كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الرابعة

المادة : فيزياء نووية٢

المحاضرة: الثامنة/نظري/د. سمر عمران

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

2025

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

المحاضرة الثامنة لمقرر الفيزياء النووية 2 – د. سمر عمران

التفاعلات النووية

إنَّ كلمة تفاعل تعني تأثير متبادل ولكي نقول تفاعل نووي يجب أن يكون لدينا تأثير متبادل بين جسيمين نوويين وبالإضافة إلى النتيجة الناتجة كل هذا نسمية تفاعل. هناك تفاعلات نووية تحدث بشكل طبيعي وتلقائي ودون تدخل خارجي ولكن اكتشاف التفاعلات النووية الصنعية هي التي سمحت بتطور الفيزياء النووية، كان العالم رذرفورد أول من أنتج تفاعلاً صنعياً وفق المعادلة التالية:

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

نلاحظ من المعادلة أنَّ التفاعل بين جسيمين يعطي جسيمات أخرى تحقق قوانين التفاعل ويمكننا القول أنَّ هناك جسيم متحرك الفا، طاقته وسرعته تسمحان له باختراق حاجز الكمون المرتبط بالنواة مما يؤدي إلى أسر هذا الجسيم وينتج عن ذلك تفاعلات نووية، علماً أنَّ الفاصل الزمني بين عملية الاختراق والأسر صغيرة جداً من مرتبة $10^{-13}sec$ كما أنَّ الجسيمات الواردة تكون طاقتها بحدود $10\ MeV$ ثم تعاظمت لتصبح من مرتبة $10^{6}MeV$ وهذه الطاقات العالية سمحت بتوليد جسيمات نووية جديدة كالميزونات.

مرّت النماذج النووية بمراحل تطور واعتمدت على نموذجين نوويين هما: نموذج القطرة السائلة والنموذج الطبقي.

اعتماداً على النموذج الأول تمّ الفرض أنَّ التفاعل الذي يحصل هو تفاعل قوي جداً بين القذيفة والنواة أو بين القذيفة النووية وكل نكليونات النواة بحيث تتوزع طاقة هذه القذيفة على كافة النكليونات مما يؤدي إل تشكيل نواة مركبة تخذع بدورها لتفاعلات نووية لتعطي نوى جسيمات أخرى.

أما فيما يتعلق بنموذج الطبقات فيمكن القول أنَّ القذيفة يمكن أن تتفاعل مع النواة بواسطة الكمون الوسطي وهذا يجعل احتمال امتصاص النواة للجسيم المقذوف احتمال ضعيف.

تمّ توحيد هاتين الفكرتين في نظرية واحدة تبناها العالم فايزكوف حيث قال: إنَّ التفاعلات النووية يمكن أن تكون تفاعلات مرنة أو غير مرنة، وكذلك عندما يصل الجسيم المقذوف إلى حافة الكمون النووي فسيكون التفاعل الأول هو انعكاس جزئي للتابع الموجي للقذيفة نسميه انتثار مرن ونشير إلى أنَّ الجزء الآخر يتابع باتجاه النواة ويخضع للامتصاص من قبل النواة نفسها.

يقترح العالم فيشباك أنَّ المرحلة الأولى في عملية الامتصاص هي عبارة عن تصادم جسيمين. بعبارة أخرى إذا كان الجسيم الساقط عبارة عن جسيم معزول فهذا الجسيم سوف يؤثر على نكليون من نكليونات النواة ويرفعه نحو مستوى طاقي غير مشغول. إذا استطاع الجسيم الذي خضع للتصادم مغادرة النواة فنقول أنَّ التفاعل الناتج هو "تفاعل مباشر" واحتمال هذه العملية يصبح كبيراً كلما كانت الطاقات أكثر كبراً وإذا لم يستطع الجسيم مغادرة النواة يتولد نتيجة ذلك

تفاعلات نووية معقدة مما يؤدي بالجسيم المقذوف أن يتفاعل مع نكليون ثاني وبالتالي رفعه إلى سوية طاقية غير مشغولة ونكليون ثالث وهكذا، ويمكن أن يكون هناك تحريض جماعي إذا توفرت بعض الشروط ونكليون من نكليونات النواة يمكن أن يغادر النواة وإذا لم يحدث هذا فكل نكليون من النكليونات الثلاثة التي تكون الآن على مستويات غير مشغولة يمكن أن يتفاعل مع نكليونات أخرى وهكذا حتى يتم توزيع الطاقة كما هو في حالة النواة المركبة.

