الفصل الثالث

التفاعـلات النوويـة

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 "روذرفورد" (Rutherford) عام 1911 بتحليل نتائج التجربة الشهيرة المتمثلة في قذف صفيحة ذهبية بجسيمات α ، و اكتشف البروتون سنة 1919 من طرف "روذرفورد" 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 البريليوم بجسيمات α ... تعد التفاعلات النووية اليوم الشغل الشاغل للكثير من العاملين في مجال الفيزياء النووية لأنها وسيلة فعالة لدراسة النواة الذرية .

1. الخصائـص العامـة

عندما يقترب جسم من جسم آخر بالمقدار الذي يؤدي إلى تغيير حركتيهما ، 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 لكراة البليارد مثلا ، و إنما يعني أن الجسمين المتفاعلين تبادلا جزء من كمية الحركة و من الطاقة عندما اقترب أحدهما من الأخرى بالمقدار الكافي .

التفاعل النووي النموذجي يكتب على الشكل التالي :

$$\mathrm{a} + \mathrm{X} \longrightarrow \mathrm{Y} + \mathrm{b}$$

و بشكل مختصر :

$$\mathrm{X}\,(\mathrm{a},\mathrm{b})\,\mathrm{Y}$$

حيث يمثل a النواة القذيفة (projectile) التي نقوم بتسريعها ، و يمثل 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 ، و اكتشف من خلاله البروتون (proton) :

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

و في شكله المختصر :

$$^{14}_{7}\mathrm{N}\,(\alpha,\mathrm{p})^{17}_{8}\mathrm{O}$$

القذائف الخفيفة الأكثر استعمالا هي البروتون (p) و الجسيم 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 ($\simeq 10$ 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) ، و إذا كانت إحدى هاتين النواتين أو كلتاهما في حالة إثارة (excited state) نقول أن الإستطارة غير مرنة (inelastic) . و إذا 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 تتكون خلال مدة زمنية قصيرة جدا نواة ذات إثارة عالية تدعى النواة المركبة (compound nucleus) :

$$\mathrm{a} + \mathrm{X} \longrightarrow \mathrm{Z}^{*} \longrightarrow \mathrm{Y} + \mathrm{b}$$

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 و إنما يتفاعل فقط مع بعض مكوناتها .

2. قوانيــن الحفــظ

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) .

ا) حفــظ الشحنــة الكهربائيــة

نعتبر تفاعلا نوويا في شكله العام :

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

الشحنة الكهربائية الكلية للنظام المعزول لا تتغير و بالتالي :

$$q_1 + q_2 = q_3 + q_4 \tag{23}$$

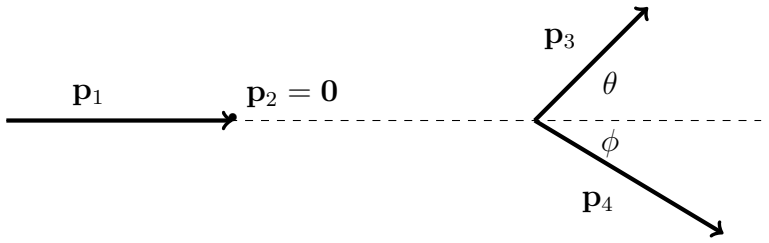
ب) حفــظ كميــة الحركــة

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

$$\mathbf{p_1} + \mathbf{p_2} = \mathbf{p_3} + \mathbf{p_4} \tag{24}$$

بافتراض أن الهدف ساكن في نظام المخبر ($\mathbf{p_2} = 0$) ، و أن النواتين (3) و (4) تصنعان الزاويتين θ و ϕ على التوالي مع اتجاه الورود (الشكل 15) ، يمكننا أن نسقط العلاقة (24) على محورين متعامدين :

$$\begin{cases} p_1 &= p_3 \cos\theta + p_4 \cos\phi \\ 0 &= p_3 \sin\theta - p_4 \sin\phi \end{cases} \tag{25}$$



شكــل 15: تصادم بين جسيمتين في نظام المخبر .

