كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الثالثة

المادة : نووية١

المحاضرة : الخامسة/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

2025

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

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

آلية التفاعلات النووية

مقدمة:

تُقسم التفاعلات النووية من حيث آلية التفاعل الى نوعين:

1-تفاعلات النواة المركبة.

2-التفاعلات النووية المباشرة.

أولاً-التفاعلات النووية ذات النواة المركبة:

من خلال مراقبة نواتج التفاعلات النووية المختلفة مع تغيير مدخلاتها من النوى الهدف والجسيم القذيفة وكذلك طاقته الحركية تبين أن هناك العديد من التفاعلات المشتركة بين المدخلات ولكن النواتج كانت متنوعة ومختلفة عن بعضها. مما جعل العالم بور يقترح في عام 1936 نظرية النواة المركبة لتفسير كيفية حدوث التفاعل، وتقديم تفسير للنواتج المتباينة للتفاعلات المشتركة بين المدخلات.

وقد اعتمد بور على فرضيتين في نظريته لتفسير ما يحدث في التفاعل النووي وهما:

1-عندما تقترب القذيفة من النواة الهدف تندمج مع مكوناتها لتشكيل نواة مركبة غير مستقرة.

2-تتفكك النواة المركبة بعد فترة وجيزة من الزمن وذلك بإصدار جسيم وحيد أو عدة جسيمات أو اشعة، وتتحول النواة بعد ذلك الى النواة الناتجة في نهاية التفاعل. $a + X \rightarrow C^* \rightarrow b + Y$ حيث a الجسيم القذيفة، X النواة الهدف، C^* النواة المركبة، b الجسيم الناتج، و Y النواة الناتجة.

والسؤال الذي يُطرح هنا هو: كم تبلغ الفترة الزمنية بين تكوين النواة المركبة وعملية التفكك؟

متوسط الفترة الزمنية تبلغ حوالي 1فمتوثانية $(10^{-15}s)$ وهذه الفترة بعيدة جداً عن قدرة الانسان على التقاطها اضافةً الى أن معظم الأجهزة النووية قد لاتستطيع التقاطها.

فمتى تشكلت النواة المركبة؟

نفترض أن الجسيم القذيفة هو نترون بطاقة حركية قدرها $1MeV$ على نواة كبيرة الحجم بنصف قطر يساوي *10 fm* ($10^{-14}m$). لنحسب الزمن الذي يستغرقه النترون في عبور النواة على مسار قطرها.

$$R = 2 \times 10^{-14}m$$

$$E_k = \frac{1}{2}m_n v_n^2 = 1\ MeV = 1.6 \times 10^{-13}J$$

$$m_n = 1.67 \times 10^{-27}Kg$$

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

$$\Longrightarrow t = \frac{R}{v_n} = \frac{2 \times 10^{-14}}{1.38 \times 10^7} = 1.45 \times 10^{-21}s$$

t هو الزمن الذي يستغرقه نترون بطاقة حركية $1MeV$ لعبور نواة بقطر كبير ويُسمى بالزمن النووي الطبيعي.

نلاحظ أن زمن التفكك يحدث بعد زمن صغير جداً بمقاييسنا ولكنه طويل جداً اذا ماقورن بزمن عبور القذيفة للنواة الهدف. وهكذا فان النواة المتشكلة بهذه الطريقة وبعد هذه الفترة الزمنية الطويلة جداً تكون قد نسيت كيفية التشكل وامتلكت صفات أخرى تبعاً للظروف الفيزيائية المحيطة بها ومن ثم فان النواتج المتشكلة عن هذه النواة ليست بالضرورة أن تكون واحدة في جميع الحالات أي بغض النظر عن الطريقة التي تكونت بها تلك النواة المركبة.

البراهين العملية على تلك النظرية عديدة وليست قاصرة على نوع محدد من النوى الهدف أو نوع محدد من الجسيمات القذيفة أو طاقتها. أي أن ما يطبق على النترون يمكن تطبيقه على البروتون أو أي جسيم آخر.