قوانين الانحفاظ وتطبيقاتها:

1- **انحفاظ عدد الجسيمات:** ينتج عادةً عن التفاعلات النووية المُحدثة بطاقات أقل من 100 MeV جسيمان أو نواتان، نمثل التفاعل بالشكل التالي: $a + X \rightarrow b + Y$

حيث: a جسيم ساقط (قذيفة)، X هدف (في حالة سكون في جملة الإحداثيات المخبرية)، b جسيم خفيف ناتج عن التفاعل، Y جسيم ثقيل ناتج عن التفاعل.

وباختصار نرمز للتفاعل: $X(a,b)Y$ ، ينتج عن التفاعل عادةً جسيمان أحدهما خفيف والآخر ثقيل بسبب طاقات ارتباط النوى الداخلة في التفاعل، ويكون في بعض الأحيان لـ b, Y كتل متقاربة أو متماثلة ونقول عندئذ أنَّ التفاعل هو(تفاعل انقسامي أو انشطاري).

نشير إلى أنَّ عدد النترونات والبروتونات محفوظ (العدد الكلي للجسيمات يبقى ثابت) وهذا هو قانون انحفاظ عدد الجسيمات.

2- انحفاظ الطاقة وكمية الحركة:

- **مفهوم حراة التفاعل Q:** بما أنَّ عدد البروتونات يبقى ثابت أثناء تفاعل ما، يمكن أن نكتب أنَّ كل الكتل هي "كتل ذرية" ، إذا أهملنا طاقات ارتباط الإلكترونات التي هي من مرتبة بضعة إلكترون فولط.

يُعطى قانون انحفاظ الطاقة من أجل التفاعل المعطى بالعلاقة:

$$M_a c^2 + T_a + M_X c^2 = M_b c^2 + T_b + M_Y c^2 + T_Y$$

T تمثل الطاقة الحركية لكل جسيم، Mc^2 الطاقة الكامنة.

نعرّف حرارة التفاعل **Q** بأنها الفرق بين مجموع الطاقات السكونية للجسيمات قبل التفاعل وبعدهُ.

إذا كان لدينا التفاعل النووي التالي:

$$A_1 + A_2 \rightarrow \grave{A}_1 + \grave{A}_2 + \grave{A}_3 + \cdots \ldots \ldots$$

$$\Longrightarrow \mathrm{Q} = \sum_{i=1}^{2} m_i c^2 - \sum_{j=1}^{n} \grave{m}_j c^2$$

هنا نميز حالتين:

1- عندما تكون $Q > 0$ نقول أنَّ التفاعل ناشر للحرارة وبالتالي يحدث تحرير طاقة كما في التحولات المشعة.

2- عندما تكون $Q < 0$ نقول أنَّ التفاعل ماص للحرارة وبالتالي يجب تزويد التفاعل بالطاقة الحركية ليصبح حدوثه ممكناً، حيث تزوّد عادةً الجسيمات المقذوفة بطاقة حركية إضافية تسمح بحدوث التفاعل.

- **مفهوم طاقة العتبة:** تعرّف بأنها الطاقة الحركية الصغرى التي يجب أن نزود بها تفاعلاً ماصاً للحرارة $Q < 0$ ليصبح حدوثه ممكناً. وتعرّف طاقة العتبة في نظام إحداثيات مركز الكتل بأنها الطاقة المساوية لحرارة التفاعل والمعاكسة لها بالإشارة، أي أنَّ: $(T_{c.m})_s = -Q$