ج) حفـظ الطاقـة الكليـة

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

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

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

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

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

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

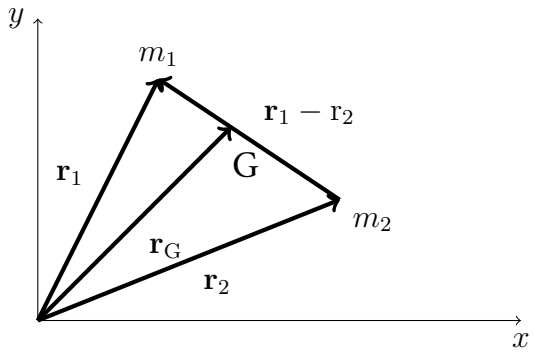
و هذا يعني أن الكتلة و الطاقة الحركية تحفظان إذا كان التصادم مرنا . عندما تكون القيمة Q غير منعدمة $(Q \neq 0)$ ، نقول أن التصادم غير مرن (inelastic) : إذا كانت Q موجبة $(Q > 0)$ ، يكون التفاعل منتجا للطاقة (exoergic reaction) ، و فيه يتحول جزء من كتلة الجسيمات الإبتدائية إلى طاقة ، بحيث تقل كتلة الجسيمات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

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

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

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

و بذلك 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) .



شكـل 16: نظام مركز الكتلة .

3. نظـام مركـز الكتلـة

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 :

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

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 ، نعمد غالبا إلى إجراء التغيير التالي :

$$\begin{cases} \mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 \\ \mathbf{r}_\mathrm{G} = \dfrac{m_1\mathbf{r}_1 + m_2\mathbf{r}_2}{m_1 + m_2} \end{cases}$$

يمثل $\mathbf{r}$ المسافة النسبية بين الجسمين بينما يمثل $\mathbf{r}_\mathrm{G}$ متجه موضع مركز الكتلة (centre of mass) للجسمين (الشكـل 16) . نشتق الآن العلاقتين السابقتين :

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}^2\mathbf{r}}{\mathrm{d}t^2} = \dfrac{\mathrm{d}^2\mathbf{r}_1}{\mathrm{d}t^2} - \dfrac{\mathrm{d}^2\mathbf{r}_2}{\mathrm{d}t^2} = \left(\dfrac{1}{m_1} + \dfrac{1}{m_2}\right)\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \dfrac{1}{\mu}\mathbf{F}(\mathbf{r}) \\ \dfrac{\mathrm{d}^2\mathbf{r}_\mathrm{G}}{\mathrm{d}t^2} = \dfrac{1}{m_1 + m_2}\left(m_1\dfrac{\mathrm{d}^2\mathbf{r}_1}{\mathrm{d}t^2} + m_2\dfrac{\mathrm{d}^2\mathbf{r}_2}{\mathrm{d}t^2}\right) = \mathbf{F}(\mathbf{r}) - \mathbf{F}(\mathbf{r}) = 0 \end{cases}$$

تعرف μ بالكتلة الختزلة (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 جسما وهميا كتلته μ تتعرض للقوة $\mathbf{F}$:

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

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

$$\frac{\mathrm{d}^2\mathbf{r}_\mathrm{G}}{\mathrm{d}t^2} = 0$$

باشتقاق الشعاع $\mathbf{r}_\mathrm{G}$ يمكننا حساب سرعة مركز الكتلة :

$$\mathbf{v}_\mathrm{G} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{r}_\mathrm{G}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{m_1+m_2}\left(m_1\frac{\mathrm{d}\mathbf{r}_1}{\mathrm{d}t} + m_2\frac{\mathrm{d}\mathbf{r}_2}{\mathrm{d}t}\right) = \frac{m_1}{m_1+m_2}\mathbf{v}_1$$

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 $\mathbf{v}_\mathrm{G}$ 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 :

