من أجل فهم طبيعة القوة النووية اجريت عدة تجارب، بينت أن القوة النووية هي أقوى من أية قوة أخرى معروفة مثل القوة الكهربائية أو قوة الجذب الكتلي، كذالك فإن هذه القوة تمتاز بكونها قوة قصير المدى واعتمادًا على فرضية هايزنبرغ التي تنص على أن القوة النووية تنتج عن تبادل الدقائق بين المكونات النووية فقد استطاع يوكاوا عام 1935 أن يثبت أن بعض خواص القوة النووية يمكن تفسيرها، إذ افترضنا انه يتم تبادل جسيم ثقيل وقد تم اكتشاف هذه الجسيمات بعد ذالك في الأشعة الكونية وتسمى بالميزونات.

تؤثر القوة النووية على النيوكليونات ويؤدي ذلك إلى ترابط هذه الأخير وتكوين البناء المترابط و المعروف باسم النواة، ولكي تتفكك النواة إلى النيوكليونات المكونة لها فإنه يجب منحها كمية معينة من الطاقة، إذ أنه نتيجة لوجود طاقة الترابط تقل كتلة النواة عن مجموع كتل النيوكليونات المكونة لها، هذا الفرق بين الكتلة الفعلية وبين مجموع كتل مكوناتها يشكل ما يسمى الترابط أو طاقة الربط.

نستعمل بعض الرموز للتعبير عن كتلة الإلكترون والنيترون والبروتون حيث:

$M(^{A}_{Z}X)$: كتلة الذرة $^{A}_{Z}X$ عند السكون.

$m(^{A}_{Z}X)$: كتلة النواة $^{A}_{Z}X$ عند السكون.

$m_n = m(^{1}_{0}n)$: كتلة النيترون $^{A}_{Z}X$ عند السكون.

$m_p = m(^{1}_{1}H)$: كتلة البروتون $^{A}_{Z}X$ عند السكون.

$m_{e^-} = m(^{0}_{-1}e)$: كتلة الإلكترون.

1.3 العلاقة بين الكتلة الذرية والنووية للنكليد $^{A}_{Z}X$:

تتشكل ذرة متعادلة $^{A}_{Z}X$ من نواة وZ إلكترون. طاقة الربط الذرية هي طاقة ربط الالكترونات بالنواة لانتزاع كل هذه الالكترونات يجب توفير طاقة تأين تساوي $E_B(Z_e)$

العلاقة بين الكتلة الذرية والنووية في نفس العنصر $^{A}_{Z}X$

$$(\text{النواة})\ ^{A}_{Z}X + Z_{\grave{e}} \longrightarrow (\text{الذرة})\ ^{A}_{Z}X + E_B(Z_e) \qquad (1.3)$$

$$m(^{A}_{Z}X) + Zm_e \longrightarrow M(^{A}_{Z}X) + E_B(Z_e)/c^2 \qquad (2.3)$$

عادة ما نهمل الحد $E_B(Z_e)/c^2$ على أنه صغير جدًا مقارنة بالحدود الأخرى.

2.3 طاقة الارتباط النووي:

إن الطاقة الكاملة (طاقة الجهد) في أي جملة من الجسيمات المقيدة هي طاقة سالبة، نستدل من ذلك بأن الطاقة الكلية للجملة المقيدة هي أقل من الطاقة الكلية للجسيمات المنفصلة عن بعضها البعض وأن هذا الفرق في الطاقة يدعى بطاقة ترابط المنظومة وفي حالة المكونات النووية فإن طاقة الترابط النووية (E_B) هي كبيرة جدًا بحيث أن الفرق في الطاقة ينتج فرقًا واضحًا في الكتلة (ΔM) بين مجموع كتل النيوكليونات والكتلة الحقيقة للنواة، ولذلك من الممكن

تعريف طاقة الربط النووي (E_B) بإنها كمية الطاقة المتحررة عند تركيب النواة من خلال جمع العدد المطلوب من البروتونات (Z) والنيترونات (N) أو أنها كمية الطاقة اللازمة لتفتت هذه النواة إلى مكوناتها الأساسية من بروتونات ونيترونات.

