عمر النصف الجزئي لكل من النمطين السابقين.

17) وضعت شريحة من الذهب $^{197}Au$ كتلتها 0.06 جرام في احدى قنوات مفاعل نووي حيث عرضت لاشعاع النيوترونات لمدة نصف ساعة. فإذا كان الذهب يمتص النيوترون ويتحول إلى النظير 198 الذي يطلق اشعاع β بعمر نصف قدره 2.69 يوماً. وعند فحص العينة بعد ساعتين من اخراجها من المفاعل وجد أنها تطلق جسيمات β بمعدل قدره $2 \times 10^4$ كل دقيقة. اوجد فيض النيوترونات في المفاعل اذا علمت أن مساحة مقطع الامتصاص للنيوترونات يبلغ 98.8 بارن.

18) يتحول الاوروبيوم $^{151}Eu$ إلى النظير $^{152}Eu$ عند تعرضه لفيض من النيوترونات حيث يتحلل بعمر نصف قدره 13 سنة إلى كل من الجادولنييوم والسميريوم باطلاق $\beta^-$ و $EC + \beta^+$ على الترتيب.
اوجد زمن التشعيع اللازم للحصول على فاعلية قدرها 10 μ Ci من $^{152}Eu$ اذا كان فيض النيوترونات يبلغ $1.5 \times 10^{12}$ نيوترون/سم2/ث .

19) احسب الطاقة المتحررة عن التحلل الكامل لكتلة من الكوبلت - 60 قدرها 0.05 جرام إذا علمت أن كل تحلله ينتج عنها جسيمات β بطاقة قدرها 0.31 واشعة γ بطاقة قدرها 2.5 م أف. (عمر النصف للكوبلت 60 يساوي 5.2 سنة) .

20) في التحلل المتلاحق:

$$^{166}_{70}Yb \xrightarrow[EC]{56.7\ h} {}^{166}_{69}Tm \xrightarrow[EC,\beta^+]{7.7} {}^{166}_{68}Er$$

اوجد :
أ ) الزمن الذي تبلغ عنده فاعلية الثوليوم قيمتها العظمى.
ب) فاعلية اليتريبيوم بعد مرور ثلاثة ايام.



# الباب الخامس
# الكتل النووية والاستقرار النووي

## 1.5 العلاقة بين الكتلة والطاقة :

بينا في الباب الأول أن كتلة الجسم تأخذ في الزيادة وذلك عندما تقترب سرعته من سرعة الضوء واستنتجنا أن طاقة حركة الجسم (T) تعطى بالعلاقة (25.1) أي أن :

$$T = (m - m_0)\, c^2$$

حيث $m_0$ ، m هما كتلة الجسم النسبية والسكونية على الترتيب .
وهذا يعني أنه كلما ازدادت طاقة حركة الجسم فإن كتلته تزداد وذلك عندما تقترب سرعته من سرعة الضوء . فإذا ما وصلت سرعة الجسم الى سرعة الضوء - نفترض هذا نظرياً - فإن كتلة الجسم تصبح لا نهائية (وذلك حسب معادلة 20.1) . وهذا يعني أنه يلزمنا أن نمده بطاقة لانهائية ، وهذا غير عملي . يمكن حالياً تعجيل الكثير من الجسيمات وخاصة الخفيفة الى سرعات كبيرة باستخدام المعجلات المختلفة حيث تبدأ في الظهور تعقيدات فنية كبيرة في تصميم هذه الاجهزة وذلك عندما تقترب سرعات الجسيمات المعجلة من سرعة الضوء .

كما بينا في المعادلة (22.1) أن هناك علاقة تربط بين الطاقة الكلية للجسم (E) وكتلة (m) حسب معادلة اينشتاين المعروفة : -

$$E = mc^2$$

حيث c هي سرعة الضوء .
تكتسب العلاقة بين الطاقة والكتلة اهمية خاصة عند الحديث عن الكتل النووية والاستقرار النووي . إذ سوف يتضح لنا جلياً كيف تتحول الكتلة إلى نوع من الطاقة كما وتتحول الطاقة بدورها إلى كتلة .

## 2.5 الكتل النووية :

عند الحديث عن كتلة النواة فإنه يلزمنا استحداث وحدة مناسبة

متناهية الصغر ومن ثم لا تصلح وحداتنا المعروفة الكبيرة لذلك . ففي النظام الدولي للوحدات اخذت وحدة الكيلو جرام (kg) لقياس الكتلة . وهذه القيمة تعتبر كبيرة جداً لتقدير كتلة النواة ، ومن ثم تم تعريف وحدة جديدة هي وحدة الكتل الذرية Atomic Mass Unit (amu أو و ك ذ) التي تساوي $\frac{1}{12}$ من كتلة ذرة الكربون -12 . أي أنه بالتعريف فإن :

$$1 \text{ amu} = \frac{1}{N_0} \quad \text{kg.} \qquad (1.5)$$

وحيث أن :

$$N_0 = 6.022045 \times 10^{26} \text{ / kmol} \qquad (2.5)$$

فإن :

$$1 \text{ amu} = \frac{1}{6.022045 \times 10^{26}}$$

$$= 1.660565 \times 10^{-27} \quad \text{kg.} \qquad (3.5)$$

وباستخدام العلاقة بين الطاقة والكتلة (معادلة أينشتاين) فإنه يمكن التعبير عن هذه الوحدة بدلالة الطاقة حيث نجد أن :

$$E = m c^2$$

$$\therefore 1 \text{ amu} = 1.660565 \times 10^{-27} \times (2.99792458 \times 10^8)^2 \text{ J}$$

$$= 14.9220 \times 10^{-11} \text{ J}$$

وحيث أن :

$$1 \text{ eV} = 1.602198 \times 10^{-19} \text{ J}$$

فإن :

$$1 \text{ amu} = 931.5016 \text{ M eV} \qquad (4.5)$$

وكما بينا في الباب الثاني فإن كتلة البروتون تساوي 1.00727 و ك ذ وبالتالي فإن :

$$m_p = 1.00727 \text{ amu}$$

$$= 1.67265 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$= 938.27369 \text{ Mev}$$



كما بينا أن كتلة النيوترون تساوي 1.008665 و ك ذ وبالتالي فإن:

$$m_n = 1.008665 \text{ amu}$$

$$= 1.67495 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$= 939.57314 \text{ MeV}$$

