الكيمياء النووية والإشعاعية

Nuclear and Radiation Chemistry

تعرف الكيمياء النووية : بأنها التفاعلات التي تحدث نتيجة تغير في أنوية الذرات. ويهتم علم الكيمياء النووية بدراسة تركيب النواة وطبيعة الجسيمات الأساسية المكونة لها، وكيف يؤثر هذا التركيب على ثباتها، وبالتالي فهو العلم الذي يهتم بدراسة الظواهر التي تؤدي إلى تغير تركيب النواة سواء بعمليات الإشعاع الطبيعية .. أو بعمليات التغير الصناعية..

وقد أفادت أحدث النظريات في مجال الكيمياء النووية أن للنواة تركيب مكون من أغلفة طاقة بشكل يشبه التركيب الإلكتروني للذرة، وقد تم الاستدلال على هذه الحقائق من دراسة الظواهر المرتبطة بالإشعاع النووي.

علم الكيمياء الإشعاعية:-

فهو يعتبر أحد أهم التطبيقات التقنية لدراسة المواد المشعة، وما يمكن أن تحدثه من تغيرات كيمائية، والفرق الجوهري بين العمليات الكيميائية العادية وتلك التي تحدث بتأثير الإشعاعات النووية هو اننا في الحالة الأخيرة نتتبع أي تغير يحدث بالقياسات الخاصة بعمليات قياس الإشعاع.

اكتشاف ظاهرة الإشعاع النووي والمواد المشعة:-

بعد أن قدم راذرفورد تجربته الشهيرة لدراسة تأثير دقائق ألفا على صفائح المعادن، كان من أهم الاستنتاجات التي وضعها هي:

[١] أن الجسيمات موجبة الشحنة تتجمع في جزء صغير من الذرة وهو النواة،
[٢] تتجمع كتلة الذرة فى النواة.

أي أن تجربته وضعت التصور الأول للنموذج النووي لتركيب الذرة، حيث كانت هذه التجربة خطوة مهمة في تطوير هذا العلم.

الذرة :-

الذرة هي الوحدة الساسية التي تكون المادة. تتكون من جسيم صغير يسمى النواة ويحيط بالنواة جسيمات صغيرة تسمى الإلكترونات تدور حولها في مدارات معينة.

مكونات الذرة :

النواة : فيها تتمركز كتلة الذرة ويبلغ نصف قطرها حوالي 10^{-13} سم، في حين يصل نصف قطر الذرة حوالي 10^{-8} سم. والنواة بدورها تتركب من نوعين من الجسيمات المتناهية الصغر تعرف بالبروتونات والنيوترونات، ويعود تعادل الذرة إلى تساوي عدد البروتونات مع عدد الإلكترونات وإختلافهما في الشحنة.

البروتونات : البروتون عبارة عن جسيم صغير تبلغ كتلته $1.67x10^{-24}$ جم وهو أكبر من الإلكترون بحوالي ١٨٣٩ مرة وحمل شحنة كهربائية مساوية لشحنة الإلكترون ولكنها موجبة.

النيوترونات : النيوترون عبارة عن جسيم صغير متعادل الشحنة مساوي تقريبا للبروتون في الكتلة وغالبا يعتبر النيوترون عبارة عن إتحاد بروتون وإلكترون.

النيوكليونات : هو إسم يطلق على الجسيمات النووية، أي البروتونات والنيوترونات ومجموع عددها هو عدد الكتلة إذن فهو مسمى مشترك لكل من البروتون والنيوترون

العددالذري : هو عدد البروتونات ويساوي عدد الإلكترونات للذرة المتعادلة ويرمز له بالرمز Z ويعين العدد الذري الخصائص الكيميائية للذرة وبالتالي يحدد العنصر.

عدد الكتلة : هو مجموع أعداد البروتونات والنيوترونات المكونة لنواة أي عنصر وهو عدد صحيح ويرمز له بالرمز A.

