

الخواص الأساسية للنواة وتركيب النواة

أجزاء النواة : تتركب النواة من البروتونات والنيوترونات ويسمى كلا من البروتون والنيوترون بالنوية (nucleon) .

يرمز لعدد البروتونات بالرمز Z (ويسمى العدد الذري) ، ولعدد النيوترونات بالرمز N ، ومجموعهما يساوي العدد الكتلي A ، أي أن $A = Z + N$.

تبلغ كتلة البروتون $m_p = 1.00727u$ ، و كتلة النيوترون $m_n = 1.00866u$ ، حيث أن $u \cong 1.66 \times 10^{-27}kg$ وحدة الكتل الذرية .

يبلغ نصف قطر أي من البروتون أو النيوترون حوالي واحد فيرمي 1 Fermi ، حيث $1 \text{ F} = 10^{-15} \text{ m}$ (فيرمي) .

النوية (Nuclide) : يطلق على نواة عنصر معين بعدد ذري Z وعدد كتلي A .

النظائر (Isotopes) : هي نوى لها نفس العدد الذري Z وتختلف في عدد النيوترونات N (وكذلك بالعدد الكتلي A) ، ولذلك فهي تتبع نفس العنصر وتتشابه بالخواص الكيميائية . والجدول التالي يوضح بعض النظائر .

العدد الذري	الرمز	اسم العنصر	العدد الكتلي A	الوزن الذري	الوفرة %
١	^1H	الهيدروجين	١	١.٠٠٧٨٢٥	٩٩.٩٨٥
١	^2H	الديوترون	٢	٢.٠١٤١٠٢	٠.٠١٥
١	^3H	التريتيوم	٣	٣.٠١٦٠٥	—————
٦	^{12}C	الكربون	١٢	١٢.٠٠	٩٨.٩٨٣
٦	^{13}C	الكربون	١٣	١٣.٠٠٣٣	١.١٠٧
٣٠	^{64}Zn	الزنك	٦٤	٦٣.٩٢٩١٤	٤٨.٨٩
٣٠	^{66}Zn	الزنك	٦٦	٦٥.٩٢٦٠٥	٢٧.٨١
٣٠	^{67}Zn	الزنك	٦٧	٦٦.٩٢١٥	٤.١١
٣٠	^{68}Zn	الزنك	٦٨	٦٧.٩٢٤٨٦	١٨.٥٦
٣٠	^{70}Zn	الزنك	٧٠	٦٩.٩٢٥٣٥	٠.٦٢

النظائر الكتلية (Isobars - الأيزوبارات) : وهي نويدات لها نفس العدد الكتلي A وتختلف في عدد البروتونات Z ، وبالتالي تتبع عناصر مختلفة ومثالها $^{36}_{16}S$ ، $^{36}_{18}Ar$ وكذلك $^{37}_{16}S$ ، $^{37}_{17}Cl$.

النظائر النيوترونية (Isotones) : وهي نويدات لها نفس العدد من البروتونات N و لكن تختلف في عدد البروتونات Z ، وبالتالي في العدد الكتلي A وهي ترجع إلى عناصر مختلفة ، ومثالها $^{39}_{19}K$ ، $^{37}_{17}Cl$.

النويدات شبه المستقرة (المتهيجة) Isomers - الأيزوميرات :

وهي نويدات بحالة متهيجة ذات زمن تحلل يمكن قياسه تجريبياً (بعمر نصفي أكبر من 10^{-9}) ، ومثالها $^{87}_{38}Sr^*$ بعمر نصفي 2.8 h وهي تعتبر نويدة بحالة متهيجة بالمقارنة مع $^{87}_{38}Sr$ في حالتها الأرضية المستقرة .

كتلة وطاقة السكون : استناداً لقانون التكافؤ بين الطاقة والكتلة لأينشتاين $E = mc^2$ ، فإنه يمكن تقدير الكتلة بوحدات الطاقة والطاقة بوحدات الكتلة .