كما وجد أن كتلة السكون للإلكترون ($m_e$) تساوي $9.109 \times 10^{-31}$ kg وهذه يمكن التعبير عنها بوحدات الطاقة حيث نجد أن :-

$$m_e = (9.109 \times 10^{-31}) (2.997925 \times 10^8)^2$$

$$= 0.511 \text{ MeV}$$

## 3.5 كثافة المادة النووية ($\sigma_N$) :

تعرف الكثافة عموماً بأنها كتلة وحدة الحجوم أي أن :-

$$\sigma_N = \frac{\text{كتلة النواة (أي نواة)}}{\text{حجمها}}$$

$$= \frac{A \times 1.66 \times 10^{-27}}{\frac{4}{3} \pi R^3}$$

$$= \frac{A \times 1.66 \times 10^{-27}}{\frac{4}{3} \pi (1.2 \times 10^{-15} A^{\frac{1}{3}})^3}$$

$$= \frac{1.66 \times 10^{-27}}{\frac{4}{3} \pi (1.2 \times 10^{-15})^3}$$

$$\cong 2.3 \times 10^{17} \quad \text{kg/m}^3$$

= مقدار ثابت

لاحظ هنا اننا ضربنا عدد الكتلة A في وحدة الكتل الذرية لنحصل على الكثافة بوحدة كجم/متر$^3$ ...

ان ما تحصلنا عليه هو نتيجة غريبة فالكثافة النووية لا تعتمد على نوع العنصر النووي أو المادة . وبالتالي فهي خاصية ذاتية للنواة . وهذه نتيجة تبدو منطقية لأن النواة تتكون أساساً من بروتونات ونيوترونات وهذه جسيمات اولية لا علاقة لها بنوع المادة أو اسم النواة ...!! .

لاحظ أيضاً أن الكثافة النووية ذات قيمة هائلة . فكثافة الماء تبلغ $10^3$ كجم/متر$^3$ بينما كثافة الزئبق تساوي $13.6 \times 10^3$ كجم/م$^3$ .

## 4.5 قياس كتلة النواة :

هناك عدة طرق لقياس كتلة النواة ويعتمد ذلك على استقرارها من عدمه . ويمكن اجمال هذه الطرق في أقسام ثلاثة هي : -

1. مطياف الكتلة Mass Spectrometer
2. التفاعلات النووية والتحلل الاشعاعي .
3. الصيغة شبه التجريبية Semiempirical Mass Formula

وسنتناول كلاً من هذه الطرق بالتفصيل فيما يلي :

### 1 - مطياف الكتلة :

يستخدم مطياف الكتلة لفصل النظائر ولقياس كتلها كما يمكن استخدامه للحصول على عينات نقية من هذه النظائر . وهناك عدة أنواع من هذه المطيافات استخدمها كل من : استون ودامبستر وباين بريدج وجوردن ونير .

وتعتمد جميعا على مبدأ واحد وهو حركة الشحنه الكهربائية في مجال مغناطيسي . فإذا كان لدينا شحنة كهربائية q كتلتها m تتحرك بسرعة قدرها $\upsilon$ ثم دخلت إلى مجال مغناطيسي شدته B (وللسهولة نفترض أنها تتحرك متعامدة على المجال) فسوف تؤثر عليها قوة مغناطيسية $F_m$ تعمل على دوران الشحنة حول خطوط المجال ومن ثم حركتها في مسار دائري نصف قطره R حيث تنشأ قوة طرد مركزي تساوي $m \frac{\upsilon^2}{R}$ وبالتالي فإن : -

$$q \underline{\upsilon} \times \underline{B} = m \frac{\upsilon^2}{R} \qquad (5 . 5)$$

أي أن : -

$$\frac{q B}{\upsilon} = \frac{m}{R} \qquad (5' . 5)$$

فإذا كانت لدينا عينة تحتوي على جسمين مختلفي الكتلة $m_1 , m_2$



ودخل الجسيمان المجال المغناطيسي B بسرعة واحدة $\upsilon$ وبشحنة واحدة q فإن :

$$\frac{q B}{\upsilon} = \frac{m_1}{R_1}$$

$$= \frac{m_2}{R_2} \qquad (6 . 5)$$

أي أن : -

$$\frac{m_1}{R_1} = \frac{m_2}{R_2} = \text{ثابت} \qquad (7 . 5)$$

وبالتالي فإن كلا من الجسمين سيتحرك في مسار خاص به ومن ثم يتجمع عند نقطة معينة ، أي أن الجسمين سوف ينفصلان عن بعضهما البعض .

يبين الشكل (1.5) مطياف باين بريدج في صورته المبسطة . حيث يتم تأيين المادة في مصدر الأيونات وذلك إما بتسخين املاح المادة على شرائح من البلاتين أو بقذف هذه الاملاح بالالكترونات السريعة . ثم تتجه الايونات المنتجة الى منتخب الطاقة Energy Selector الذي يتكون من لوحين معدنيين يوضع عليهما جهد كهربي مناسب .

ويتم تسريع الجسميات الموجبة نحو الالكترود السالب وتكتسب طاقة حركية T (وسرعة $\upsilon$) حيث : -

$$T = \frac{1}{2} m \upsilon^2 \qquad (8 . 5)$$

$$= q V$$

حيث V فرق جهد منتخب الطاقة .