النظائر : هي أشكال مختلفة من ذرات العنصر نفسه يكون لها نفس العدد من البروتونات (العدد الذري) ولكنها تختلف في عدد (عدد النيوترونات). ومن أمثلتها:

نظائر الكلور وهي	${}^{38}_{17}Cl$	${}^{37}_{17}Cl$	${}^{36}_{17}Cl$	${}^{35}_{17}Cl$	${}^{34}_{17}Cl$
نظائر اليورانيوم وهي	${}^{238}_{92}U$	${}^{235}_{92}U$	${}^{234}_{92}U$	${}^{233}_{92}U$	
نظائر الهيدروجين وهي	${}^{3}_{1}H$	${}^{2}_{1}H$	${}^{1}_{1}H$		
نظائر الصوديوم وهي	${}^{24}_{11}Na$	${}^{23}_{11}Na$	${}^{22}_{11}Na$		

الأيزوبارات Isobars	هي عناصر مختلفة لها نفس عدد الكتلة ولكنها تختلف في العدد الذري أي في عدد البروتونات. ومن أمثلتها: $^{14}_{6}C$, $^{14}_{7}N$ وكذلك $^{40}_{20}Ca$, $^{40}_{19}K$
أنوية المرآة	ويطلق اسم **أنوية المرآة** على زوج الأيزوبارات التي تختلف في قيم N و Z بمقدار الوحدة كما في الأمثلة الآتية: $^{13}_{7}N_6$, $^{13}_{6}C_7$ وكذلك $^{23}_{11}Na_{12}$, $^{23}_{12}Mg_{11}$
الأيزوتونات Isotones	: وهي عناصر مختلفة لها نفس عدد النيترونات. ومن أمثلتها: $^{23}_{11}Na_{12}$, $^{24}_{12}Mg_{12}$ وكذلك $^{83}_{40}Sr_{45}$, $^{85}_{40}Zr_{45}$
الأيزومرات Isomers	وهي أنوية لها نفس العدد الذري وعدد الكتلة (أي أن لها نفس العدد من النيترونات أيضا) ولكنها تختلف في مقدار الطاقة الداخلية التي تحملها أو بعبارة أخرى أنها تشغل مستويات طاقة مختلفة.

توصيف النواة الذرية

تحتوى النواة الذرية على عدد من البروتونات يساوى Z وعدد من النيترونات يساوى N حيث مجموع البروتونات والنيوترونات يسمى عدد الكتلة ويرمز له بالرمز A

$$A = N + Z$$

يرمز لاى عنصر كيميائى بالرمز X ويرمز لنواة ذلك العنصر بالرمز

$$(A, Z) \equiv X^A \leftrightarrow {}^{A}_{Z}X \leftrightarrow {}^{A}_{Z}X_N$$

النواة غير المستقرة في ترميزها النووي يضاف الحرف الصغير m بجانب عدد الكتلة إلى جهة اليمين. ومن أمثلتها:

$$^{60m}_{27}Co_{33}, \quad ^{60}_{27}Co$$

كتلة وحجم النواة (E_o) :-

نجد أن النواة تتكون من بروتونات ونيوترونات, فمن المتوقع أن تكون كتلتها تساوى مجموع كتل البروتونات والنيوترونات التى تكونها. (هذا التوقع غير صحيح) وذلك لأن هناك قوى جذب بين مكونات النواة أكبر من قوة التنافر داخلها والإ ما وجدت نواة وبالتالى لاتوجد أى ذرة فى هذا الكون.

هذا التفاعل ينتج من القوى النووية وهى لاتهتمد على الشحنة التى تحملها البروتونات ولذلك فقيمتها ثابتة بين البروتونات والبروتونات – البروتونات والنيوترونات- وكذلك بين النيوترونات والنيوترونات.

نظراً لصغر كتلة البروتون أو النيوترون $\approx 1.67\ X\ 10^{-27}$ كجم, فقد إتفق على إختيار وحدة جديدة للكتل الذرية تسمى " وحدة الكتلة الذرية (amu)" atomic mass unit وإتفق أيضاً على أنها تساوى $\frac{1}{12}$ من كتلة نظير الكربون $^{12}_{6}C$ أىأن نواة ذرة الكربون - ١٢ تزيد ١٢ وحدة كتلة ذرية.