فعند تحويل الكتلة بوحد الكيلوغرام (kg) إلى طاقة بوحد الجول (J) نضرب بـ C^2 (مربع سرعة الضوء) . وعند تحويل الكتلة بوحد الكتل الذرية (u) إلى طاقة بوحد MeV نضرب بالمقدار 931.48 (أي أن $1u = 931.48 \text{ MeV}$) .

$$E_{oe} = 0.511 \text{ MeV} \quad m_{oe} = 5.486 \times 10^{-4} \text{ u} \quad \text{الإلكترون :}$$

$$E_{op} = 938.26 \text{ MeV} \quad m_{op} = 1.00727 \text{ u} \quad \text{البروتون :}$$

$$E_{on} = 939.55 \text{ MeV} \quad m_{on} = 1.008665 \text{ u} \quad \text{النيوترون :}$$

نظرية الكوارك : يعتقد الآن أن كلا من البروتون والنيوترون ليست جسيمات أولية بل تتألف من جسيمات تسمى بالكوارك (Quarks) وأهمها الثلاثة الآتية :

اسم الكوارك	الرمز	الشحنة	طاقة السكون MeV
up	u	$-\frac{1}{3} e$	٣٠٠
down	d	$+\frac{2}{3} e$	٣٠٠
strange	s	$-\frac{1}{3} e$	٥٠٠

نصف قطر النواة : من الصعب الحصول على تصور دقيق لأبعاد النواة ، وذلك لكون الجسيمات الداخلة في تركيب النواة تخضع في حركتها لقوانين ميكانيكا الكم والذي يعتمد مبدأ عدم التحديد لهايزنبرك أحد أساسياته ، وكذلك لا يبدو سطح النواة محدداً . ومع ذلك جرت محاولات كثيرة لإيجاد نصف قطر النواة بناءً على بعض الإفتراضات والنتائج العملية .

ومن أول الطرق المستخدمة لإيجاد نصف قطر النواة هي طريقة رذرفورد في تشتت جسيمات ألفا (α) واستخدام الميكانيكا التقليدية في الحسابات . و خطوات هذه التجربة تتلخص بالآتي :

تجربة رذرفورد لتحديد نصف القطر للنواة :

يتم قذف شريحة رقيقة جداً من الذهب أو الفضة بجسيمات ألفا ، وبزيادة طاقة جسيمات ألفا تدريجياً وقياس عدد الجسيمات المتشتتة عند زوايا إرتداد كبيرة (في حدود ١٨٠) عند كل طاقة يمكن حساب أقصر مسافة إقتراب D من النواة ، والتي يكون عندها جسيم ألفا (α) قد أقترب من النواة إلى أقل مسافة ممكنة ثم إرتد بعد أن توقف فترة

$$\frac{1}{2} m_{\alpha} v_{\alpha}^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{D}$$

حيث Ze شحنة نواة الهدف ، $2e$ شحنة جسيم ألفا ، ومنها يمكن حساب المسافة D :

$$D = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4Ze^2}{m_{\alpha} v_{\alpha}^2}$$

وبالتعويض عن $m_{\alpha} \cong 6 \times 10^{-27} \text{kg}$ ، $v_{\alpha} = 10^7 \text{m/s}$ ،

$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ، $Z = 79$ في حالة الذهب نحصل على $D \sim 3.2 \times 10^{-14} \text{m}$

فإذا تصورنا أن المسافة D تعبر عن نهاية قصوى لأبعاد النواة ، فإن نصف قطر النواة يجب أن يكون أقل من القيمة المحسوبة D .

لتحديد حجم النواة بصورة دقيقة لا بد من زيادة طاقة الجسيمات الساقطة لكي تتغلب على الحاجز الكولومي للنواة ، وبالتالي يمكن للجسيم الساقط التفاعل مع مكونات النواة حيث لا يصح في هذه الحالة تطبيق قانون كولوم ، وقد أمكن ذلك باستخدام المعجلات النووية المختلفة .

