNO) و البروتون-بروتون (p-p) .

1. عين الجسيمات الناقصة في التفاعلات النووية التالية :



2. تصطدم نواة كتلتها m و طاقتها الحركية T_1 بنواة مماثلة ساكنة . بافتراض أن التصادم مرن ، احسب الزاوية θ التي يصنعها اتجاهها النواتين بعد الصدم .

3. تصطدم نواة كتلتها m_1 و كمية حركتها p_1 ، موازية للمحور $x'x$ ، بنواة ثانية ساكنة في نظام المخبر ، كتلتها m_2 . نفترض أن التصادم مرن وأن النواتين بعد الصدم تتحركان بالموازاة مع المحور $x'x$ وأن كميتي حركتهما p'_1 و p'_2 .

(ا) اكتب الطاقة الحركية T'_2 للنواة الثانية بعد الصدم بدلالة الطاقة الحركية T_1 للنواة الساقطة .

(ب) ادرس الحالات التالية :

$$m_1 = m_2 ; m_1 \gg m_2 ; m_1 \ll m_2$$

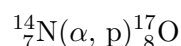
4. نقوم بقذف نوى من الليثيوم (^7_3Li) بنوى من الدوتريوم (d) تعادل طاقتها الحركية 10 MeV . النوترونات (n) الناتجة عن هذا التفاعل تصدر صانعة مع اتجاه ورود القذائف زاوية قدرها 90° .

(ا) اكتب معادلة هذا التفاعل و احسب حرارته Q .

(ب) احسب الطاقة الحركية للنوترونات المنتجة .

(ج) احسب طاقة ارتداد نوى البرليوم (Be) الناتجة عن هذا التفاعل ، و كذلك اتجاه حركتها .

5. سنة 1919 ، اكتشف "رودرفورد" البروتون عند قذف نوى آزوت ساكنة بجسيمات α :



(ا) بين أن هذا التفاعل النووي ماص للحرارة ثم احسب عتبة الطاقة E_{th} .

(ب) بافتراض أن الطاقة الحركية لجسيمات α التي استخدمها "رودرفورد" تساوي 6.25 MeV ، احسب الطاقة الحركية T_p للبروتونات المنتجة علما أنها تصدر في اتجاه يصنع مع اتجاه الورود زاوية قدرها 60° .

(ج) احسب الطاقة الحركية لنوى الأكسجين و كذلك اتجاه حركتها .

6. نقوم بقذف هدف من الكالسيوم $^{48}_{20}\text{Ca}$ ، مكون من 1.3×10^{19} نواة في كل cm^3 ، بحزمة من جسيمات α شدة تيارها الكهربائي تساوي 10 nA . كاشف زاويته الصلبة تساوي $2 \times 10^{-3} \text{ sr}$ يقيس 15 بروتونا في كل ثانية . بافتراض أن التوزيع الزاوي متناح ، احسب المقطع الفعال الكلي للتفاعل النووي .

7. نعتبر التفاعل الكولومي بين بروتون كتلته m_p و شحنته e ونواة كتلتها $M \approx Am_p$ حيث يمثل A العدد الكتلي و شحنتها Ze . لتكن الطاقة الحركية الابتدائية للبروتون .

(ا) احسب متغير التصادم b الذي يؤدي إلى زاوية انحراف قدرها 90° .

(ب) احسب المقطع العرضي للتفاعلات التي تحدث بزاوية انحراف أكبر من 90° .

$$Z = 26 ; E_k = 10 \text{ MeV}$$

8. تفقد النوترونات نصف طاقتها ، كقيمة متوسطة ، عند اصطدامها ببروتونات شبه حرة . ما هي القيمة المتوسطة للتفاعلات اللازمة لتقليص طاقة نوترون من 2 MeV إلى الطاقة الحرارية 0.04 eV .

9. تنشطر نواة كتلتها m ساكنة في نظام المخبر إلى نواتين أخريين كتلة الأولى m_1 و الثانية m_2 . احسب الطاقة الحركية لكل نواة منتجة بدلالة القيمة Q لهذا التفاعل .
 $m_1 = 90 \text{ u} ; m_2 = 140 \text{ u} ; Q = 190 \text{ MeV}$

10. إنشطار نواة $^{235}_{92}\text{U}$ من طرف نوترون يحترق حوالي 185 MeV من الطاقة القابلة للاستعمال . إذا كانت قدرة مفاعل نووي يعمل بالنواة $^{235}_{92}\text{U}$ تساوي 100 MW ، ما هو الوقت اللازم لاستهلاك 1 kg من اليورانيوم ؟