مقارنة بالكيلو جرام فإن وحدة الكتلة الذرية تساوى $1.6555\ X\ 10^{-27}$ كجم وبالتالى يشار إلى كتل الجسيمات النووية والذرية بدلالة وحدة الكتلة الذرية كالاتى:-

كتلة البروتون	:	1.007277 amu	M_p
كتلة النيوترون	:	1.008665 amu	M_n
كتلة النيترون	:	0.000549 amu	M_e
كتلة نظير الهيدروجين $^{1}_{1}H$	:	1.007825 amu	$M(^{1}_{1}H)$

كم يبلغ حجم نواة الذرة؟

يعتمد حجم النواة على عدد البروتونات والنيوترونات التى تكونها. وحيث أن هذه المكونات من حيث المبدأ تتكور فى أصغر حيز فراغى, فيمكن تمثيل النواة بكرة نصف قطرها R وتحتوى على العدد الكتلى وبالتالى فإن التناسب بين حجم النواة $\frac{4}{3}\pi R^3$ والعدد الكتلى A يكون طردياً بمعنى

$$\frac{4}{3}\ \pi\ R^3\ \propto\ A$$

$$\therefore R\ \propto A^{\frac{1}{3}}$$

$$\therefore R = r_{\circ}A^{\frac{1}{3}}$$

تختلف قيمة الثابت $r_{\circ}$ من نواة عنصر لآخر ولكنها فى المتوسط تساوى فى المتوسط $1.25\ X\ 10^{-15}$ كجم وحيث أن للأنوية المعروفة فى الطبيعة تقع بين ١ , ٢٤٠ فإن نصف قطر أكبر الأنوية لايتجاوز 10^{-14} متر

طاقة الترابط النووى Nuclear Binding Energy :

كان يعتقد قبل عام 1905 م أن أى شئ فى هذا الكون إما أن يكون كتلة أو طاقة وإتضح على يد أنيشتاين أن كلاً من الكتلة والطاقة ترتبطان بعلاقة بسيطة وهى :

$$E_{\circ} = m_{\circ}C^2$$

حيث :

- $m_{\circ}$: هى كتلة المادة عند السكون مقدرة بالكيلوجرام
- C : سرعة الضوء فى الفراغ وتساوى تقريباً $3.0\ X\ 10^8$ متر/ ثانية
- $E_{\circ}$: مكافئ ماتحتوية المادة من طاقة مقدرة بالجول

وإتفق على حساب الطاقات فى المجال النووى بوحدة تسمى "مليون إلكترون فولت (Mev)" أى 10^6 إلكترون فولت ev

الإلكترون فولت (ev) :

هو مقدار الطاقة التى يكتسبها جسيم شحنته تساوى شحنة الإلكترون $1.6\ X\ 10^{-19}$ كولوم عند إنتقالة بين نقطتين فى الفراغ الفرق بينهما واحد فولت.

1 الكترون فولت (1 ev)	$= 1.6x10^{-19}$ جول	
1 كيلو الكترون فولت	$= 10^3$ الكترون فولت	$= 1.6x10^{-16}$ جول
1 مليون الكترون فولت	$= 10^6$ الكترون فولت	$= 1.6x10^{-13}$ جول

أو الجول يساوى $\frac{1}{1.6\ X\ 10^{-13}}$ مليون إلكترون فولت (Mev) .

نجد أن كتلة النواة أقل من مجموع كتل مكوناتها. فأين يذهب فرق الكتلة:

تحول إلى طاقة عند تكوين النواة من مكوناتها الحرة ويقدر بـ

[عدد البروتونات X كتلة البروتون + عددالنيوترونات X كتلة النيوترون – كتلة النواة] C^2 X
Z M_p N M_n M

هذه الطاقة هى التى تسبب ترابط مكونات النواة ولذلك فهى تسمى بطاقة الترابط النووى

$$B.E. = [Z\,M_p + N\,M_n - M]c^2$$

ملاحظة : عند حساب قيمة طاقة الترابط نستخدم وحدة الكتلة الذرية كمقياس لكتل البروتونات والنيوترونات علاوة على مكافئ الطاقة لوحدة الكتل الذرية ويحسب كالآتى:

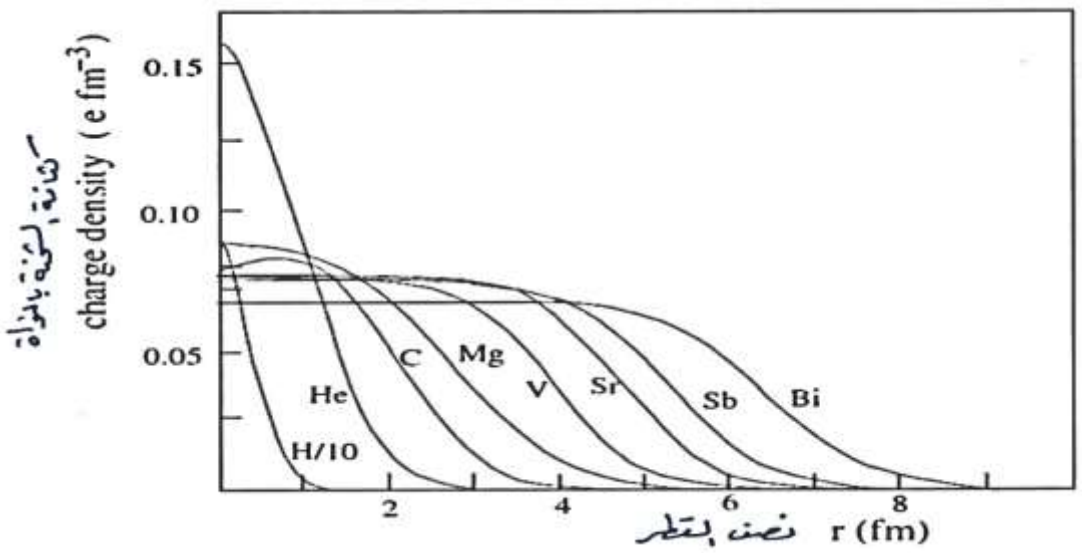
$$1\ amu = 1.655\ X\ 10^{-27}\ Kg$$

$$c = 3.0\ X\ 10^{8}\ m/sec$$

$$E_{amu} = (1.6555\ X\ 10^{-27})(3.0\ X\ 10^{8})^2/(1.6\ X\ 10^{-13}) \approx 931\ Mev$$

خصائص النواة الذرية

١. توزيع شحنة النواة وكتلتها :



فى الشكل التوزيع الفراغى لشحنة النواة (كثافة الشحنة) تقاس بوحدة شحنة الإلكترون فى الفيرمى المكعب (e fm^{-3}) . تم استخلاص هذه النتائج من تجارب استطارة (اصطدام)

الإلكترونات المعجلة للأنوية المختلفة. الانوية الخفيفة تصل مقدار كثافة الشحنة إلى قيمة عظمى عندما $r = 0$ بينما الانوية التقيلة ذات توزيع متجانس قرب المركز (أو منخفض قليلاً عند المركز بسبب التنافر بين الشحنات الموجبة)

فى جميع الحالات تتلاشى شحنة النواة عند السطح الذى يختلف نصف قطره من نواة لاخرى.

٢. نصف قطر النواة :

إنصاف أقطار بعض الانوية تم تحديدها بواسطة تجارب تطاير (اصطدام) الإلكترونات المعجلة بواسطة الأنوية.

حجم النواة يتم وصفه باستخدام القيمة r_{rms} طبقاً للعلاقة :