ان الكتلة الكلية للنواة تكون أقل من مجموع نوكليوناتها منفردة، ولأن الكتلة تعد مقياس للطاقة فإن الطاقة الكلية لنظام مترابط (النواة) تكون أقل من الطاقة المكونة للنكليونات وهي منفصلة ويسمى هذا الفرق في الطاقة طاقة الترابط للنواة ويمكن تفسيرها بإنها الطاقة التي يجب أن تضاف الى النواة لغرض فصلها الى مكوناتها لذلك لكي نفصل نواة الى بروتونات ونيوترونات يجب تقديم الطاقة الى النواة.

لقد بين مبدا انحفاظ الطاقة وعلاقة اينشتاين لتكافؤ الكتلة–الطاقة أن طاقة الترابط (E_B) لأية نواة كتلتها $\mathrm{M}(^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X})$ هي:

$$\mathrm{Z_P} + (\mathrm{A}-\mathrm{Z})n \longrightarrow {}^{\mathrm{A}}_{Z}\mathrm{X} + \mathrm{E_B}(^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X}) \qquad (3.3)$$

$$\mathrm{Z}m_{\mathrm{p}} + (\mathrm{A}-\mathrm{Z})m_n = \mathrm{m}(^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X}) + \mathrm{E_B}(^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X})/C^2 \qquad (4.3)$$

بما أن كتلة الأنوية غير محددة بدقة مثل الكتلة الذرية فإننا نحسب $\mathrm{E_B}(^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X})$ بدلالة الكتل الذرية $\mathrm{M}(^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X})$ لدينا :

$$\mathrm{Z_P} + (\mathrm{A}-\mathrm{Z})\mathrm{n} \longrightarrow {}^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X}(\text{النواة}) + \mathrm{E_B}(^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X}) \qquad (5.3)$$

$${}^{A}_{Z}X(\text{النواة}) + Zm_e \longrightarrow {}^{A}_{Z}X(\text{الذرة}) + \mathrm{E_B}(^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X}) \qquad (6.3)$$

$$\frac{\mathrm{E_B}(^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X})}{C^2} = \mathrm{m}(^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X}) - \mathrm{Z}m_{\mathrm{p}} - (\mathrm{A}-\mathrm{Z})m_n \qquad (7.3)$$

$$\frac{\mathrm{E_B}(^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X})}{\mathrm{C}^2} = \mathrm{Zm}(^{1}_{1}\mathrm{H}) + (\mathrm{A}-\mathrm{Z})\mathrm{m}(^{1}_{0}\mathrm{n}) - \mathrm{M}(^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X}) \qquad (8.3)$$

$$\mathrm{E_B}(^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X}) = \nabla\mathrm{m}(^{\mathrm{A}}_{\mathrm{Z}}\mathrm{X}) \times C^2 \qquad (9.3)$$

حيث m_p هي كتلة البرتون m_n هي كتلة النيوترون ونستعمل الكتل الذرية، وغالبا مايكون ملائما من الناحية العملية استعمال كتلة الذرات المتعادلة (الكتلة النووية زائد كتلة الإلكترونات) في حساب طاقة الترابط لأن المطياف الكتلي يقيس عمومًا الكتل الذرية.

فمثال على ذلك لدينا ذرة الهليوم حيث تتكون من بروتونين ونيوترونين:

الشكل (1.3): مكونات ذرة الهليوم.

تبلغ كتلة نواة الهليوم 4.0015Uma.
تبلغ كتلة البروتون 1.0073Uma.
تبلغ كتلة النيترون 1.0087Uma.

وبما أن نواة الهليوم تتألف من بروتونين ونيترونين لذا يمكن حساب كتلة نواة الهليوم على النحو التالي:

كتلة بروتونين = 1.0073×2 كتلة نيترونين = 1.0087×2
كتلة بروتونين = 2.0146 كتلة نيترونين = 2.0174

مجموع كتل البروتونات والنيترونات تساوي $4.0320 = 2.0146 + 2.0174$
وبمقارنة كتلة الهليوم الفعلية بمجموع كتل مكونات نواتها يلاحظ أن هنالك فرقاً في الكتلة:

الشكل (2.3): الفرق في الكتلة.