تركيب النواة (Structure of The Nucleus) :

الخصائص الأساسية للنواة :

أ- المحتويات ، الشحنة ، الكتلة ، الحجم : تتركب النواة من عدد Z بروتون و عدد N نيوترون ، يسمى Z بالعدد الذري ، بينما يسمى $A = Z + N$ بالعدد الكتلي . ولذلك فالنواة تحتوي على عدد A من النويات (nucleons) حيث النوية تمثل البروتون أو النيوترون . لأن البروتون له شحنة موجبة ($+1e$) والنيوترون متعادل ، لذا فكل نواة لها شحنة ($+Ze$) . وكتل البروتون والنيوترون هي :

$$m_p = 1.00727 \text{ u} = 938.256 \text{ MeV} \quad \text{كتلة البروتون}$$

$$m_n = 1.00867 \text{ u} = 939.550 \text{ MeV} \quad \text{كتلة النيوترون}$$

حيث u تمثل وحدة الكتل الذرية [$u \approx 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} = \frac{1}{12} \times M(^{12}\text{C})$] .

حيث $M(^{12}\text{C})$ هي كتلة نظير الكربون-12 .

عند تقريب مكونات النواة من بعضها لتكوين النواة ، فإن المجموع النهائي لكتلة

النواة الناتجة هي أقل من مجموع كتل مكوناتها بصورة منفصلة . هذا الفرق في الكتلة يتحول إلى طاقة تسمى الطاقة الرابطة (Binding Energy) وهي المسؤولة عن تماسك النويات مجتمعة في النواة .

نصف قطر النواة هو في حدود (10^{-15} m) بينما نصف قطر الذرة هو في حدود (10^{-10} m) ، وحجم الذرة هو غالباً ثابت بينما حجم النواة هو دالة لعدد النويات A في النواة . فإذا كان R هو نصف قطر النواة ، فإن :

$$R = r_0 A^{\frac{1}{3}} \approx 1.35 \times 10^{-13} A^{\frac{1}{3}} \text{ cm}$$

وقيمة r_0 تتراوح بين $1.2 \times 10^{-13} \text{ cm}$ و $1.48 \times 10^{-13} \text{ cm}$.

ب- الزخم الزاوي للنواة : لكل من البروتون والنيوترون لف ذاتي (spin) . والعدد الكمي المغزلي لهما يساوي $\left(\frac{1}{2}\right)$ ، والزخم الزاوي المغزلي $\left(\sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+1\right)} \hbar = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar\right)$.

وكل نوية في النواة (مثلما هو الحال بالنسبة للإلكترون) يفترض أن لها زخم زاوي مغزلي و زخم زاوي مداري . والجمع الإتجاهي للزخوم الزاوية لجميع النويات يعطينا الزخم الزاوي الكلي \vec{I} والذي يدعى بالزخم الزاوي للنواة ، و هو معطى بالعلاقة :

$$I = \sqrt{i(i+1)} \hbar$$

حيث أن i هو العدد الكمي النووي الكلي (ويدعى أيضاً باللف أو البرم النووي) ، وهو يكون إما عدداً صحيحاً أو انصاف العدد الصحيح . ويمكن حساب i من العلاقة التالية :

$$l = \sum_l \bar{l}_l + \sum_l \bar{s}_l$$

حيث الحد الأول في العلاقة أعلاه يمثل محصلة الزخوم الزاوية المدارية ، بينما يمثل الحد الثاني محصلة الزخوم الزاوية المغزلية .