$$(r_{rms})^2 = \frac{\int d^3r r^2 \rho(r)}{\int d^3r \rho(r)}$$

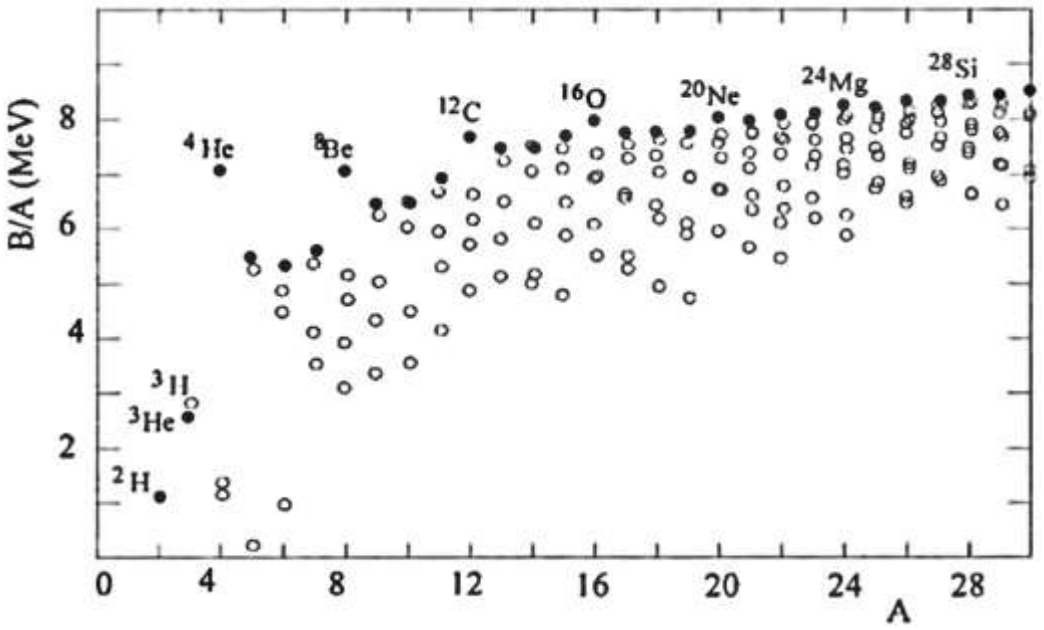
nucleus	R_{rms} (fm)	R (fm)	$R/A^{\frac{1}{3}}$ (fm)	nucleus	R_{rms} (fm)	R (fm)	$R/A^{\frac{1}{3}}$ (fm)
H^1	0.77	1.0	1.0	O^{16}	2.64	3.41	1.35
H^2	2.11	2.73	2.16	Mg^{24}	2.98	3.84	1.33
He^4	1.61	2.08	1.31	Ca^{40}	3.52	4.54	1.32
Li^6	2.20	2.80	1.56	Sb^{122}	4.63	5.97	1.20
Li^7	2.20	2.80	1.49	Ta^{181}	5.50	7.10	1.25
Be^9	2.20	2.84	1.37	Bi^{209}	5.52	7.13	1.20
C^{12}	3.37	3.04	1.33				

وهكذا يتضح أن قيمة أن قيمة r_o ليست ثابتة لكل الانوية على أعتبار أن العلاقة الأولية بين نصف القطر وعدد الكتلة هى :

$$R = r_o A^{\frac{1}{3}}$$

من متابعة الرسم البيانى (الشكل ١) لتوزيع كثافة الشحنة نجد أنه عندما $A > 40$ فأن كثافة البروتونات (كثافة الشحنة) تكون تقريباً متساوية وهى نفس القيمة فى المركز ثم تتناقص بعد ذلك عند حدود النواة الخارجية. وهذا السلوك لكثافة الشحنة لا يختص نواة بذاتها حيث تصل

القيمة تقريباً إلى 0.075 من البروتونات فى كل مكعب (fm^3) . الجدير بالذكر أن توزيع النيوترونات فى تلك الانوية يكون متماثلاً مع توزيع البروتونات بالرغم من أن النيوترونات متعادلة بينما البروتونات مشحونة وذلك بسبب ارتباط النيوترونات مع البروتونات بالقوة النووية. هذه النتيجة تبرهن على القوة النووية تتصف بالتشبع (تصل قيمة عظمى فى وحدة الحجوم ولا تتعداها مهما باغ عدد البروتونات والنيوترونات بالنواة).



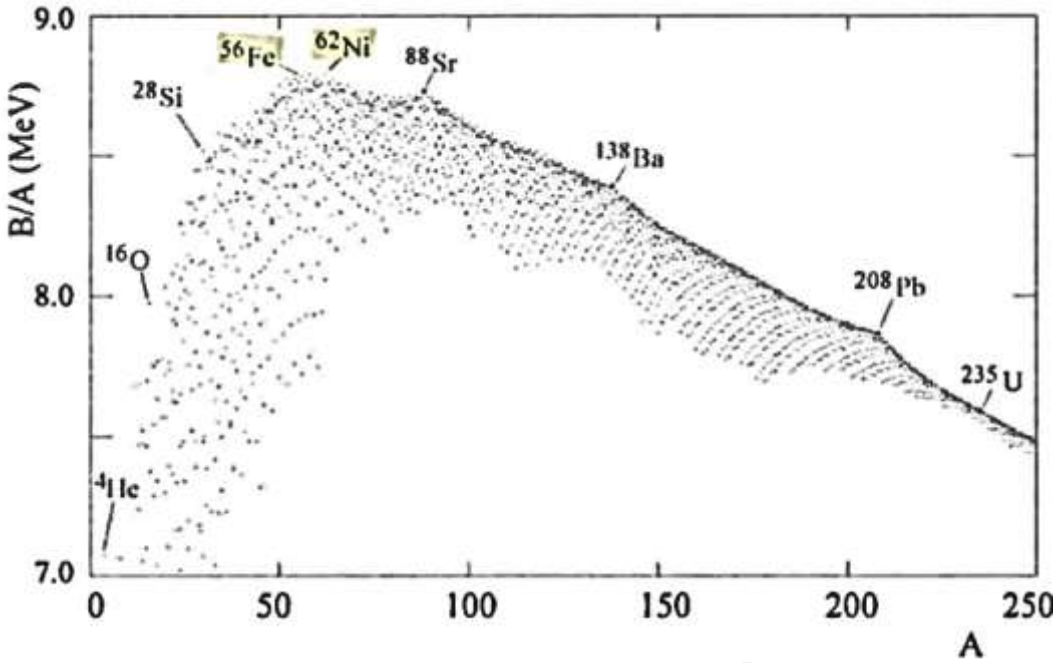
شكل (١): يوضح توزيع كثافة الشحنة على بعض الانوية.