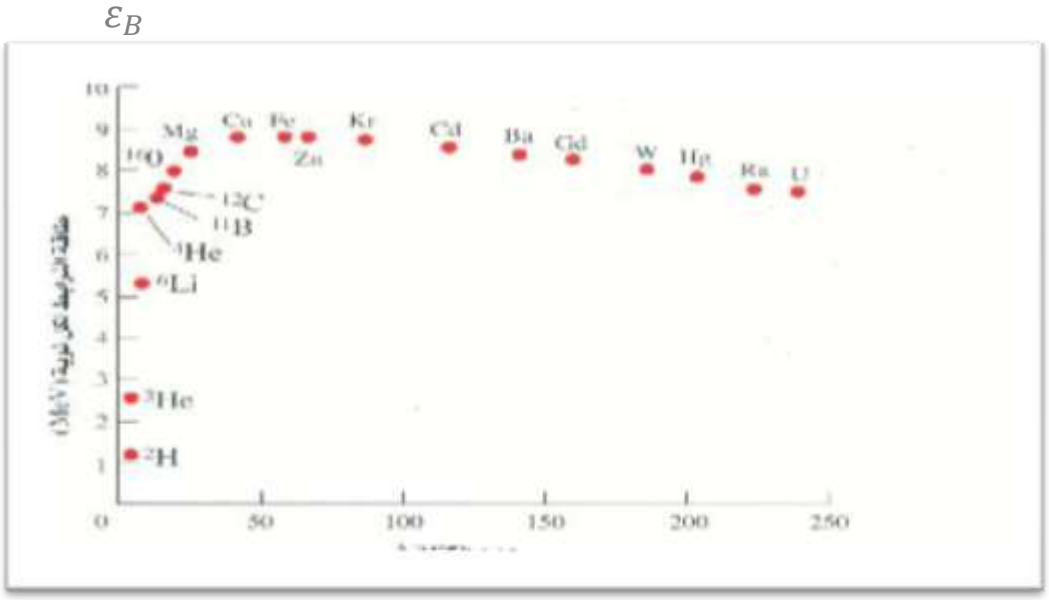
يبلغ الفرق في الكتلة بين نواة الهليوم الفعلية ومجموع مكوناتها 0.0305 وحدة كتلة ذرية، ويتحول هذا الفرق في الكتلة طبقاً لمعادلة أينشتاين $E=mc^2$ إلى طاقة، تتحرر عندما تتكون نواة الهليوم وتدعى هذه الطاقة بطاقة الربط النووي.

3.3 طاقة الربط النوعية (الوسطية):

بقسمة طاقة الربط النووية على العدد الكتلي لنفس النواة نحصل على مقدار يدعى بطاقة الربط النوعية وهو يفسر بوضوح مدى استقرار النواة حيث أنه كلما كانت النواة كبيرة (العدد الكتلي A كبير) كلما كان ربط النكليونات أكثر.

$$\varepsilon_B = E_B/A \qquad (10.3)$$

لننظر كيف يتغير المقدار ε_B بتغير النكليونات في النواة، يبين الشكل (3.3) هذا التغير، وقد وضع A على محور الفواصل والمقدار ε_B على محور الترتيب:



الشكل (3.3): طاقة الربط لكل نواة.

يسمح تحليل هذا المخطط البياني باستخلاص عدد من النتائج المهمة:

- طاقة الارتباط النوعية ε_B ليست نفسها في كافة النوى وبتالي فإن النكليونات غير مرتبطة في النوى بنفس الدرجة من المتانة وهي امتن ارتباط في النوى التي يتراوح عددها الكتلي بين 40 و 100 (ε_B العظمى) وتكون قيمة طاقة الارتباط الوسطية في هذه المجموعة من النوى ثابتة تقريبًا ومساوية 8.7Mev لكل جسيم نووي.
- في النوى ذات A>100 تتناقص ε_B بإزدياد العدد النكليونات في النواة وتساوي طاقة الارتباط الوسطية في اليورانيوم 7.5Mev.
- في النوى المحتوية على عدد قليل من النكليونات تتناقص ε_B بنقصان عدد الجسيمات في النواة و الشئ المميز على منحنى طاقة الارتباط الوسطية في هذه المجموعة من النوى وجود نهايات عظمى وصغرى حادة.