الزخم الزاوي النووي يبدي تكماً (أي يأخذ قيمة محددة في الفراغ) كما هو الحال للزخوم الزاوية الأخرى . وبالتالي فإن النواة ذات اللف i عندما توضع في مجال مغناطيسي خارجي ينتج لدينا عدد $(2i + 1)$ من الإتجاهات المختلفة ، بحيث أن مسقط متجه الزخم الزاوي على إتجاه المجال المغناطيسي يكون له أحد القيم التالية (بوحدات \hbar) :

$$m_i = i , i - 1 , i - 2 , \dots, 1 , 0 , -1 , \dots, -(i - 1) , -i$$

وقد أثبتت التجارب وجود علاقة قوية بين اللف النووي i والعدد الكتلي A للنواة .

$$i = 0 , 1 , 2 , 3 , 4 , \dots \leq \text{النواة ذات العدد الكتلي الزوجي}$$

$$i = \frac{1}{2} , \frac{3}{2} , \frac{5}{2} , \frac{7}{2} , \dots \leq \text{النواة ذات العدد الكتلي الفردي}$$

النوى ذات العدد الزوجي لكلا من Z و N (even-even nuclei) لها اللف $i = 0$.

ج- العزوم المغناطيسية للنواة : كما لاحظنا في الأطياف الذرية ، لدينا وحدة لقياس العزوم المغناطيسية . للذرات مغنيتون بور (*Boher magneton*) μ_B والتي تعطى بالعلاقة :

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 0.927 \times 10^{-23} \text{ J/T}$$

كذلك نعرف وحدة العزوم المغناطيسية النووية (nuclear magneton) بالعلاقة :

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = \frac{\mu_B}{1836} = 5.05 \times 10^{-27} \text{ J/T}$$

حيث $m_p \approx 1836 m_e$ كتلة البروتون .

أن القيمة المقاسة للعزوم المغناطيسية النووية هي بين $-3\mu_N$ و $+10\mu_N$.
 والإشارة الموجبة تعني أن العزم المغناطيسي للنواة هو بنفس الإتجاه للبرم (اللف)
 النووي (*nuclear spin*) ، والإشارة السالبة تعني أنه بعكس الإتجاه .
 وقد وجد تجريبياً أن القيم المقاسة للعزم المغناطيسي لكل من البروتون والنيوترون هي

$$\mu_{proton} = +2.79276 \mu_N$$

$$\mu_{neutron} = -1.91315 \mu_N$$

وهذه القيم تعني أن توزيع الشحنة لكل من البروتون والنيوترون معقد وغير منتظم .

د- القوى النووية :

تتميز القوى النووية بالآتي :

١- أنها أكثر جذباً و قوة من قوى الجذب الكولومية .

٢- القوة النووية قصيرة المدى جداً .

والقوى النووية التي بين النويات للنواة (أي بين البروتون والبروتون ، وبين النيوترون
 والنيوترون ، بين البروتون والنيوترون) لا بد أن تكون قوة جذب ، وإلا سوف لن
 نحصل على نوى مستقرة . كذلك فإن هذه القوى الجاذبة يجب أن تكون أكبر بكثير من
 قوى التنافر الكولومية ، وإلا لن نحصل على نوى ثقيلة مستقرة ، ذلك بسبب العدد الكبير
 الموجود من البروتونات الموجبة الشحنة .

عندما تجلب بروتوناً من مسافة بعيدة جداً (∞) إلى النواة ، فإن التغير في الجهد $V(r)$
 مع المسافة مبين بالشكل (١) ، حيث نلاحظ الآتي :

١- $r > R$ (حيث R نصف قطر النواة) ، القوة الوحيدة هي قوة كولوم وهي قوة
 تنافر تتغير مع $\left(\frac{1}{r^2}\right)$ ، بينما يتغير الجهد مع $\left(\frac{1}{r}\right)$ كما هو مبين بالشكل (١) .

٢- $r < R$ يبدأ البروتون بالإحساس بقوة الجذب للنواة ، وهي أقوى بكثير من قوة
 كولوم التنافرية ، ولذلك تمثل بجهد سالب .

٣- إن الشكل الدقيق للجهد بين 0 و R غير معروف ، ولكن يمثل بقيمة ثابتة $V(r) = -V_0$ ، تكون كافية لتفسير أغلب النتائج التجريبية .

أما عندما نجلب نيوترونات من مسافة بعيدة جداً (∞) إلى النواة ، فإن التغير في الجهد $V(r)$ مع المسافة r مبين بالشكل (٢) حيث نلاحظ الآتي :

١- $r > R$ ، $V(r) = 0$ لأنه لا يوجد قوة كولومية بين النيوترون والنواة .