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

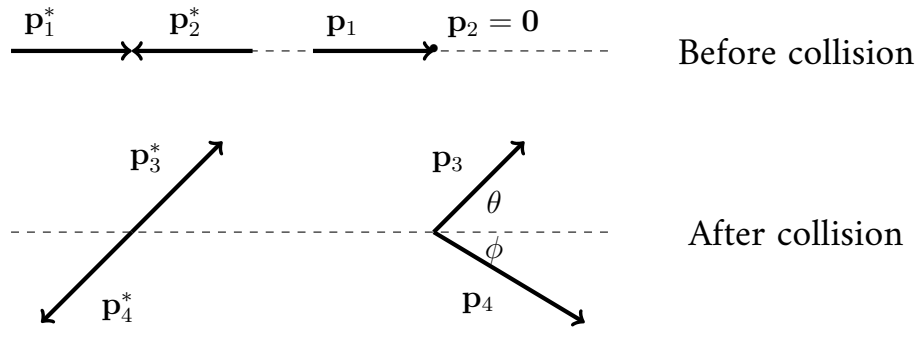
و ذلك لأنه في هذا النظام :

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

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

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

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



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

4. عتبــة الطاقــة

نعتبر تفاعلا ماصا للطاقة ، أي أن :

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

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 :

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

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 :

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

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

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

و منه نستنتج :

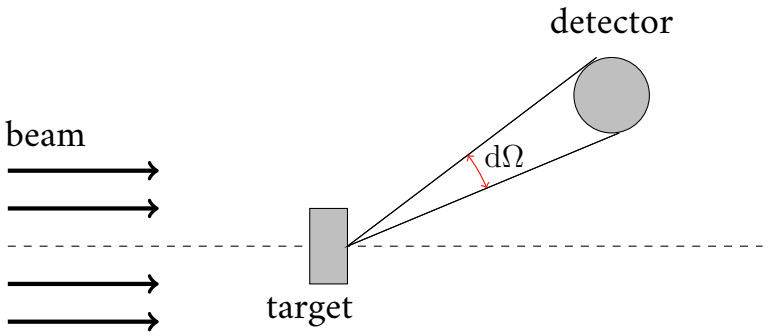
$$E_{\text{th}} = -\frac{(m_3 + m_4 + \ldots)^2 - (m_1 + m_2)^2}{2m_2}c^2$$

أي أن :

$$E_{\text{th}} = -\frac{M}{2m_2}Q \tag{28}$$

حيث يمثل M حاصل جمع كل الكتل :

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



شكـل 18: المقطع العرضي للتفاعل .

5. المقطـع العـرضي

في الواقع ، تتمثل التفاعلات النووية في تصويب حزمة (beam) من الجسيمات السريعة - التي نحصل عليها مثلا بواسطة مسرع (accelerator) - نحو هدف (target) مكون من نوى ساكنة في نظام المخبر ، ثم كشف (detection) منتجات التفاعل بعيدا عن منطقة التفاعل (الشكـل 18) . نسبة الجسيمات المتفاعلة $(\mathrm{d}N/N)$ ، التي تمثل أيضا احتمال التفاعل ، تتناسب مع سمك الهدف $(\mathrm{d}x)$ و كثافة النوى (n) التي يحتويها :

$$\frac{\mathrm{d}N}{N} = \sigma\, n\, \mathrm{d}x \tag{29}$$

يعبر معامل التناسب σ عن شدةاحتمال تفاعل معين بين نوى ساقطة و أخرى مستهدفة ، و هو يساوي أيضا النسبة بين عدد التفاعلات في وحدة الزمن لكل نواة مستهدفة (R) و عدد الجسيمات الساقطة في وحدة الزمن و وحدة المساحة (I) :

$$\sigma = \frac{R}{I} \tag{30}$$

غالبا ما يتوقف σ على اتجاه الكاشف المعرف بالزاويتين θ و ϕ و كذلك الطاقة E الجسيمات الواردة :