٣. طاقة الترابط النووى :

هى الطاقة اللازمة لربط مكونات النواة من البروتونات والنيوترونات. وهى تساوى سرعة الضوء مضروباً فى الفرق بين مجموع كتل مكونات النواة منفصلة (فى حالة حرة) مطروحاً منها كتلة النواة. كتل مكونات النواة فى هذه الحالة يتم حسابها بالكيلو جرام وذلك باستخدام المعادلة التالية:-

$$B(A,Z) = Nm_n c^2 + Zm_p c^2 - m(A,Z)c^2$$

عند قسمة طاقة الترابط النووى على عدد الكتلة, فنحصل على طاقة الترابط النووى لكل نيوكليون ويرمز لها بالرمز B / A والتى تصل قيمة عظمى حول قيمة A تتراوح بين 60 – 55 وهى منطقة الحديد والنيكل كما يتضح من الشكل التالى :



الشكل (٢): طاقة الترابط النووى لكل نيوكليون B(A, Z) / A كدالة فى عدد الكتلة. الشكل رقم (١) هو تكبير لجزء من الشكل رقم (٢) عندما تكون A صغيرة. الدوائر الممتلئة تمثل الانوية التى لا ينطلق من جسيمات بيتا (أنوية مستقرة) بينما الدوائر الفارغة تمثل الأنوية المشعة (غير المستقرة) التى ينطلق منها غالباً جسيمات بيتا وبالتالى تصبح الانوية أخف لنفس مقدار عدد الكتلة A .

تطبيق رقم (١)

مثال (١) :

إحسبى طاقة الترابط لنواة نظير الديتيريوم المكونة من بروتون واحد ونيوترون واحد حيث أن كتلتها مقدرة بوحدات الكتلة الذرية تساوى 2.013547 ؟

الحل :

نقص الكتلة داخل النواة = 1 X 1.007277 (بروتون) + 1 X 1.008665 (نيوترون) = 2.013547 (نواة) = 2.395×10^{-3} amu

$$B.E. = 2.395 \times 10^{-3} \times 931 = 2.229745 \text{ Mev}$$

ويكون نصيب كل جسيم من هذه الطاقة بمعدل (مقدار B. E. مقسوماً على عدد الجسيمات المكونة للنواة) وهى فى هذه الحالة 2 .

$$\therefore \text{B. E. (nucleunes)} = 1.114872 \text{ Mev}$$

نيوكلون يقصد به البرتون أو النيوترون.

بلاشك أن نواة لاى نظير أو عنصر تزداد تماسكاً كلما زاد مقدار الترابط بين مكونات النواة أى إزداد مقدار طاقة الترابط لكل جسيم من جسيمات النواة والعكس صحيح.

ملاحظة : طاقة الترابط النووى الكلية هى مقدار الطاقة الذى ينطلق عند دمج مكونات النواة معاً لتكون نواة العنصر وهو نفس مقدار الطاقة اللازمة لتفكيك النواة إلى مكوناتها الأصلية ليصبح كل منها حراً.

مثال (٢) :-

إحسبى كتلة الإلكترون بدلالة وحدة الكتلة الذرية وبوحدة Mev .