4.3 معادلات طاقة فصل النيكليون:

1.4.3 طاقة فصل النيترون S_n:

$$ {}^{A}_{Z}X + S_n\left({}^{A}_{Z}X\right) \longrightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{A-1}_{Z}X \quad (11.3) $$

$$ S_n\left({}^{A}_{Z}X\right) = [M\left({}^{A-1}_{Z}X\right) + m\left({}^{1}_{0}n\right) - M\left({}^{A}_{Z}X\right)C^2] \quad (12.3) $$

$$ S_n\left({}^{A}_{Z}X\right) = [E_B\left({}^{A}_{Z}X\right) - E_B\left({}^{A-1}_{Z}X\right)] \quad (13.3) $$

2.4.3 طاقة فصل البروتون S_P:

$$ {}^{A}_{Z}X + S_P\left({}^{A}_{Z}X\right) \longrightarrow {}^{1}_{1}P + {}^{A-1}_{Z-1}X \quad (14.3) $$

$$ S_P\left({}^{A}_{Z}X\right) = \left(M\left({}^{A-1}_{Z-1}X\right) + m\left({}^{1}_{1}H\right) - M\left({}^{A}_{Z}X\right)C^2\right) \quad (15.3) $$

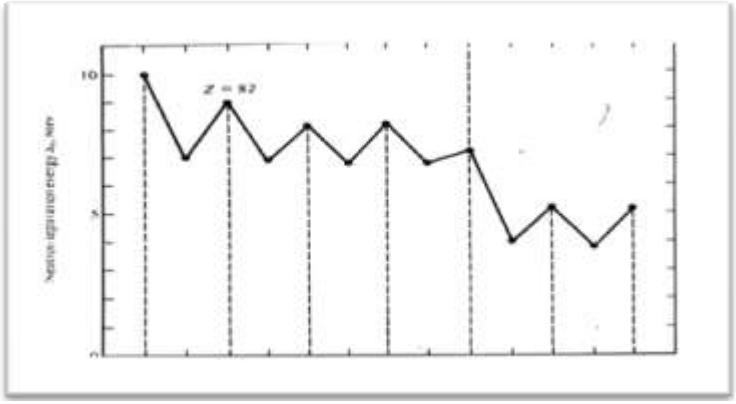
$$ S_p\left({}^{A}_{Z}X\right) = \left[E_B\left({}^{A}_{Z}X\right) - E_B\left({}^{A-1}_{Z-1}X\right)\right]. \quad (16.3) $$

5.3 نظاميات طاقة الفصل:

ان النظاميات المثالية لطاقات فصل النيترون S_n واضحة في الشكل (4.3) حيث انه ولقيمة معينة للعدد الذري Z فان S_n تكون اكبر(في النوى التي تكون فيها N زوجية) مما هي عليه في النوى التي تكون فيها N فردية وكذلك فإنه ولقيمة معينة لعدد النيترونات N فان S_p تكون اكبر في النوى التي تكون فيها Z زوجية مما هي عليه في النوى ذات Z فردية، ان هذا ناتج عن احدى خواص القوى النووية التي ينتج عنها ارتباط إضافي بين كل زوج من النكليونات المتشابهة الموجودة في الحالة نفسها والتي يكون لها دفع زاوي كلي يعمل في اتجاهين متعاكسين وهذا أيضًا هو السبب في الاستقرار العالي لتركيب جسيمات ألفا.

$$ S_n(A, Z, \text{even N}) - S_n\,(A-1, Z, N-1) \quad (17.3) $$

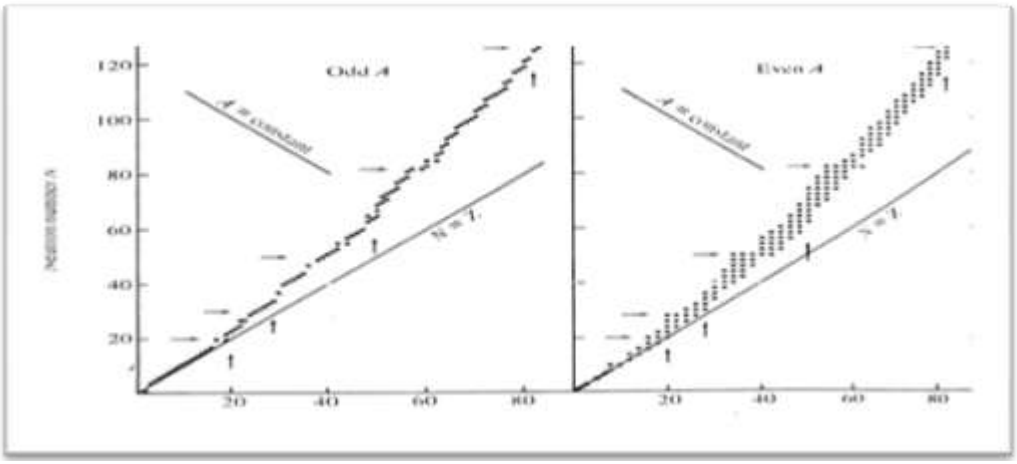
تسمي طاقة ازدواج النيترون والتي تتغير تقريبا وتتراوح ما بين 2 إلى 4 ميجا الكترون فولط مع زيادة في قيمة A وتظهر قيم مشابهة لذلك بالنسبة للبروتونات ان الازدواج يؤدي إلى أن تكون النوى الزوجية- الزوجية (Z زوجية وN زوجية) أكثر استقرارًا من النوى الزوجية- الفردية والنوى الفردية -الزوجية وهذا بدورها أكثر ارتباط من النوى الفردية - الفردية وهذا يتضح أيضا من ملاحظة نظاميات الوفرة الطبيعية للنوى المستقرة.