أمّا في النظام المخبري حيث يكون الهدف في حالة السكون قبيل التفاعل، تُعطى عبارة طاقة العتبة:

$$(T_L)_s = \frac{m_1 + m_2}{m_2}(T_{c.m})_s = -\frac{m_1 + m_2}{m_2}Q$$

m_1 الكتلة السكونية للمقذوف، m_2 الكتلة السكونية للهدف. نلاحظ أنَّ طاقة العتبة في نظام المخبر أكبر منها في نظام مركز الكتل. نشير أخيراً إلى أنَّ عبارة طاقة العتبة في نظام المخبر صحيحة عندما تكون النواة الناتجة عن عملية التصادم في سويتها الأساسية، أما عندما تكون هذه النواة في إحدى سوياتها المهيجة أو المحرضة فيجب إضافة حدّ يعبَر عن طاقة تهيج النواة الناتجة عن التصادم (W) :

$$(T_L)_s = \frac{m_1 + m_2}{m_2}(-Q + \mathrm{W})$$

ملاحظة هامة: عندما نقول أنَّ الدراسة تتم بالنسبة لإحداثيات مركز الكتل ونرمز لها بـ c.m هذا يعني أنَّ جملة الإحداثيات موجودة في مركز كتلة الجملة، أما في جملة إحداثيات المخبر فعادةً يكون أحد الجسيمين متحرك والآخر ساكن وكذلك مبدأ إحداثيات الجملة التي تتم الدراسة بالنسبة لها موجود بنقطة تواجد الجسيم الثاني.

مفهوم التصادمات النووية:

تخضع التصادمات النووية لقوانين انحفاظ الطاقة وكمية الحركة وتكون على نوعين: مرنة وغير مرنة.

يُدعى التصادم مرن إذا لم يطرأ على الطاقة الحركية الكلية تغير ملحوظ من جراء عملية التصادم (الطاقة الحركية وكمية الحركة محفوظة)، أما إذا رافق عملية التصادم امتصاص أو إشعاع للطاقة (أي ضياع للطاقة الحركية) يكون التصادم غير مرن.

مثال: لندرس تصادم مرن لجسيمين، حيث (حرارة التفاعل معدومة في التصادم المرن $Q = 0$) في التقريب اللانسبي، يمكن تمثيل عملية التصادم بين جسيم مقذوف كتلتهُ m_1 وسرعته V_1 ونواة كتلتها m_2 وسرعتها في حالة السكون $V_2 = 0$ في جملة إحداثيات المخبر. كما يبدو في الشكل التالي الذي يوضح أنَّ الجسيم المقذوف يتشتت بعد حصول الصدم في اتجاه يصنع زاوية $\acute{\theta}_1$ مع اتجاه وروده، وبسرعة $\acute{V}_1$ وتكتسب النواة الهدف سرعة $\acute{V}_2$ تجعلها تتشتت بزاوية $\acute{\theta}_2$.

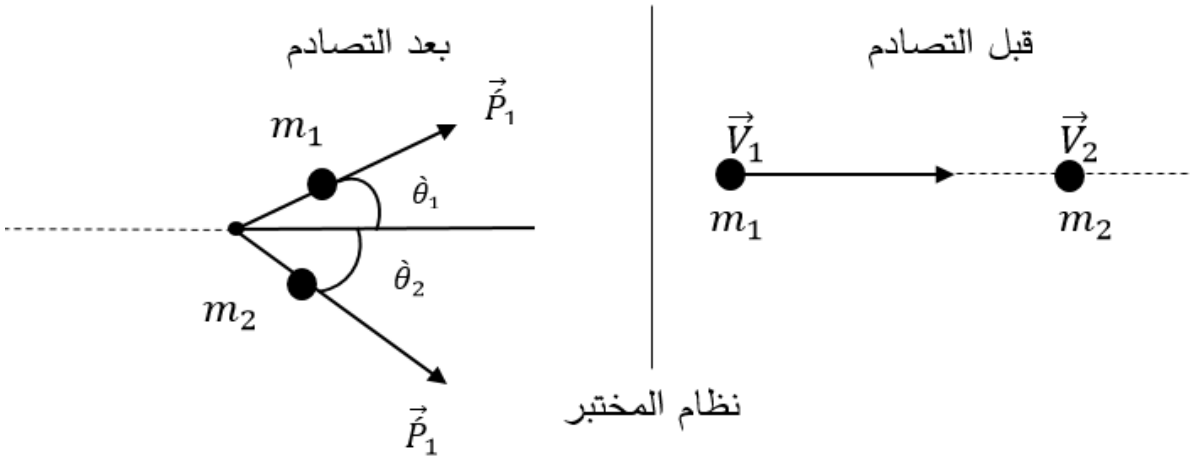
إنَّ قانون انحفاظ كمية الحركة يُكتب بالشكل التالي:

كمية الحركة قبل التصادم = كمية الحركة بعد التصادم

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 \qquad (1)$$

بما أنَّ الهدف في حالة سكون فإنَّ

$$V_2 = 0 \implies \vec{P}_2 = m_2\vec{V}_2 = 0$$



بإسقاط (*) على المحورين ox، oy على الترتيب، نجد:

$$m_1V_1 = m_1\dot{V}_1\cos\dot{\theta}_1 + m_2\dot{V}_2\cos\dot{\theta}_2 \qquad (2)$$

$$0 = m_1\dot{V}_1\sin\dot{\theta}_1 - m_2\dot{V}_2\sin\dot{\theta}_2 \qquad (3)$$

أما قانون مصونية الطاقة الحركية للجملة فيُكتب بالشكل التالي:

الطاقة الحركية قبل التصادم = الطاقة الحركية بعد التصادم

$$T_1 + T_2 = \acute{T}_1 + \acute{T}_2 \qquad (4)$$

$$\implies \frac{1}{2}m_1{V_1}^2 + 0 = \frac{1}{2}m_1{\dot{V}_1}^2 + \frac{1}{2}m_2{\dot{V}_2}^2 \qquad (5)$$

بالاستفادة من العلاقات السابقة وبإجراء مجموعة من العمليات الحسابنحصل على علاقة الطاقة الحركية للنواة بعد التصادم:

$$\acute{T}_2 = \frac{1}{2}m_2{\dot{V}_2}^2 = \frac{4m_1m_2}{(m_1+m_2)^2}.\left(\frac{1}{2}m_1{\dot{V}_1}^2\right)\cos^2\dot{\theta}_2 \qquad (6)$$

وسرعة الجسيم المقذوف بعد التصادم:

$$\acute{V}_1 = V_1\left[1 - \frac{4m_1m_2}{(m_1+m_2)^2}\cos^2\dot{\theta}_2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (7)$$

إنَّ النتائج التي حصلنا عليها صحيحة في جملة إحداثيات المختبر ويمكن أن تتم الدراسة باستخدام جملة إحداثيات مركز الكتل.

3 - **انحفاظ العزم الكلي والنوعية**:

يُفرض انحفاظ العزم الزاوي في التفاعل $X(a,b)Y$ بالصيغة التالية:

$$\vec{J}_a + \vec{J}_X + \vec{l}_{a,X} = \vec{J}_b + \vec{J}_Y + \vec{l}_{b,Y}$$

حيث: $\vec{J}$ العزم الزاوي الكلي لكل نواة، $\vec{l}$ العزم الزاوي المداري لكل زوج من الجسيمات.

أما انحفاظ النوعية يُفرض بالشكل التالي:

$$\pi_a \pi_X (-1)^{l_{a,X}} = \pi_b \pi_Y (-1)^{l_{b,Y}}$$

حيث π نوعية كل حالة نووية تتدخل في التفاعل.

تصنيف التفاعلات النووية:

تُصنف التفاعلات النووية وفق مايلي:

1- وفق الجسيمات المقذوفة.
2- وفق طاقة الجسيمات المقذوفة.
3- وفق نواة الهدف.
4- وفق نوى التفاعل.
5- وفق آلية أو ميكانيكية التفاعل.