مثال: عند قذف نواة الألمنيوم ${}^{27}_{13}Al$ بالبروتونات المسرعة تتكون نواة مركبة هي نواة السيليكون التي تتفكك بعدة طرق كمايلي:

$$1 - {}^{27}_{13}Al + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{28}_{14}Si^* \rightarrow {}^{24}_{12}Mg + {}^{4}_{2}He$$

$$2 - {}^{27}_{13}Al + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{28}_{14}Si^* \rightarrow {}^{27}_{14}Si + {}^{1}_{0}n$$

$$3 - {}^{27}_{13}Al + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{28}_{14}Si^* \rightarrow {}^{24}_{11}Na + 3{}^{1}_{1}H + {}^{1}_{0}n$$

$$4 - {}^{27}_{13}Al + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{28}_{14}Si^* \rightarrow {}^{28}_{14}Si + \gamma$$

سؤال: ما هو سبب اثارة النواة الهدف بعد دخول الجسيم القذيفة فيها؟

نفترض أن النوى الهدف جميعها مستقرة قبل الاصطدام. الاستقرار يعني أن طاقة الترابط النووي كافية وتمنع تفكك النواة (هذا يعني أن ثابت التفكك $\lambda = 0$ وعمر النصف يبلغ ما لانهاية).

عند دخول القذيفة للنواة يتزايد مقدار الطاقة الداخلية للنواة المركبة الناتجة بمقدار يتكون من قسمين: a- طاقة حركة الجسيم الساقط + b- طاقة ربط النواة للقذيفة (و هو ينتج عن تناقص كتلة القذيفة).

وهذا المقدار من الزيادة في الطاقة الداخلية للنواة كافي في جميع الحالات لإثارة النواة الجديدة.

مثال: احسب طاقة الاثارة في النواة الناتجة عن تفاعل نترون طاقته الحركيه $1MeV$ مع نواة نظير الألمنيوم $^{27}_{13}Al$.

$$^{1}_{0}n + {}^{27}_{13}Al \longrightarrow {}^{28}_{13}Al^{*}$$

$$m^{27}_{13}Al = 26.99008\,u,\;\; m^{1}_{0}n = 1.00898\,u,\;\; m^{28}_{13}Al = 27.99077\,u$$

ان الفرق في الكتل يساوي:$\Delta m = m_X + m_a - m_Y$

$$\Delta m = 26.99008 + 1.00898 - 27.99077 = 0.00829\,u$$

أي أن مقدار الكتل الداخلة في التفاعل قد تناقص بالمقدار Δm بعد تكوين النواة المركبة. وعند حساب مكافئ الطاقة لهذا الفرق في الكتل نجد:

$$\Delta mC^2 = 0.00829u \times 931.5 = 7.72\ MeV$$

وهذا المقدار من الطاقة يمثل مقدار طاقة الربط للقذيفة (النترون) في النواة الجديدة. وهو في نفس الوقت يمثل الجزء الأول من طاقة الاثارة أما الجزء الثاني فهو مقدار الطاقة الحركية للقذيفة قبل اصطدامه بالنواة الهدف وبالتالي فأن طاقة الاثارة الكلية هي: $E_{tot} = 7.72 + 1 = 8.72\ MeV$.

ان مصدر طاقة الاثارة هو النترون الذي اصطدم بالنواة الهدف، وحيث أنه متعادل الشحنة فهو يصطدم بمكونات النواة (البروتونات والنترونات المتواجدة في مساره) بواسطة الكتلة لأنه لا يملك مجال كهربائي. ونظراً لتقارب الكتل المتصادمة فأنه يتم نقل أكبر مقدار من الطاقة، أو يمكن أن نقول يتم إعادة توزيع الطاقة الزائدة بصورة عشوائية على مكونات النواة الهدف وهكذا نجد أن بعض النيكليونات يكتسب مزيداً من الطاقة أكثر من غيرها فاذا زاد مقدار الطاقة

المكتسبة عن قيمة حرجة تُسمى طاقة الفصل فأن النيكليون المكتسب لهذه الطاقة ينطلق بعيداً مغادراً النواة المركبة وهذه العملية تُسمى بتفكك النواة المركبة.