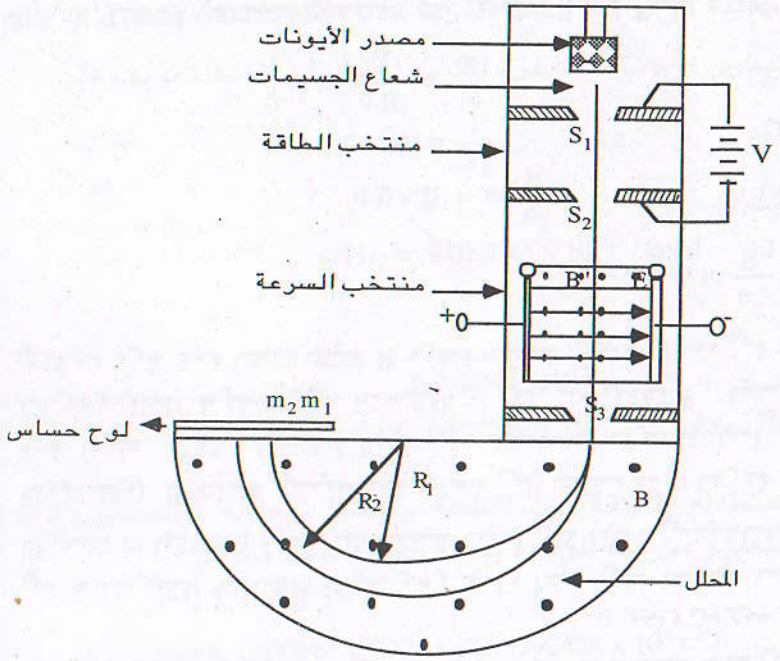
وهكذا تمر الجسيمات المسرعة من الثقبين $S_1 , S_2$ . ثم تدخل هذه الجسيمات الى منتخب السرعة الذي يتكون من مجالين : احدهما كهربي (E) والاخر مغناطيسي (B') متعامدين كل على الاخر . وتقع الجسيمات تحت تأثير هاذين المجالين . وتؤثر القوة الكهربائية $F_e$ على الجسيمات حيث : -

$$F_e = q E \qquad (9 . 5)$$

وتعمل على انحراف الجسيمات نحو اليمين . (كما بالشكل) .

أما القوة المغناطيسية الناتجة($F_B$) فتعمل على انحراف الجسميات نحو اليسار حيث :-

$$F_B = q\,\upsilon\,B' \qquad (10.5)$$




الشكل (1.5) مطياف باين بريدج

فإذا ضبطت القوتان بحيث يمر شعاع الجسيمات دونما انحراف وبالتالي تمر الجسيمات من الفتحة $S_3$ (انظر الشكل) فإن ذلك يعني أن :-

$$F_B = F_E \qquad (11.5)$$

أي أن :-

$$qE = q\,\upsilon\,B'$$

وينتج أن :-

$$\upsilon = \frac{E}{B'} \qquad (13.5)$$

وهذا يعني أن الجسيمات التي تحقق الشرط السابق هي فقط التي



تتمكن من المرور من الثقوب $S_1$ , $S_2$ , $S_3$ . ومن ثم تواصل رحلتها إلى منطقة المجال المغناطيسي B (كما بالشكل) . أي إلى منطقة المحلل Analyser وبالتالي فإن الجسيمات التي تدخل إلى المحلل هي فقط تلك التي لها نفس السرعة $\upsilon$ حتى وإن اختلفت الكتل . وحسب المعادلة (6.5) فإنه اذا كان لدينا نظيرين $m_1$ , $m_2$ فإنه عندما يدخلان المحلل ، يأخذ كل منهما مسارا مختلفا عن الاخر حيث نجد أن :-

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{R_1}{R_2} \qquad (7'.5)$$

وبالتالي يتجمع كل من النظيرين عند نقطتين مختلفتين من اللوح الحساس (حسب قطري المسارين $R_1$ , $R_2$) . ومن ثم يمكن فصل النظيرين عن بعضهما البعض كما ويمكن تقدير نسبة كل إلى الاخر في المادة ، أو يمكن قياس كتلة نظير بالنسبة لكتلة نظير معروف كالكربون -12 .

وهكذا نجد أن هذا الجهاز يمكن أن يزودنا بمعلومات نسبية عن اوزان النظائر .

كما ويمكن حساب كتلة نظير مطلق . وذلك بدلالة كلا من E, B',B حيث نجد أنه باستخدام معادلاتي (13.5) ، (5'.5) يمكن استنتاج أن :-

$$m = qR\,\frac{BB'}{E} \qquad (14.5)$$

كما ويمكن استنتاج m بدلالة جهد منتخب الطاقة V وذلك بحل معادلتي (8.5) ، (5'.5) حيث ينتج أن :-

$$m = qR^2B^2 / 2V \qquad (15.5)$$

وهكذا يمكن باستخدام هذا المطياف قياس كتل معظم المواد المعروفة ومن ثم امكن تبويب هذه الكتل في الجداول الفيزيائية المعروفة .

ولتقدير المسافة بين نقطتي تجمع النظيرين دعنا نكتب معادلة (15.5) على الصورة :-

$$R = \sqrt{\frac{2Vm}{qB^2}}$$

وبتفاضل هذه المعادلة ينتج أن :-

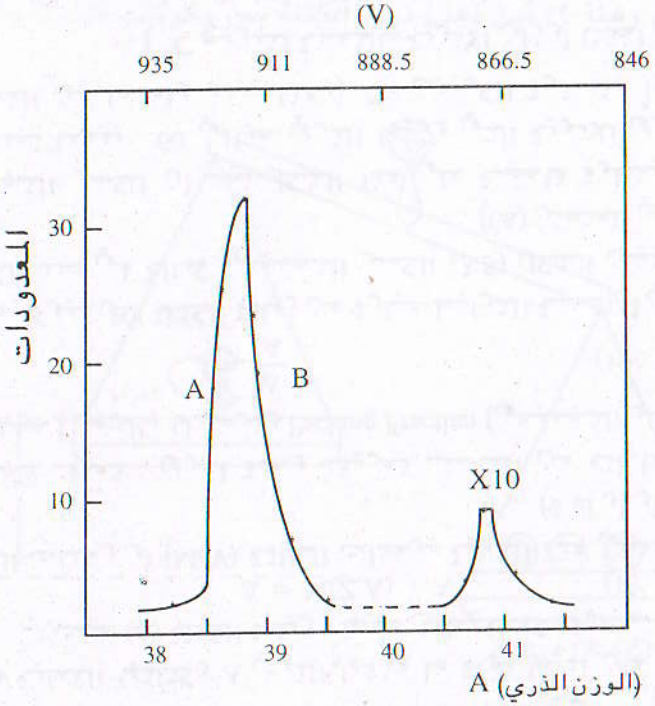
$$dR = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{2V}{qmB^2}}\;dm$$

أي أن :-

$$\frac{dR}{R} = \frac{1}{2}\frac{dm}{m} \qquad (16.5)$$

فإذا كان لدينا جهازا نصف قطره متر واحد فإن المسافة بين نظيري اليورانيوم 235 , 238 ستكون حوالي 0.7 سم .