الشكل(4.3): طاقات فصل النيترون في نظائر الرصاص بدلالة النيترونات الموجودة في النواة.

6.3 نظاميات الوفرة الطبيعية للنوى المستقرة:

ان النوى الموجودة في الكرة الأرضية هي إما مستقرة أو ذات نشاط إشعاعي بأعمار نصفية تزيد على 10^9 سنة تقريبا وذلك لأنها قد تكونت قبل 5.10^9 سنة مضت على الأقل حسب النظريات السائدة الآن، ان الشكل(5.3) يوضح العلاقة بين Z وN لجميع النوى المعروفة مقسمة إلى ايزوبارات فردية و زوجية، ان معدل خط الاستقرار يرتكز حول **N=Z** بالنسبة للنوى الخفيفة أما بالنسبة للنوى الأثقل فإن الاستقرار يشذ عن ذلك بسبب زيادة أهمية قوة كولوم، وعندما تكون A فردية فانه يوجد فقط ايزوبار واحد (ماعدا A=113،123) وعندما تكون A زوجية فإنه توجد فقط نوى زوجية زوجية (ماعدا A = 2، 6 ،10،14)، ان الجدول (1.3) يوضح ملخص تكرار وفرة النوى في الطبيعة.



الشكل (5.3): العلاقة بين البروتونات وعدد النيترونات في النوى المستقرة.

الايزوبارات الفردية مبينة في يسار الشكل والزوجية في يمينه،و الأسهم تؤشر في اتجاه الأقرب من الأعداد السحرية عند قيم N و Z = 20 و 28 و 50 و82 و 126 والايزوبارات الفردية عند قيم A = 2 و 6 و 10 و 14.

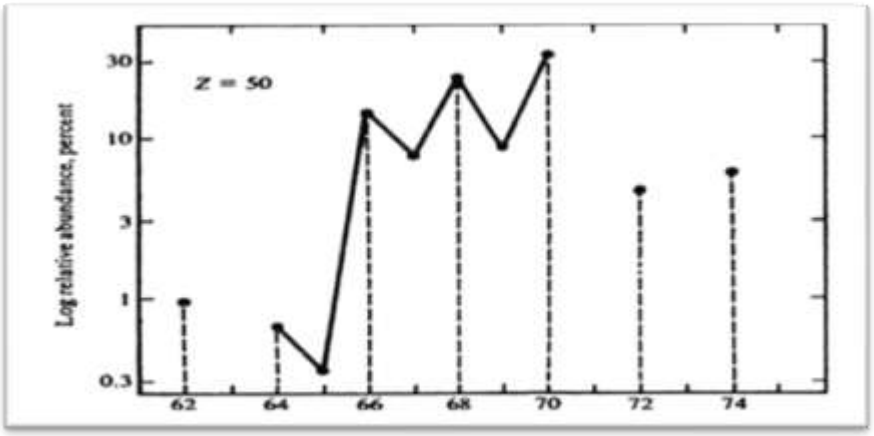
ان النوى الزوجية- الزوجية تظهر بوفرة أكبر ولو اعتبرنا أن النوى المستقرة تتولد بطريقة بحيث تؤدى الزيادة في طاقة الارتباط إلى زيادة في نسبة الوفرة الطبيعية فإننا نستنتج أن النوى الزوجية-الزوجية أكثر استقرار أي أننا يمكن أن نكافئ الوفرة الطبيعية بالاستقرار وهذا يتفق مع الاستنتاجات التي تم التوصل اليها من دراسة نظاميات طاقات الفصل إن عملية تكوين العناصر في الطبيعة كانت عملية معتقدة على الأغلب الا أن إحدى عمليات التوليد المحتملة وهي نظرية انفجار الوبر نوفا تعتمد على الدور الرئيسي الذي تلعبه طاقة الارتباط في التحكم في الوفرة الطبيعية، ان الاعتماد السائد حاليا هو أن أكثر النوى وان كانت ليست الأكثر تواجدا قد تولدت بالتأكيد بطريقة كهذه.