ملاحظة: متوسط طاقة الفصل للنيكليون (بروتون أو نترون) الواحد تساوي *8 MeV*.

زمن عبور النترون للنواة حوالي $10^{-21}s$ ويحدث تفكك للنواة بعد $10^{-15}s$. أي أن تفكك النواة يحدث بعد زمن يُكافئ مليون مرة زمن اختراق النترون للنواة $\frac{10^{-15}}{10^{-21}}$. وخلال هذا الزمن الصغير جداً بمقاييسنا والطويل جداً بمقياس الزمن النووي الطبيعي تحدث أحداثاً كثيرة ومهمة داخل النواة كرد فعل لدخول الجسيم الجديد اليها. حيث أنه لا تصدر عن النواة أي إشارات لما يحدث في داخلها، مثل انطلاق جسيمات أو أشعة غاما، لذلك نعتبر أن النواة خلال الزمن بين عبور النترون وتفكك النواة المركبة في حالة شبه استقرار (*Quasi Stationary*) وبعد ذلك تُعلن النواة عن عدم استقرارها اما بإصدار جسيمات أو أشعة غاما أو كلاهما تبعاً للحالة التي وصلت اليها.

حالة شبه الاستقرار لا تعني أن النواة المركبة مستقرة ولكن يحدث فيها تحولات داخلية من إعادة توزيع الطاقة الزائدة على مكوناتها وبالتالي فأن نكليونات النواة المركبة لا تمتلك جميعها نفس مقدار الطاقة ولذلك:

- تُسمى سويات الطاقة التي تؤدي الى اصدار نكليون أو أكثر من النواة المركبة بسويات الطاقة الافتراضية (*Virtual Energy Levels*).
- تُسمى سويات الطاقة التي تؤدي الى انبعاث أشعة غاما بالسويات المرتبطة (*Bound Energy Levels*).

أشعة غاما لا تنطلق الا بعد انبعاث الجسيمات أي أنها تُشكل المرحلة الأخيرة من عمر النواة المركبة، وهكذا نستنتج أن:

- عدد السويات الافتراضية كبير جداً إذا ما قورن بعدد السويات المرتبطة. والسبب يرجع الى أن تصادم النترون أو البروتون أو أي جسيم آخر مع النواة الهدف يُحدث موجة أو موجات من الاهتزاز لمكونات النواة وربما للنواة ككل. هذه الموجات من الاهتزاز تُكافئ إعادة توزيع الطاقة الزائدة على مكونات النواة المركبة.
- احتمال حدوث تفاعل نووي بين الجسيم القذيفة والنواة الهدف يعتمد على مجموع طاقتي القذيفة والنواة اضافةً الى طبيعتهما الفيزيائية (خصائص كل منهما).
- وحيث أن أي قيمة احتمالية لها حد أدنى و حد أقصى فأن أقصى احتمال لحدوث التفاعل النووي يكافئ حدوث رنين نووي (*Nuclear Resonance*).

- ويتزايد احتمال تشكل النواة المركبة كلما اقترب مجموع طاقتي الجسيم القذيفة والنواة الهدف من طاقة الاثارة لأحد السويات الطاقية الافتراضية. فاذا تساوى مجموع الطاقة مع طاقة سوية افتراضية يحدث الرنين النووي، ويصل احتمال تشكل النواة المركبة الى ذروته أي أن المقطع العرضي للتفاعل يكون أكبر ما يمكن.
- وعلى النقيض من ذلك، كلما ابتعد مجموع الطاقة عن طاقة السوية الافتراضية كلما انخفض احتمال حدوث التفاعل النووي وتشكل النواة المركبة.