يبين الشكل (2.5) نظيري البوتاسيوم 41,39 كما يسجلها مطياف دامبستر حيث يتضح لنا التناسب العكسي بين فرق الجهد V والوزن الذري (حسب معادلة 15.5) بينما تبين النسبة بين مساحتي القمتين النسبة بين النظرين إذ تبلغ حوالي 1 : 18 وهذا ما يعطي وزنا ذريا للعنصر يساوي 39.1 وهو ما تؤكده التجارب العملية الأخرى .




الشكل (2.5) نظيري البوتاسيوم 41,39 كما يسجلها مطياف دامبستر .
[A.J. Dampster, Phys. Rev., 22,631 (1922)]



## 2 . التفاعلات النووية والتحلل الاشعاعي :-

قد تكون النواة المراد قياس كتلتها مشعة وذات عمر نصف قصير ومن ثم فإننا لن نستطيع تنفيذ ذلك باستخدام محلل الكتلة ، وبالتالي فإننا في حاجة إلى وسيلة جديدة لعمل ذلك . في الباب الرابع بينا أن فاعلية المادة المشعة تعتمد على كتلتها (معادلة 12.4) ومن ثم إذا أمكن تعيين الفاعلية فإنه يمكن حساب كتلة النواة (M) . كما سنبين في الباب السادس الخاص بالتفاعلات النووية أنه لأي تفاعل نووي يمكن تعريف القيمة Q فإذا أمكن قياس Q (وهذ ممكن في معظم الحالات) فإنه يمكن قياس كتلة نواة معينة بمعلوماتية كتل الأنوية الأخرى الداخلة في التفاعل . حيث نلاحظ أن Q تساوي الفرق في كتل المواد الداخلة في التفاعل والناتجة عنه .

وحيث أنه هناك عدد لا محدود من التفاعلات النووية فإن هذا يعني أنه لدينا كم هائل من كتل الأنوية مما يساعدنا على تقديم معلومات تأكيدية للكتل التي يمكن قياسها ايضا باستخدام محللات الكتل . سنبين في البابين السابع والثامن الكثير من التحولات والتحللات الأشعاعية (تحلل α ، تحلل β ) وكيف يمكن حساب Q ومن ثم حساب الكتل النووية .

## 3 . الصيغة التجريبية :-

تعتبر هذه الصيغة من احدى الطرق التي يمكن بواسطتها حساب كتلة نواة ما . وذلك باعتماد نموذج نووي معين . لقد اقترح هذه الطريقة فون فيزاكر Weizacler عام 1935 . وذلك بكتابة كتلة النواة كدالة في بعض الثوابت التي يمكن ضبطها مع التجربة وبالتالي اطلق على هذه الصيغة تسميتها الشبه تجريبيه . وقد اعتمدت هذه الصيغة على افتراض نموذج بسيط للنواة باعتبارها قطرة سائلة (Liquid drop) (انظر فيما بعد) وحيث أن النواة تتكون من عدد من البروتونات والنيوترونات فإن كتلة النواة M (Z,A) يمكن حسابها من الصيغة التالية :-

$$M(Z,A) = Zm_H + Nm_n - aA + bA^{2/3} + \frac{CZ(Z-1)}{A^{1/3}} + \frac{d(N-Z)^2}{A} \pm \frac{e}{A} + \xi \qquad (17.5)$$

حيث :

$m_H$ ـ كتلة ذرة الهيدروجين (وليست كتلة نواة الهيدروجين)

$m_n$ ـ كتلة النيوترون .

Z,N ـ عدد النيوترونات والبروتونات على الترتيب .

A ـ الوزن الذري للنواة .

و (ξ, e, d, c, b, a) ثوابت يمكن تعيينها من التجربة وبالتالي يمكن تعيين كتلة هذه النواة باستخدام العلاقة السابقة .

## 5.5 زيادة الكتلة : Mass Excess (Δ)

اذا كان لدينا نواة ما وزنها الذري A وكتلتها الفعلية هي M(Z,A) فإننا سنعرف كمية يطلق عليها : زيادة الكتلة (Δ) حيث : ـ

$$\Delta = M(Z,A) - A \qquad (18.5)$$

وتعطى هذه الكمية بوحدات الطاقة (MeV) أو وحدات الكتل الذرية amu أو (و ك ذ) .

كما أنه من المناسب تعريف وحدة أخرى : تعرف نسبة الترابط (الكسر التجميعي) Packing Fractian ونرمز له بالرمز f حيث : ـ

$$f = \frac{\Delta}{A} \qquad (19.5)$$

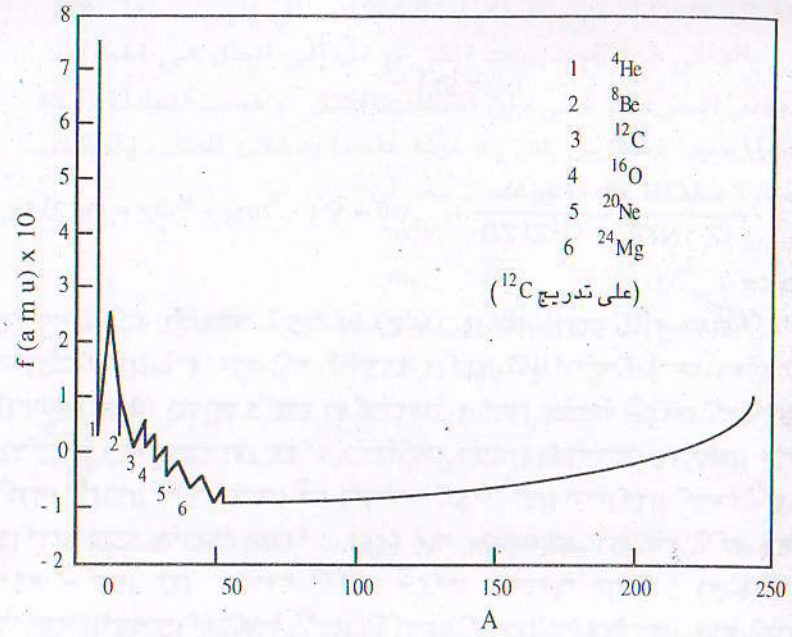
أي أن نسبة الترابط عبارة عن زيادة الكتلة لكل نيوكليون .

ويبين الشكل (3.5) الكسر التجميعي كدالة في عدد الكتلة (الوزن الذري للعنصر (A)) .