الحل :-

كتلة الإلكترون = $9.1 \text{ X } 10^{-31}$ كجم

ووجدة الكتلة الذرية = $1.6555 \text{ X } 10^{-27}$ كجم

∴ كتلة الإلكترون = $\left[\frac{9.1\ X\ 10^{-31}\ Kg}{1.6555\ X\ 10^{-27}\ Kg}\right] = 5.4968\ X\ 10^{-4} amu$

= $(10^{-4} \text{ X } 5.4968) \text{ X } (931) = 0.511754$ مليون إلكترون فولت

مثال (٣) :

إذا إفترضنا أن نواة الراديوم – ٢٢٦ كروية الشكل. فكم يبلغ نصف قطرها؟

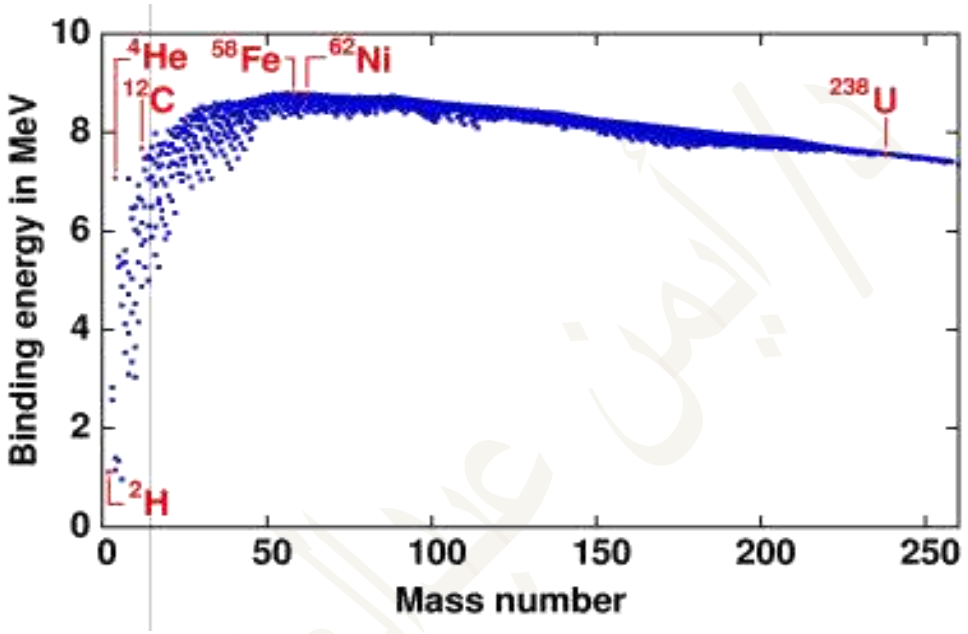
الحل :-

$$R = 1.2A^{\frac{1}{3}} \rightarrow R = 1.2\ (226)^{\frac{1}{3}} = 7.31 \text{ X } 10^{-15}\text{m} = 7.31 \text{ Fm}$$

وتسمى وحدة قياس الأبعاد النووية بـ فيرمى Fermi وهى تساوى 10^{-15} متر.

إستقرار النواة:

يوجد في أنوية العناصر الخفيفة الثابتة عدد متساوي تقريبا من البروتونات والنيوترونات، إلا أنه بإزدياد كتلة العنصر تزداد نسبة النيوترونات إلى البروتونات، وتظهر هذه الحقائق في الشكل (٢) الذي يوضح العلاقة بين عدد النيوترونات وعدد البروتونات لعدد من النظائر.



شكل (٢- ١): حزام الثبات الذي يوضح العلاقة بين عدد النيوترونات والبروتونات.

نلاحظ أن الإنحراف عن نسبة ١:١ يصبح واضحا عند عدد ذري من ٢٠- ٢٥ فأكثر

من منحنى الاستقرار نجد أن:-

[١] النقط الواقعة على المنطقة المتعرجة أو حزام الثبات، تمثل نظائر ثابتة

[٢] أما النقط التي تقع خارج هذه المنطقة فتمثل عناصر مشعة،

[٣] فإذا كانت نسبة N\Z للنواة عالية جدا يقال أنها غنية بالنيوترونات، لذلك يجب أن تمر بإنحلال النشاط الإشعاعي بالأسلوب الذي تقلل فيه نسبة النيوترونات إلى البروتونات لتصل إلى قيمة قريبة جدا من قيمة الإستقرار ($N/Z = 1$) في هذه الحالة يجب على النواة أن تقلل من N وتزيد من قيمة Z ، إذ يمكن عمل ذلك بتحويل النيوترونات إلى بروتونات وذلك بإنبعاث جسيمات بيتا السالبة.