ثانياً-التفاعلات النووية المباشرة:

الزمن النووي الطبيعي هو زمن عبور القذيفة لقطر نواة الهدف، وقد لاحظنا أن عمر النواة المركبة أكبر بكثير من الزمن النووي الطبيعي ولذلك تختلف نتائج التفاعل.
اذا كانت طاقة القذيفة عالية جداً (*50 MeV*) فأن زمن حدوث تفاعل مع مكونات النواة يتناقص بسبب السرعة العالية للقذيفة، وهذا يؤثر على طبيعة نتائج التفاعل. من ناحية أخرى إذا كانت القذيفة مكونة من عدة نكليونات وأن طاقة الترابط النووي لها صغيرة، فأن احتمال تفكك القذيفة نتيجة التفاعل يتزايد مما يؤثر أيضاً على نتائج التفاعل.
نقول عن التفاعل النووي أنه مباشر إذا كان عمر النواة المركبة (ان تشكلت) أصغر من الزمن النووي الطبيعي. من أمثلة ذلك:
- التشتت غير المرن، - تشتت تبادل الشحنات، - تفاعلات الالتقاط، - تفاعلات الانخلاع، - تفاعلات ينتج عنها دوران وتذبذب للنواة الهدف.

a) تفاعلات التشتت غير المرن *(n,n), (p,p)*: يحدث اذا كانت القذيفة هي بروتون أو نترون ذو طاقة عالية جداً وعند اصطدامه بأحد مكونات النواة يفقد جزء من طاقته وينطلق بالجزء المتبقي. احتمال حدوث هذا النوع من التفاعلات النووية يتزايد كلما زادت طاقة القذيفة عن *50 MeV*. ومن المتوقع أن يحدث هذا النوع من التفاعل على سطح النواة وليس في عمقها لأن الجسيم القذيفة هو الذي يخرج ولكن بطاقة أقل.
b) تشتت تبادل الشحنات *(n,p), (p,n)*: هنا الجسيم القذيفة لا يخرج نفسه من التفاعل ولكن يخرج جسيم آخر. فاذا كان القذيفة نترون فأن الجسيم الناتج يكون بروتون، وإذا كان القذيفة بروتون فأن الجسيم الناتج يكون نترون. وكأن الجسيم القذيفة قد تبادل أحد الميزونات مع النواة وخرج بخصائص جديدة.
c) تفاعلات الالتقاط *(p,d), (n,d)*: هنا يلتقط الجسيم القذيفة على النواة نكليون مغاير له من سطح النواة ويخرجا معاً مشكلين نواة الديتريوم. تحدث عملية الالتقاط غالباً على سطح النواة. طاقة ترابط النكليون الملتقط أقل من *2.226 MeV*.

d) تفاعلات الانخلاع *(d,p), (d,n)*: على النقيض من تفاعلات الالتقاط فأن الجسيم القذيفة يكون هو الديتريوم المكون من بروتون ونترون، وحيث أن طاقة الترابط النووي له ضعيفة فأن اصطدام الديتريوم بنواة الهدف يجعله يفقد أحد مكوناته بينما يستمر النكليون الآخر في طريقه كناتج للتفاعل. وهذا يعني أن طاقة الترابط لأحد نكليونات الديتريوم مع النواة الهدف تكون أكبر من *2.226 MeV*.

e) تفاعلات تذبذب ودوران النواة الهدف: في هذا النوع من التفاعلات لا يخترق الجسيم القذيفة النواة الهدف بل يقترب منها فقط، ونتيجةً لذلك يحدث رد فعل في النواة الهدف كلها مثل حدوث دوران أو ذبذبة. فمثلاً عندما يقترب بروتون أو جسيم ألفا من نواة هدف مسافة أكبر من نصف قطرها، أو عندما يقترب بروتون بطاقة منخفضة مسافة أصغر من نصف قطر النواة الهدف، ففي هذه الحالات يتفاعل المجال الكهربائي للجسيم القذيفة (بروتون أو جسيم ألفا) مع المجال الكهربائي لنواة الهدف مما يدفعها بعيداً عن موضعها الأصلي ثم تعود اليه بعد ابتعاد القذيفة أو يُحدث للنواة الهدف دوران تحت تأثير عدم تجانس المجال الكهربائي في المسافة الفاصلة بينها وبين القذيفة.