وبنظرة فاحصة على هذا الشكل نجد أن للكسر التجميعي قيمة صغرى للانوية التي وزنها الذري حوالي 60 . بينما نجد أنه يساوي صفراً عند ذرة الكربون -12 (وهذا يبدو واضحا من التعريف وذلك لأننا اخذنا أوزان الأنوية بالنسبة لتدريج $^{12}C$) .

كما وأننا نجد أن هذا الشكل يأخذ طبيعة دورية لكل من : $^{24}Mg$ , $^{20}Ne$ , $^{16}O$ , $^{12}C$ , $^{8}Be$ , $^{4}He$ . حيث تهبط قيمة الكسر التجميعي الى قيم صغرى عند الأنوية السابقة . وبالتالي تذكرنا هذه الدورية بالقشور الذرية المقفلة في الغازات الخاملة . ومن ثم يعتبر الكسر التجميعي أحد الشواهد العملية على وجود القشور النووية داخل النواة ، وبالتالي يساهم في ارساء قواعد نموذج القشور النووية (انظر الباب السادس) .






الشكل (3.5) نسبة الترابط (الكسر التجميعي) (f) كدالة في عدد الكتلة A .

كما سنعود الى مناقشة الكسر التجميعي عند الحديث عن طاقة الترابط النووي .

**مثال :**

أوجد كتلة نواة الهيليوم $^4He$ اذا علمت أن $\Delta = 2.4249$ Mev وأن 1 amu = 931.5 MeV

الحل :

$$\Delta = M - A$$

$$\therefore M = \Delta + A$$

$$= 2.4249 + 4x931.5$$

$$= 3732.9049 \text{ MeV}$$

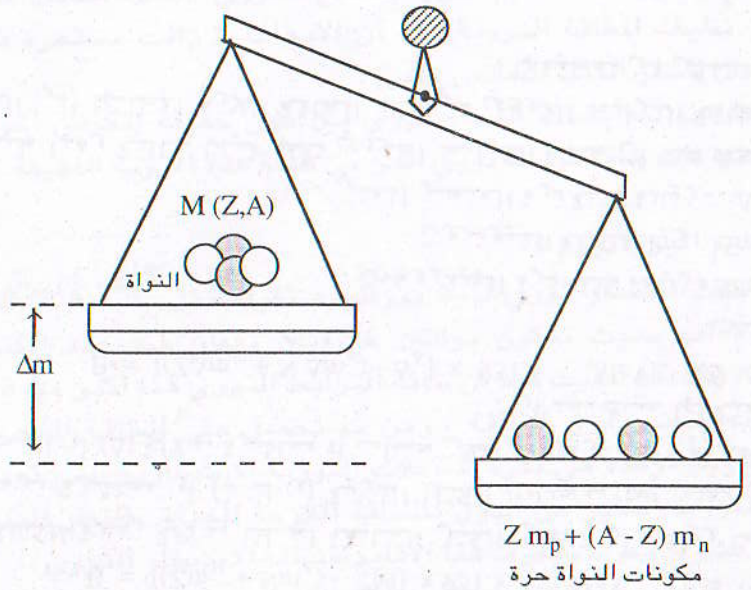
$$= 3728.4313 \times \frac{1.6 \times 10^{-13}}{9 \times 10^{16}} \text{ kg}$$

$$M = 6.6283 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

## 6.5 طاقة الترابط النووي :

## Nuclear Binding Energy (B)

اذا اخذنا عددا من النيوكليونات (البروتونات والنيوترونات) ووزنا كلاً منها منفردة ثم قمنا بتصنيع نواة ما من مجموع هذه النيوكليونات . ثم قارنا وزن النيوكليونات مجتمعة وهي في حالتها الحرة مع وزن النواة التي صنعناها منها جميعا فأننا سنجد أن وزن النيوكليونات الحرة أكبر قليلاً من وزن النواة المركبة من هذه النيوكليونات . ونبين في الشكل (4.5) شكلاً توضيحياً لذلك . يتضح لنا من الشكل أن هناك فرق في الكتلة قدره ($\Delta m$) بين كتلة مكونات النواة وهي في حالتها الحرة وبين كتلة النواة نفسها . ويبدو أن ذلك غريباً لأول وهلة ؟! أين ذهب فرق الكتلة بين مكونات النواة والنواة نفسها ؟




الشكل (4.5) العلاقة بين وزن مكونات النواة والنواة نفسها .

وللإجابة على هذا السؤال ينبغي أولا معرفة حقيقة ما يجري داخل النواة . إن وجود قوى التنافر الكهربي داخل النواة (الناتج فيما بين



البروتونات الموجبة الشحنة) يؤدي الى عدم استقرارها ومن ثم تفتتها واندثار المادة . ولكن استقرار الكثير من الأنوية شاهد على وجود قوة نووية تعاكس القوة الكهربية التنافرية ، ومن ثم تعمل هذه القوة النووية على المحافظة على النواة كوحدة مستقرة . أي أننا نحتاج لبعض الطاقة للمحافظة على النواة . فمن أين يمكن أن تأتي هذه الطاقة ؟ ! إن الكتلة التي نقصت ($\Delta m$) قد تحولت في الواقع الى طاقة ترابط نووي تعمل على ترابط مكونات النواة مع بعضها البعض وليس هذا بغريب فالمادة والطاقة صورتان لشيء واحد .

وبالتالي يمكن هنا أن نعرف طاقة الترابط النووي على أنها الطاقة التي تفقد عند تكوين (تصنيع) النواة من مكوناتها الأساسية (البروتونات والنيوترونات) كما ويمكن تعريفها أيضا على انها الطاقة اللازمة لتفكيك النواة إلى مكوناتها الأساسية . ووفق معادلة أينشتاين فإن :

$$\Delta E = \Delta m\, c^2 \qquad (20 . 5)$$

حيث $\Delta E$ هي الطاقة الناتجة عن تحول الكتلة $\Delta m$ .

فإذا كانت لدينا نواة كتلتها $M(Z,A)$ وكتلة البروتونات الموجودة فيها هي $Zm_p$ (حيث $m_p$ هي كتلة البروتون الواحد) وكتلة النيوترونات الموجودة بها هي $Nm_n$ (حيث $m_n$ هي كتلة النيوترون الواحد) فإن فرق الكتلة $\Delta m$ يعطى بالعلاقة :

$$\Delta m = [(Zm_p + Nm_n) - M(Z,A)] \qquad (21 . 5)$$

لاحظ أن عدد النيوترونات N يساوي $(A - Z)$ .