أولاً: وفق الجسيمات المقذوفة:

- هناك تفاعلات نووية تتم مع جسيمات مشحونة يكون الوسيط فيها (البروتون p أو الديترون d أو جسيمات الفا α ، وأحياناً نوى ذرات الكربون C^{12}، و نوى ذرات الأوكسجين O^{16}) حيث يُطلق على التفاعل الذي يحدث مع الوسيطين الأخيرين بالتفاعلات مع الشوارد أو الأيونات الثقيلة.
- تفاعلات محرضة بواسطة النترونات.
- تفاعلات محرضة بفعل الإلكترونات.
- تفاعلات فوتونية بواسطة الفوتونات.

ثانياً: وفق طاقة الجسيمات المقذوفة:

- طاقات منخفضة تتراوح بين $(0.1 - 10)MeV$.
- طاقات متوسطة تتراوح بين $(10 - 200)MeV$.
- طاقات مرتفعة تزيد عن $(200)MeV$ تؤدي إلى توليد جسيمات جديدة.

ثالثاً: وفق نواة الهدف:

- نوى خفيفة إذا كان عددها الكتلي $A \leq 40$.
- نوى متوسطة الثقل إذا كان عددها الكتلي $40 < A < 150$
- نوى ثقيلة إذا كان عددها الكتلي $A \geq 150$.

رابعاً: وفق نوى التفاعل:

- **انتثار مرن:** يكون فيه الجسيم الناتج مماثلاً للجسيم المقذوف، وله نفس الطاقة في نظام مركز الكتل، أي أنَّ: $x + X \rightarrow x + X$ مثال:

$$p + {}^{14}_{7}N \rightarrow p + {}^{14}_{7}N$$

ويكتب باختصار: ${}^{14}_{7}N(p,p){}^{14}_{7}N$

- **انتثار لا مرن:** لا يوجد في هذا التفاعل تغيير في طبيعة الجسيمات الداخلة في التفاعل ولكن بنيتها وطاقتها يمكن أن تتغيرا، ويكتب على الشكل التالي: $x + X \rightarrow x + X^* + Q$ حيث Q فرق الطاقة بين الحالتين البدائية والنهائية، مثال:

$$d + {}^{39}K \rightarrow d + {}^{39}K^*$$

- **تفاعلات أسر:** يتم فيها أسر الجسيم المقذوف من قبل الهدف وتحرير الطاقة الزائدة بواسطة الفوتون: أي أنَّ: $x + X \rightarrow Z + \gamma + Q$ مثال:

$$p + {}^{14}N \rightarrow {}^{15}O + \gamma$$

- **تفاعلات فوتونية:** تمتص نواة الهدف خلال هذا التفاعل الفوتون المُحمل بالطاقة ويتحرر جسيم منها، أي أنَّ: $\gamma + X \rightarrow y + Y + Q$ مثال:

$$\gamma + {}^{14}N \rightarrow {}^{13}C + p$$

- **تفاعلات انشطارية:** تحدث عندما تكون نواة الهدف ثقيلة وينتج عن الانشطار نواتان متقاربتان في الكتلة، أي أنَّ: $x + X \rightarrow Y + Z + x.n + Q$ مثال انشطار نواة اليورانيوم−235:

$${}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow [{}^{235}_{92}U^*] \rightarrow {}^{143}_{56}Ba + {}^{90}_{36}Kr + 3{}^{1}_{0}n$$

وقد تكون النوى الناتجة عن الانشطار في السوية الأساسية أو في سوية مهيجة.

خامساً: وفق آلية أو ميكانيكية التفاعل: يمكننا التمييز بين الآليات التالية:

- النوى المركبة.
- تفاعلات مباشرة.
- تهيج أو تحريض كولوني.

تمرين: ليكن لدينا التفاعل النووي التالي:

$$^{23}_{11}Na + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{1}_{1}P + ^{23}_{10}Ne$$

إذا كانت نواة الصوديوم في سويتها الأساسية غير المهيجة، المطلوب: احسب E_Q ثم احسب طاقة العتبة في نظام المختبر مع العلم أنَّ: $m_{Na} = 22.98977\ amu\ , m_n = 1.008665\ amu,$

$$m_{Ne} = 22.99447\ amu\ , m_p = 1.007825\ amu$$

الحل:

$$E_Q = Q = (E_{Na} + E_n) - \left(E_p - E_{Ne}\right) = \left(m_{Na} + m_n - m_p - m_{Ne}\right).c^2$$
$$= (22.98977 + 1.008665\ - 1.007825 - 22.99447).931.48 = -3.59MeV$$

حيث: $E_{amu} = m_{amu}c^2 = 931.48MeV$

نلاحظ أنَّ الطاقة سالبة أي أنَّ التفاعل ماص للحرارة.