وفرة تواجد النوى المستقرةتعطى في الجدول التالي.

N	even	odd	even	odd
Z	even	even	odd	odd
Number of nuclides	160	53	49	4

ان الوفرة النسبية للنظائر والتواجد الكوني للنوى يحتوي على تكرارات ملفتة للنظر كما هو مبين في الشكل (6.3) والذي يوضح الوفرة الطبيعية النسبية لعنصر الزنك (Z=50) ان الوفرة الطبيعية الواطئة للنظير الذي تكون فيه N فردية واضح جدا وهذا أيضا مرتبط بحقيقة أن عملية توليد النوى تفصل النوى التي لها طاقات ارتباط أعلى، كما أن دراسة تفصيلية للوفرة الكونية تؤدي إلى الاستنتاجات نفسها.

ان الاستقرارية المميزة بالارتفاع تصاحب النوى التي تكون فيها N أو Z مساوية للإعداد 2 و8 و20 و28 و50 و82 و126 ويمكن ملاحظة بعض تأثيرات هذه الاعداد السحرية من خلال ملاحظة الشكل (6.3)، ان الأعداد السحرية تعكس تأثيرات في النوى مشابهة لتلك التي تصاحب امتلاء القشرة الالكترونية في الذرات وهناك أسباب جيدة لعدم توافق هذه الأعداد مع دورات الجدول الدوري 2 و8 و18 و32.



الشكل (6.3): الوفرة الطبيعية النسبية للنظائر بدلالة عدد النيترونات النظائر التي تكون فيها N = 63,71,73 و ليست مستقرة.

7.3 التمارين المقترحة:

<u>التمرين الاول:</u> ماهو الفرق بين طاقة الارتباط النووية ل $^{3}_{2}He$ وطاقة الارتباط النووية ل $^{3}_{1}H$ ماذا تستخلص من هذه النتيجة.

$M(^{3}_{2}He)=3.0160293097u$ $M(^{3}_{1}H)=3.0160492675u$

<u>التمرين الثاني</u>: - ماهي طاقة الارتباط النووية للنواة $^{12}_{6}C$

- ماهي طاقة الارتباط (الفصل) للبروتون
- ماهي طاقة الارتباط (الفصل) للنيوترون

$M(^{12}_{6}C)= 12.000000u$; $M(^{11}_{5}B)=11.009305u$; $M(^{11}_{6}C)=11.011433u$

التمرين الثالث: احسب طاقة الارتباط المتوسطة للنكليون الواحد في كل من النكليدات التالية ثم قارن

$^{12}_{6}C$	$M(^{12}_{6}C)= 12.000000u$
$^{4}_{2}He$	$M(^{4}_{2}He)= 4.0026030u$
$^{40}_{20}Ca$	$M(^{40}_{20}Ca)= 39.962589u$
$^{202}_{80}Hg$	$M(^{202}_{80}Hg)= 201.970642u$

التمرين الرابع: قيست بدقة طاقة الارتباط للنكليون الواحد (الطاقة المتوسطة) من اجل الانوية التالية

$^{4}_{2}He$ (6.82Mev) ; $^{14}_{7}N$ (7.22Mev) ; $^{16}_{8}O$ (7.51Mev)

احسب كتلة كل من هذه النكليدات بوحدة الكتل الذرية u.

نعطي : $m(e^-)$; $m(^{1}_{0}n)=1.008665u$; $m(^{1}_{1}H)=1.007276u$; $M(^{1}_{1}H)=1.007825u$

$=5.28579.10^{-4}u$