ومن معادلة (20 . 5) ينتج أن طاقة الترابط النووي B تعطى بالعلاقة :

$$B = [(Zm_p + Nm_n) - M(Z,A)]\, c^2 \qquad (22 . 5)$$

وهذه المعادلة تمكننا من حساب طاقة الترابط النووي لأي نواة لو عرفت كتلتها وكتل مكوناتها .

وقد دونت هذه الكتل النووية في جداول فيزيائية متخصصة . ولكن استعيض احياناً عن كتل الأنوية بكتل الذرات ، ولكن هذا لن يؤثر على قيمة طاقة الترابط النووي التي تعطى في هذه الحالة بالعلاقة :

$$B = [(Zm_H + Nm_n) - {}^{A}_{Z}M]\,c^2 \qquad (23.5)$$

حيث :

$m_H$ - كتلة ذرة الهيدروجين (كتلة البروتون مضافة اليها كتلة الالكترون)

${}^{A}_{Z}M$ - كتلة ذرة العنصر وليست كتلة نواته .

وتقدر هذه القيم بوحدات الكتل الذرية (و ك ذ) وحيث أن هذه الوحدة تعادل 931.5 م أف فإنه يمكن حساب B مباشرة بوحدات الطاقة وذلك من العلاقة :

$$B = [(Zm_H + Nm_n) - {}^{A}_{Z}M] \times 931.5 \quad MeV \qquad (24.5)$$

كما ويمكن أن تعطى الكتل السابقة احيانا بدلالة زيادة الكتلة ($\Delta$) التي تقدر إما بوحدات الكتل الذرية (و ك ذ) أو مباشرة بوحدات الطاقة (م أ ف) . ومن ثم يمكن حساب B مباشرة بدلالة ($\Delta$) أو الوحدات المكافئة لها حيث نجد أن :

$$B = [(Z\Delta m_H + N\,\Delta m_n) - \Delta_A] \times 931.5 \quad MeV \qquad (25.5)$$

حيث :

$\Delta m_H$ - زيادة كتلة ذرة الهيدروجين .

$\Delta m_n$ - زيادة كتلة النيوترون .

$\Delta_A$ - زيادة كتلة ذرة العنصر المعني .

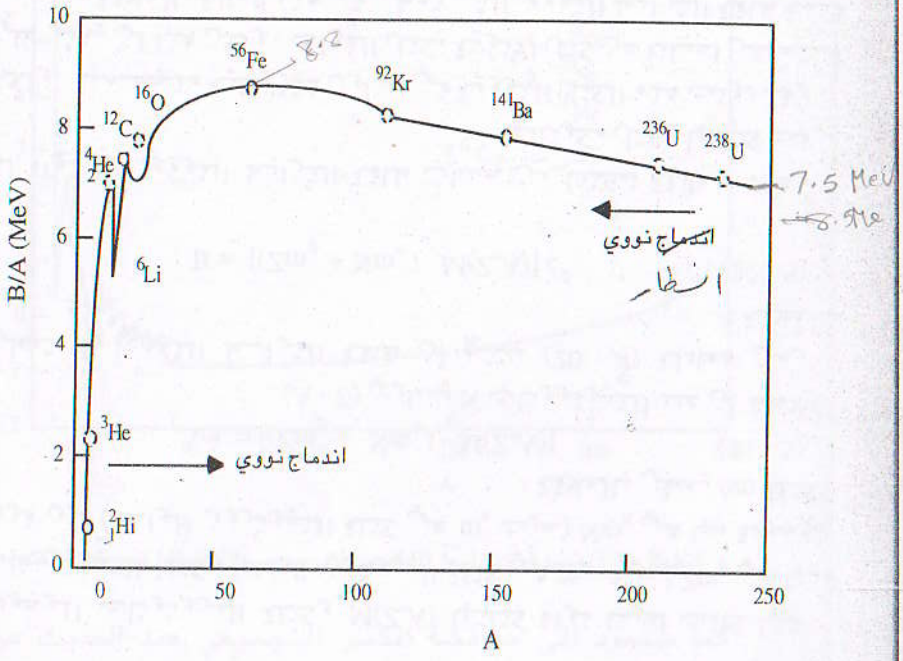
لاحظ هنا أن طاقة الترابط النووي تأخذ قيما سالبة وهذا طبيعي لأن طاقة الترابط النووي هي تلك الطاقة اللازم اعطائها إلى النواة لكي نتمكن من تحطيمها .

## 7.5 طاقة الترابط النووي لكل نيوكليون (B/A) :

من المناسب احياناً حساب طاقة الترابط النووي لكل نيوكليون (B/A) وتساوي خارج قسمة طاقة الترابط النووي الكلية للنواة على مجموع عدد البروتونات والنيوتونات بها (أي عدد الكتلة A) حيث نجد أن هذه القيمة تتراوح بين (7.5 إلى 8.5 م أ ف) لمعظم العناصر ، وذلك باستثناء عدة عناصر خفيفة . يبين الشكل (5.5) متوسط طاقة الترابط النووي/نيوكليون كدالة في عدد الكتلة A . عند القاء نظرة فاحصة على الشكل نجد أن B/A تأخذ قيمة صغيرة للانوية الخفيفة ${}^{2}_{1}H$ (أو



الديوتيريوم) والهيليوم ($^3He$) ثم تقفز فجأة إلى حوالي 7م أ ف عند نواة الهيليوم ${}^{4}_{2}He$ . وهذا يبدو منطقياً . فعندما تكون طاقة الترابط النووي كبيرة فإن هذا يعني أن العنصر مستقر .




الشكل (5.5) متوسط طاقة الترابط النووي/نيوكليون كدالة في عدد الكتلة A .

وهذا ما نشاهده في حالة الهيليوم ${}^{4}_{2}He$ . ثم تبلغ قيمتها العظمى (حوالي 8.8 م أ ف) عند نواة الحديد $^{56}Fe$ «وأنزلنا الحديد فيه بأس شديد ومنافع للناس، صدق الله العظيم» . ثم بعد ذلك تأخذ في الهبوط التدريجي ببطء حتى تصل الى حوالي 7.5 م أ ف عند اليورانيوم 238 وبالتالي نلاحظ من الشكل أن معظم العناصر تتمتع بطاقة ترابط نووي تتراوح بين (7 - 8) م أ ف .