تصنيف التفاعلات النووية

أكثر أنواع التفاعلات النووية حدوثاً هو توجيه الجسيم القذيفة تجاه النواة الهدف ولذلك يمكن تقسيم التفاعلات على أساس ثلاث متغيرات:

- نوع الجسيم القذيفة، - طاقة القذيفة، - العدد الكتلي للنواة الهدف.

a) تصنيف التفاعلات النووية على أساس نوع القذيفة: القذيفة ممكن أن تكون أشعة غاما (فوتونات) وتُسمى بتفاعلات مستحثة بأشعة غاما (بالفوتونات)، أو يمكن أن تكون جسيم مثل البروتون، النترون، و الديترون فتسمى التفاعلات النووية بالتفاعلات المستحثة بالبروتونات أو النترونات أو الديترونات.

b) تصنيف التفاعلات النووية على أساس طاقة القذيفة: يمكن تقسيم التفاعلات حسب طاقة القذيفة الى المجالات التالية:

تفاعلات منخفضة الطاقة	$1000\ eV > E > 0$
تفاعلات متوسطة الطاقة	$500\ KeV > E > 1\ KeV$
تفاعلات عالية الطاقة	$10\ MeV > E > 0.5\ MeV$
تفاعلات الطاقة العالية جداً	$50\ MeV > E > 10\ MeV$
تفاعلات الطاقة فوق العالية	$E > 50\ MeV$

C) تصنيف التفاعلات على أساس العدد الكتلي لنواة الهدف:

تفاعلات النوى الخفيفة	$25 > A > 1$
تفاعلات النوى المتوسطة	$80 > A > 25$
تفاعلات النوى الثقيلة	$250 > A > 80$

أمثلة عن التفاعلات النووية حسب نوع القذيفة:

1- تفاعلات مُستحثة بواسطة أشعة غاما (الفوتونات):

$$^{16}_{8}O + \gamma \rightarrow {}^{15}_{8}O + {}^{1}_{0}n, \qquad {}^{16}_{8}O(\gamma, {}^{1}_{0}n){}^{15}_{8}O$$

$$^{27}_{13}Al + \gamma \rightarrow {}^{25}_{11}Na + 2{}^{1}_{1}p \ , \ {}^{27}_{13}Al(\gamma, 2{}^{1}_{1}p){}^{25}_{11}Na$$

2- تفاعلات مُستحثة بالبروتونات:

$$^{27}_{13}Al + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{28}_{14}Si + \gamma, \qquad {}^{27}_{13}Al(p,\gamma){}^{28}_{14}Si$$

$$^{27}_{13}Al + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{24}_{12}Mg + {}^{4}_{2}He, \qquad {}^{27}_{13}Al(p,\alpha){}^{24}_{12}Mg$$

$$^{27}_{13}Al + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{24}_{11}Na + 3{}^{1}_{1}H + {}^{1}_{0}n, \quad {}^{27}_{13}Al(p,3p,n){}^{24}_{11}Na$$

$$^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{8}_{4}Be + \gamma, \qquad {}^{7}_{3}Li(p,\gamma){}^{8}_{4}Be$$

ويُعتبر صدم نوى الليثيوم بالبروتونات من أهم مصادر أشعة غاما، حيث أنه عند استخدام بروتونات بطاقة *0.77 MeV* فأننا نحصل على أشعة غاما بطاقة *17.2 MeV* وهي أعلى طاقة يمكن الحصول عليها في هذا النوع من التفاعل حيث يتحقق التفاعل بأكبر احتمال ممكن أي أكبر مقطع عرضي للتفاعل.