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

و هو متجانس مع المساحة :

$$[\sigma] = \frac{[\mathrm{d}N/N]}{[n][\mathrm{d}x]} = \mathrm{L}^2$$

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

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

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

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

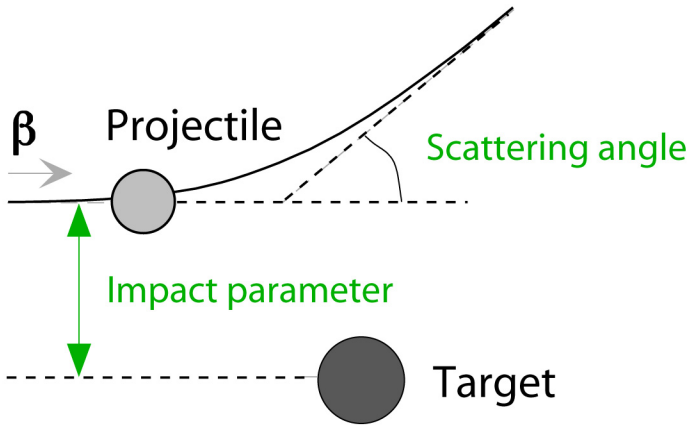
6. استطـارة "روذرفـورد"

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 "روذرفورد" (Rutherford scattering) ، و ذلك نسبة إلى التجارب الأولى التي أجراها "روذرفورد" و زملاؤه و التي أدت إلى اكتشاف النواة الذرية عام 1911 . يعطينا الشكل 19 مثالا عن استطارة "روذرفورد" . 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 الجسيم الساقط سيقترب من الهدف وفق خط مستقيم يكون على بعد مسافة b من مركز الإستطارة : تدعى هذه المسافة متغير التصادم (impact parameter) . في حضور القوة الكهرمغناطيسية ، تنحرف الجسيمة الساقطة عن مسارها الأصلي بزاوية قدرها θ .

باستخدام قانون "نيوتن" (Newton) للحركة ، يمكننا أن نكتب :

$$\mu\frac{\mathrm{d}^2 r}{\mathrm{d}r^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r^2}$$

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



شكـل 19: استطارة "روذرفورد" .

تربط بين متغير التصادم b و زاوية الإنحراف θ :

$$\tan\frac{\theta}{2} = \frac{b_0}{b} \tag{31}$$

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 الإبتدائية للجسيمة الساقطة . كل الجسيمات التي يكون تغير تصادمها محصورا بين b و $b + \mathrm{d}b$ ، تكون زاوية انحرافها محصورة بين θ و $\mathrm{d}\theta$. و من هنا يمكننا استنتاج المقطع العرضي التفاضلي :

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

7. الطاقــة النوويــة

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 في إنتاج الكهرباء و في صناعة القنابل النووية و غيرها ، و هي أيضا الطاقة التي تصدرها الشمس و مختلف النجوم الأخرى الموجودة في الكون .

ا) الانشطــار النــووي

عندما تمتص نواة ثقيلة نوترونا ساقطا ، فإنها تتحول أحيانا إلى نواة مركبة و تنشطر 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 :

$$^{235}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{A}_{Z_1}\mathrm{X}_1 + {}^{A_1}_{Z_1}\mathrm{X}_1 + \varepsilon\, {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

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

ب) الانصهـار النــووي

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 :

$$^{1}_{1}\mathrm{p} \ + \ ^{1}_{0}\mathrm{n} \ \longrightarrow \ ^{2}_{1}\mathrm{d} \qquad (Q = 2.23 \ \mathrm{MeV})$$

و كذلك تشكيل جسيم α بعد انصهار دوتونين :

$$^{2}_{1}\mathrm{d} \ + \ ^{2}_{1}\mathrm{d} \ \longrightarrow \ ^{4}_{2}\alpha \qquad (Q = 23.8 \ \mathrm{MeV})$$

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) .