سوف نبين فيما بعد كيف يمكن تفسير ملامح هذا الشكل وذلك في ضوء نموذج القطرة السائلة . ولكن من المناسب هنا أن نبين أن هذا الشكل يعطينا فكرة واضحة عن كيفية استخلاص الطاقة النووية ،

حيث نجد أنه يمكن تقسيم الشكل الى جزئين رئيسيين :

أ - القيم الصغيرة لعدد الكتلة A أو ما سوف نطلق عليه اقليم الديوتيريوم D ($^{2}_{1}H$) .

ب - القيم الكبيرة لعدد الكتلة A أو ما سوف نطلق عليه اقليم اليورانيوم $^{238}U$.

**أ) اقليم الديوتيريوم :**

من الشكل نجد أن B/A للديوتيريوم تساوي حوالي 1 م أف بينما نجد أن طاقة ترابط الهيليوم $^{3}He$ تساوي 2.2 م أف تقريبا . فإذا امكن احداث اندماج نووي بين نواتي ديوتيريوم لتكوين الهيليوم فإن طاقة الترابط النووي/نيوكليون للعنصر الجديد الناتج (الهيليوم) تكون اكبر من طاقة ترابط الديوتيريوم وبالتالي يتحرر فرق الطاقة . وبالتالي يعتبر هذا الاقليم اقليم الاندماج النووي . حيث نحصل على مصدر نظيف للطاقة النووية . إلا أن الابحاث لا زالت مستمرة في هذا المجال (انظر الباب السادس عشر) .

لاحظ هنا أنه يحدث اندماج نووي بين نوى خفيفة لتكوين اخرى اثقل منها ذات طاقة ترابط نووي اكبر من طاقة هذه الانوية الخفيفة .

**ب) اقليم اليورانيوم :**

اذا حدث انشطار نووي لذرة يورانيوم ثقيلة مثل $^{236}U$ (B/A) اقل من 8 م أف بحيث تتكون نواتين خفيفتين تقعان عند عدد الكتلة A ~ 100 (Kr,Ba) ، حيث نجد ان طاقة الترابط النووي هنا اكبر من 8 م أف فإنه يتحرر فرق الطاقة ، ومن ثم نحصل على الطاقة النووية الانشطارية . وهذه هي فكرة المفاعلات النووية الانشطارية التي تعمل حاليا لتزويد الكثير من الدول بالطاقة اللازمة للحياة . (انظر الباب الرابع عشر) . ومن ثم يعرف هذا الاقليم بمنطقة الانشطار النووي .

لاحظ أنه في هذا الاقليم تكون نواة اليورانيوم غير مستقرة لأن طاقة الترابط النووي لكل نيوكليون صغيرة وعند حدوث الانشطار النووي تتحول هذه النواة الى نواتين تقعان عند المنطقة الاكثر استقراراً (انظر الشكل) بطاقة ترابط اكبر من طاقة ترابط النواة المنشطرة .



## 8.5 نموذج القطرة السائلة : Liquid drop Model

نعود الان إلى معادلة (17.5) لنبين كيف استنتجت هذه العلاقة والتي تعرف أحيانا بمعادلة الكتلة بالاضافة الى اطلاق اسم الصيغة الشبه تجريبية عليها . وقد بينا فيما سبق ان طاقة الترابط النووي/نيوكليون تأخذ قيمة ثابتة تقريبا لمعظم العناصر ذات عدد الكتلة الاكبر من 20 (انظر الشكل 5.5) . كما بينا أن المادة النووية ومن ثم الكثافة النووية لا تعتمد على نوع المادة بل هي قيمة ثابتة . إن ما سبق يوحي بأنه يمكن تمثيل النواة بقطرة سائلة غير قابلة للانضغاط Incompressible liquid drop تتمتع بشكل كروي . وهي هنا تتكون من مجموعة من الجسيمات (النيوكليونات) التي تتفاعل فيما بينها تفاعلا قويا Strong interaction وذلك لوجود قوى الترابط النووي بين تلك الجسيمات النووية . ويعرف هذا النموذج للنواة بنموذج القطرة السائلة . ويستطيع أن يفسر الانشطار النووي . إذ أنه عندما يغزو النواة جسيم خارجي - عند قذفها بنيوترون مثلا - فإن النواة تأخذ في الاهتزاز والغليان - كالقطرة السائلة - ويؤدي هذا الاهتزاز المتواصل لها إلى انشطارها - انقسامها - إلى نواتين كل منهما اصغر من النواة الأم المنشطرة .

كما أمكن باستخدام هذا النموذج تقدير نصف قطر النواة كما بينا فيما سبق . ولعل أهم نجاح حظي به هذا النموذج هو استطاعته حساب كتلة النواة وذلك عن طريق علاقة شبه تجريبية Semiemperical تعطى بالعلاقة (17.5) ومن تعريف طاقة الترابط النووي (انظر معادلة 24.5) نجد أنه يمكن اعطاء طاقة الترابط النووي B بالعلاقة :

$$B = a A - b A^{2/3} - \frac{C Z (Z-1)}{A^{1/3}} - \frac{d (N-Z)^2}{A} \pm \frac{e}{A} + \xi \quad (26.5)$$

يمكن تفسير الحدود الواردة في هذه العلاقة بعد ذكر الفروض التالية التي بني عليها نموذج القطرة السائلة :

1. جميع الانوية لها كثافة نووية واحدة (كما ذكرنا فيما سبق) وأن المادة النووية غير قابلة للانضغاط كقطرة السائل ومن ثم فإن نصف قطر النواة R يتناسب مع $A^{1/3}$ . أي أن $R = R_0 A^{1/3}$ (انظر الباب الثاني) .

2. لا تعتمد القوى النووية المؤثرة بين البروتونات أو النيوترونات على الشحنة الكهربية ، وهذه خاصة ذاتية للنواة ... أي أن القوى بين أزواج البروتونات تساوي القوى بين ازواج النيوترونات . وعلى كل حال هناك قوة تنافر كهربية بين البروتونات ولكن هذه القوة ذات مدى كبير بالمقارنة مع القوة النووية ذات المدى القصير كما وأن القوة النووية هي قوة تجاذب كبيرة جدا بالمقارنة مع القوة الكهربية الضعيفة .