٢- $r < R$ ، يمثل الجهد الناتج عن الإحساس بالقوة النووية بالمقدار الثابت $-V_0$.

القيم الخاصة بـ V_0 و R هي :

$$V_0 \approx -40 \text{ MeV}$$

$$R \approx 1.4 \times 10^{-13} A^{\frac{1}{2}} \text{ cm}$$

و كمثال عندما $A = 125$ ، فإن نصف قطر النواة هو $7 \times 10^{-13} \text{ cm}$.

الطاقة الرابطة للنواة (Binding Energy of Nucleus) :

يتم تكوين الذرة عندما نجمع سوياً Z بروتون مع $(A - Z)$ نيوترون و Z إلكترون . وقد وجد أن كتلة الذرة $M(A, Z)$ هي أقل من مجموع كتل مكوناتها في الحالة الحرة . هذا الفرق في الكتلة ΔM يُحوّل إلى طاقة (ΔE) ، وهي تعطى بالعلاقة :

$$\Delta E = \Delta MC^2 \quad (1)$$

وعندما نريد تفكيك الذرة إلى مكوناتها ، فإنه يجب أن نزود الذرة بمقدار مساوٍ لهذه الطاقة التي تسمى بالطاقة الرابطة ($BE = -\Delta E$) و هي تعطى بالعلاقة :

$$BE = [Zm_p + (A - Z)m_n + Zm_e - M(A, Z)]c^2 \quad (2)$$

وعند إهمال طاقة الربط البسيطة لذرة الهيدروجين ، نستبدل $m_H \rightarrow m_p + m_e$ ، حيث m_H كتلة الهيدروجين ، فنحصل على الآتي :
الطاقة الرابطة :

$$BE = [Zm_H + (A - Z)m_n - M(A, Z)]c^2 \quad (3)$$

الطاقة الرابطة لكل نوية :

$$BE/A = [Zm_H + (A - Z)m_n - M(A, Z)]c^2/A \quad (4)$$

مثال ١ : احسب الطاقة الناتجة من تحول وحدة الكتل الذرية ($1 u$) إلى

- (أ) طاقة بوحدة الجول (J) .
- (ب) طاقة بوحدة (MeV) .

$$\Delta E = \Delta M C^2 \quad (\text{الحل : أ})$$

$$\Delta M = 1.66043 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta E(J) = 1.66043 \times 10^{-27} \times (2.9979 \times 10^8)^2$$

$$\Delta E(J) = 1.4923 \times 10^{-10} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$1J = \frac{1}{1.602 \times 10^{-13}} \text{ MeV}$$

$$\Delta E(\text{MeV}) = 1.4923 \times 10^{-10} \times \frac{1}{1.602 \times 10^{-13}} \text{ MeV}$$

$$\Delta E(\text{MeV}) = 931.5 \text{ MeV}$$

في هذا المثال نجد أنه يمكن حساب الطاقة بوحدة (MeV) الناتجة عن تحول كتلة مقدارها (1 u) كالتالي :

$$931.5 \text{ MeV} = 1 \text{ u } C^2$$

$$1u = \frac{931.5}{C^2} \text{ MeV} \quad (5)$$

من المعادلتين (٣) و (٥) نجد أنه يمكن حساب الطاقة الرابطة بوحدة (MeV) عند حسابنا للكتلة بوحدة الكتلة الذرية (u) ، حسب العلاقة التالية :

$$BE(\text{MeV}) = \Delta M(u) \times C^2 \times 931.5 \frac{\text{MeV}}{C^2}$$

$$BE(\text{MeV}) = \Delta M(u) \times 931.5 \text{ MeV} \quad (6)$$

وكذلك نحسب الطاقة الرابطة لكل نوية بوحدة (MeV) بالعلاقة التالية :

$$\frac{BE(\text{MeV})}{A} = \frac{\Delta M(u) \times 931.5}{A} \text{ MeV} \quad (7)$$