3- تفاعلات مستحثة بالنترونات: تعتمد هذه التفاعلات على طاقة النترون والوزن الذري لنواة الهدف.

$$^{27}_{13}Al + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{28}_{13}Al + \gamma, \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots {}^{27}_{13}Al({}^{1}_{0}n,\gamma){}^{28}_{13}Al$$

ومن أجل طاقة للنترون أكبر من *10 MeV* فأن التفاعل سينتج عنه جسيمات متعددة مثل: $(n,2n)$, $(n,3n)$

4- تفاعلات مُستحثة بالديترونات (الديتريوم) $^{2}_{1}H$:

كل التفاعلات المستحثة بالديترونات هي من النوع المباشر ولا تنتمي الى تفاعلات النواة المركبة.

$$^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n + Q$$

$$^{37}_{17}Cl + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{35}_{16}S + {}^{4}_{2}He + Q$$

5- تفاعلات مُستحثة بجسيمات ألفا:

هي أقدم التفاعلات النووية المعروفة وذلك لتوفر مصدرها الطبيعي وهي باعثات ألفا من المواد المشعة الطبيعية، من أشهرها:

$$^{9}_{4}Be + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{1}_{0}n$$

وكان هذا التفاعل سبباً في اكتشاف النترون، نظراً للاختلاف بين النوى الداخلة والناتجة فقد كان متوقعاً أن تكون النواتج هي $^{13}_{6}C + \gamma$ ، ولكن بحساب طاقة التفاعل تبين أن كل الاحتمالات مرفوضة ماعدا أن ينتج جسيم ذو كتلة تساوي تقريباً كتلة البروتون ولكنه معتدل الشحنة وكان هو النترون. ويُعتبر هذا التفاعل مصدراً جيداً للنترونات وخاصةً أنه لا يتطلب تجهيزات معقدة. كما يمكن الحصول على مزيد من النترونات عند تفاعل جسيمات ألفا مع نواة *Indium* ($^{115}_{49}In$) حيث يزداد عدد النترونات الناتجة بازدياد طاقة جسيمات ألفا المستخدمة كقذيفة.

$$^{115}_{49}In(\alpha, 3n)^{116}_{51}Sb, \quad ^{115}_{49}In(\alpha, 2n)^{117}_{51}Sb, \quad ^{115}_{49}In(\alpha, n)^{118}_{51}Sb$$

$_{51}Sb$ هي نواة *Antimony*.

6- التفاعلات المستحثة بواسطة النوى: هذا النوع من التفاعلات لم يكن ليحدث من دون التطور الهائل للمسرعات النووية، وبالتالي فأن النوى تكتسب في هذه الحالة مقدار كبير من الطاقة تتغلب بها على قوة التنافر الشديد بين النواتين (الهدف والقذيفة) عند اقترابهما من بعض. كل النوى الخفيفة وبعض النوى المتوسطة تدخل في هذا السياق لتكون قذائف مسرعة، بينما النوى الهدف فتكون غالباً اما متوسطة أو نوى ثقيلة. مثال1:

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

حيث $^{26}_{12}Mg$ هي النواة الهدف و $^{14}_{7}N$ هو الجسيم القذيفة. النواة الناتجة تمتص نتروناً من $^{14}_{7}N$ وتتشكل $^{27}_{12}Mg$.

مثال2:

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

في هذا التفاعل حدث تحول كبير باختفاء الجسيم القذيفة $^{14}_{7}N$ والنواة الهدف $^{27}_{13}Al$ و ظهور نواتين جديتين $^{27}_{12}Mg$ ، $^{14}_{8}O$.

وهناك تفاعلات تتسم بالتعقيد وفيها يتم تبادل عدد أكبر من النكليونات في التفاعل الواحد مثل (*2p, 3n*)، ولا يحدث ذلك الا إذا كانت نواة الهدف كبيرة ومن ثم فأن النواة المركبة الناتجة من التفاعل تكون مثارة ويحدث تفكك لها في زمن قصير جداً.

مكتبة A to Z