لإيجاد طاقة العتبة في نظام المختبر للنواة في سويتها الأساسية غير المهيجة نكتب العلاقة التالية:

$$(T_L)_s = \frac{m_1 + m_2}{m_2}(-Q) = \frac{m_n + m_{Na}}{m_{Na}}(-Q)$$

حيث m_1 و m_2: الكتلة السكونية للمقذوف، الكتلة السكونية للهدف على الترتيب.

$$\Longrightarrow (T_L)_s = -\frac{m_n + m_{Na}}{m_{Na}}Q = -\frac{1.008665 + 22.98977}{22.98977}(-3.59) = 3.762MeV$$

❖ الآن إذا كانت النواة مهيجة وكانت طاقة التهيج تساوي $W = 1.7MeV$ أوجد طاقة العتبة في نظام المختبر؟

$$(T_L)_s = \frac{m_1 + m_2}{m_2}(-Q + \mathrm{W}) = \frac{m_n + m_{Na}}{m_{Na}}(-Q + \mathrm{W}) =$$
$$= \frac{1.008665 + 22.98977}{22.98977}(3.59 + 1.7) = 1.0438745(5.29) = 5.522MeV$$

تمرين: ليكن لدينا التفاعل النووي التالي: $^{150}_{62}Sm(p,\alpha)^{147}_{61}Pm$

$$^{150}_{62}Sm + ^{1}_{1}P \rightarrow \alpha + ^{147}_{61}Pm$$

إذا كانت نواة السماريوم في سويتها الأساسية غير المهيجة، المطلوب: احسب Q ثم احسب طاقة العتبة في نظام المختبر مع العلم أنَّ: $m_{Sm} = 149.917276\ amu\ , m_{\alpha} = 4.002603\ amu,$

$$m_{Pm} = 146.915108\ amu\ , m_{p} = 1.007825\ amu$$

الحل:

$$\begin{aligned} Q &= \left(E_{Sm} + m_p - m_{\alpha} - m_{Pm}\right).c^2 \\ &= (149.917276 + 1.007825 - 4.002603 - 146.915108\ ).931.48 \\ &= 6.8836372MeV \end{aligned}$$

حيث: $E_{amu} = m_{amu}c^2 = 931.48MeV$

نلاحظ أنَّ الطاقة موجبة أي أنَّ التفاعل ناشر للحرارة.

لإيجاد طاقة العتبة في نظام المختبر للنواة في سويتها الأساسية غير المهيجة نكتب العلاقة التالية:

$$(T_L)_s = \frac{m_1 + m_2}{m_2}(-Q) = \frac{m_p + m_{Sm}}{m_{Sm}}(-Q)$$

حيث m_1 و m_2: الكتلة السكونية للمقذوف، الكتلة السكونية للهدف على الترتيب.

$$\begin{aligned} \Longrightarrow (T_L)_s &= \frac{m_p + m_{Sm}}{m_{Sm}}(-Q) = \frac{1.007825 + 149.917276}{149.917276}(-6.8836372) \\ &= -6.9299MeV \end{aligned}$$

❖ الآن إذا كانت النواة مهيجة وكانت طاقة التهيج تساوي $W = 1.7MeV$ أوجد طاقة العتبة في نظام المختبر؟

$$\begin{aligned} (T_L)_s = \frac{m_1 + m_2}{m_2}(-Q + \mathrm{W}) &= \frac{m_p + m_{Sm}}{m_{Sm}}(-Q + \mathrm{W}) = \\ &= \frac{1.007825 + 149.917276}{149.917276}(-6.8836372 + 1.7) \\ &= 1.00672254(-5.1836) = -5.21848MeV \end{aligned}$$

مكتبة A to Z