مثال ٢ : الكتلة الذرية لنظير الرصاص $^{208}_{82}\text{Pb}$ هي $207.9766 u$ ، احسب الطاقة الرابطة لكل نوية لهذا النظير .

$$\text{الحل :} \quad \frac{BE(\text{MeV})}{A} = \frac{\Delta M(u) \times 931.5}{A} \text{ MeV}$$

$$\frac{BE(\text{MeV})}{A} = \frac{[Zm_H + (A - Z)m_n - M(A, Z)] \times 931.5}{A} \text{ MeV}$$

$$\frac{BE(\text{MeV})}{A} = \frac{[82 \times 1.007825 + (208 - 82) \times 1.008665 - 207.9766] \times 931.5}{208} \text{ MeV}$$

$$\frac{BE(\text{MeV})}{A} = 7.86 \text{ MeV}$$

الشكل (٣) يبين العلاقة بين الطاقة الرابطة لكل نوية (BE/A) والعدد الكتلي (A) ، حيث نلاحظ أن أغلب النوى (عدا ^4He ، ^{12}C ، ^{16}O) تقع على أو قرب المنحنى المرسوم ، و يمكن استنتاج الآتي من الرسم .

١- لقيم A المنخفضة ، فإن (BE/A) تكون منخفضة ، ولكنها تزداد بسرعة كبيرة كبيرة حتى نصل إلى قيمة $A = 20$.

٢- ليس هناك تغير كبير في قيم (BE/A) عندما تزداد A من ٢٠ إلى حوالي ١٦٠ .
ومتوسط (BE/A) في هذه المنطقة هو 8.5MeV .

٣- يبدأ المنحنى بالوصول لقيمته القصوى عند حوالي ($A = 50$) ، حيث

($BE/A = 8.8\text{MeV}$) . وهنا تصبح القوى النووية في حالة التشبع ، ويكون
المنحنى شبه أفقي بين $A = 50$ إلى $A = 80$.

٤- لقيم A العالية ($A > 100$) ، تنخفض قيمة (BE/A) بصورة تدريجية
مستمرة حتى نصل إلى اليورانيوم (^{238}U) حيث $A = 238$ و $BE/A = 8.8\text{MeV}$.

منحنى الإستقرار النووي :

إن أغلب النوى المعروفة حالياً هي غير مستقرة (مشعة) ويمكن تفسير ذلك بالجملة
من خلال دراسة محصلة التأثير عن القوتين الآتيتين :

١- قوى الجذب النووية : وهي القوى التي تكون بين النويات المكونة للنواة ، وهي
قوى عالية المقدار ولكنها ذات مدى قصير جداً .

٢- قوى التنافر الكهربائية : وهي التي تكون بين البروتونات الموجبة الشحنة ، وهي
أقل مقدراً من القوى النووية ولكنها ذات مدى طويل نسبياً .

وعند رسم العلاقة البيانية بين العدد الذري Z وعدد النيوترونات N نحصل على
منحنى كما في الشكل (٤) ، وفي هذا الشكل نلاحظ الآتي :

١- للنوى الخفيفة $Z < 20$: يكون عدد البروتونات مساوياً لعدد النيوترونات ، أي
أن النوى المستقرة تتجمع على الخط المستقيم $N = Z$ ، ويرجع ذلك إلى قرب النويات
من بعضها مما يجعل قوى الجذب النووي أقوى من قوى التنافر الكهربائية .

٢- بالنسبة لنوى العناصر $Z > 20$ ، فإن زيادة عدد النويات يؤدي إلى زيادة المسافة
بينها وبالتالي إضعاف قوى الجذب النووية مقارنة بقوى التنافر الكهربائي . ولذلك نجد
أنه للنوى الثقيلة تزداد قيمة N بدرجة أكبر من زيادة Z حتى نصل إلى نواة البزموت
 ^{209}Bi ، وهي أثقل نواة مستقرة لتصبح النسبة $N = 1.5 Z$.