[٤] أما إذا كانت N/Z قليلة جدا للإستقرارحدث إنحلال للنشاط الإشعاعي الذي يقلل من قيمة Z ويزيد من قيمة N بتحويل البروتونات إلى نيوترونات وذلك بإنبعاث بوزيترون B^+ أو إمتصاص النواة للإلكترون المداري (E.C.) حجز الإلكترون

[٥] ونلاحظ أنه بعد البزموث تكون جميع الأنوية غير مستقرة تجاه إنحلال النشاط الإشعاعي بإنبعاث جسيمات ألفا في حين أن يكون بعضها غير مستقر أيضا تجاه إنحلال بيتا.

يمكن تقسيم منحنى الاستقرار إلى ثلاث مناطق:

[١] **الأنوية التي لها Z = 20** : هنا تكون النسبة N/Z للأنوية المستقرة مساوية للقيمة 1 أو 1.1

[٢] **الأنوية التي لها Z = 20-83**: تزداد النسبة N/Z للأنوية المستقرة لتصل للقيمة 1.5 أي أننا في هذه الحالة نحتاج إلى عدد أكبر من النيوترونات لزيادة القوى النووية الجذبة حتى تتغلب على قوى التنافر الكولومية التي تنشأ بين العدد الكبير من البروتونات.

[٣] **الأنوية التي لها Z > 83** : هنا تزداد قوى التنافر الكولومية بين البروتونات بحيث يستحيل الحصول على أنوية ثابتة للعناصر ذات العدد الأكبر من ٨٣ .

الخواص الدورية للأنوية (الأعداد السحرية):

كما هو معروف فإن الخواص الكيميائية للعناصر تتكرر دوريا بعد الأعداد الذرية ٢، ١٠، ١٨، ٣٦، ٥٤، ٨٦. وعلى هذا الأساس تم وضع الجدول الدوري للعناصر.

وبشكل مشابه فقد لوحظ أن خواص الأنوية تتكرر بصورة دورية وتنتهي كل دورة عند الأعداد ٢، ٨، ٢٠، ٥٠، ٨٢، ١٢٦ من النيوترونات أو البروتونات وهي الأعداد التي يطلق عليها الأعداد السحرية Magic Numbers .

تفسير الخواص الدورية للأنوية:-

وقد فسرت هذه المشاهدة على أساس أنه كما تعمل الإلكترونات في الذرات على الإزدواج لتكوين روابط مستقرة كذلك فإن النيوكلونات ذات نفس النوع (بروتون – بروتون أو نيوترون – نيوترون) تعمل على الإزدواج لتزيد من ثبات النواة، وهناك من الدلائل ما يدعم هذا الافتراض:

[١] أن الأنوية ذات الأعداد الزوجية من البروتونات والنيوترونات هي أكثر ثباتا من غيرها ٢٠١ نواة من أصل ٣٣٦

[٢] دائما ما تنتهي سلاسل الإشعاع عند عنصر يحمل رقما سحريا هو غالبا الرصاص للسلاسل الطبيعية حيث العدد الذري له ٨٢ أو البزموث الذي عدد الكتلة له ١٢٦ في حالة سلسلة النبتونيوم وكلاهما رقم سحري.

[٣] بالنسبة لعنصر القصدير الذي عدده الذري ٥٠ وهو رقم سحري فإن هناك ١٠ نظائر مستقرة وهذا رقم كبير على غير العادة، وبالمثل عنصر الكالسيوم الذي عدده الذري يساوي ٢٠ له ستة نظائر مستقرة.

[٤] أن أكثر العناصر وجودا في الطبيعة سواء في القشرة الأرضية أو حتى الوجود الكوني هي التى تحمل ارقام سحرية

[٥] إنبعاث نيوترونات من أنوية تحم رقما سحريا يوضح أن لهذه الأنوية ثباتا غير عادي

[٦] الطاقة اللازمة لنزع نيوترون من أنوية نظائر الرصاص لها قيم تؤكد صحة فرضية ثبات الأنوية التي تحمل رقما سحرياً.