3. القوة النووية ذات طبيعة تشبعية Saturated كما هو الحال في الرابطة الكيميائية . حيث يتفاعل النيوكلليون مع عدد محدد من النيوكليونات المحيطة به . وهكذا نجد أن القوة النووية تختلف عن القوى الكهربية بين الشحنات اذ ان الأخيرة تخضع لقانون التربيع العكسي وتعمل عند أي بعد . أما القوة النووية فذات طبيعة تشبعية .

نستطيع الان وفي ضوء ما سبق استعراض كل حد من الحدود الواردة في المعادلة (26.5) .

**1 .الحد الأول (aA) أو حد الحجم :**

بينا في الفرض (3) أن القوة النووية ذات طبيعة تشبعية ، إذ يتفاعل نيوكليون معين مع عدد محدد من النيوكليونات حوله وحيث أن هذا العدد يتناسب مع عدد الكتلة A فإن طاقة ترابط هذا النيوكليون في النواة تتناسب مع A . وتزداد كلما زادت A حتى نصل الى عدد معين وبعد ذلك لا تتأثر هذه الطاقة بزيادة العدد لأنه يتفاعل النيوكليون مع عدد محدد من النيوكليونات حوله . وبالتالي يمثل هذا الحد القيمة الرئيسية لطاقة الترابط النووي . فإذا كان متوسط طاقة ترابط النيوكليون مع النواة هو مقدار ثابت قدره a فإن طاقة الترابط الكلية هي aA .

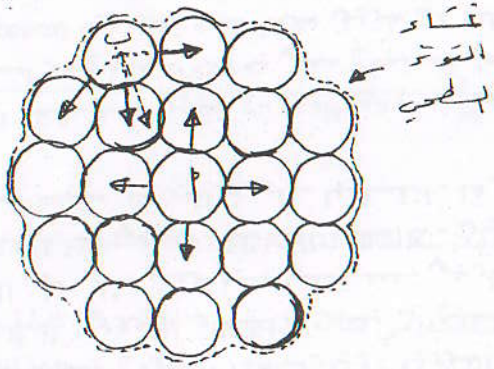
لاحظ أن طاقة الترابط النووي/نيوكليون (B/A) لمعظم الانوية (باستثناء الانوية الخفيفة) تظل ثابتة تقريبا (انظر الشكل 5.4) . وباستخدام هذا الحد فإننا نجد أن $B/A = a$ وهو مقدار ثابت .

لاحظ أيضا أن اشارة هذا الحد موجبة وبالتالي يمثل طاقة الترابط النووي الكلية للنواة .



**2 . الحد الثاني : $(-bA^{2/3})$ أو حد التوتر السطحي :**

يمثل هذا الحد تأثير السطح Surface Effect والاشارة السالبة تعني أن هذا الحد يعمل على انقاص طاقة الترابط ، فعند اعتبار النواة كقطرة سائلة فإننا نجد أن النيوكليونات القريبة من السطح لن تكون محاطة بالنيوكليونات من كافة الجهات كما هو الحال بالنسبة للنيوكليونات الموجودة في قلب السائل . وذلك كما يتضح من الشكل (6.5) . حيث نجد أن النيوكليون (أ) تؤثر عليه النيوكليونات بقوى من جميع الجهات بينما نجد ان النيوكليون (ب) القريب من السطح يحيط به عدد محدد من النيوكليونات ومن ثم تنشأ عليه قوة نووية في اتجاه محدد . وهكذا بالنسبة لباقي النيوكليونات القريبة من السطح مما ينتج عن ذلك قوة توتر سطحي تعمل على جذب هذه النيوكليونات نحو مركز النواة ومن ثم ينشأ الغشاء السطحي كما في السوائل .




الشكل (6.5) تأثير التوتر السطحي في النواة . لاحظ أن طاقة ترابط النيوكليون (أ) مع النواة اكبر من طاقة ترابط النيوكليون (ب) القريب من السطح . حيث تؤثر قوى التجاذب النووي في اتجاه واحد بينما تجد أن النيوكليون أ محاط بالنيوكليونات من جميع الاتجاهات . وهكذا ينشأ غشاء التوتر السطحي على النواة .

وهكذا نجد أن النيوكليونات القريبة من السطح ترتبط مع النواة بطاقة ترابط اقل من مثيلاتها الموجودة في عمق النواة ، ومن ثم تنخفض طاقة الترابط النووي الكلية للنواة بمقدار يتناسب مع عدد هذه النيوكليونات القريبة من السطح والذي يتناسب بدوره مع مساحة سطح النواة (s) فإذا كانت طاقة التوتر السطحي هي $E_s$ فإن :

$$E_s = s\,k$$

حيث k هو معامل التوتر السطحي :

$$= 4\pi R^2 k$$
$$= 4\pi k (r_0 A^{1/3})^2$$
$$= (4\pi k r_0^2) A^{2/3}$$
$$= b A^{2/3} \qquad (27.5)$$

حيث b هو مقدار ثابت يمكن تعيينه من التجربة .

سوف نرى فيما بعد أن قيمة b حوالي 17.8 MeV . ومن ثم فإننا يمكن أن نقدر قيمة k للنواة حيث نجد أن :

$$k \cong 1.5 \times 10^{17} \quad N/m$$

يمكن الان تفسير النقص الكبير في طاقة الترابط النووي/نيوكليون عند عدد الكتلة الصغير (انظر الشكل 5.5) حيث نجد أنه عندما يكون عدد الكتلة صغير فإن عدد النيوكليونات المتواجدة بالقرب من سطح النواة سيكون اكبر كثيرا من عدد النيوكليونات المتواجدة عند سطح النواة الثقيلة (عدد الكتلة A كبير) ومن ثم تنخفض طاقة الترابط النووي لمثل هذه الأنوية الصغيرة .

**3 . الحد الثالث $(-CZ(Z-1)/A^{1/3})$ تأثير كولوم :**

يمثل هذا الحد التأثير الكهروستاتيكي التنافري بين البروتونات المشحونة داخل النواة . حيث يؤدي التنافر الكهربي بين البروتونات الموجبة الشحنة الى خفض طاقة الترابط النووي ، وبالتالي يعطى هذا الحد اشارة سالبة . وحيث أن القوة الكهربية طويلة المدى فإن أي بروتون يتنافر مع جميع البروتونات في النواة وليس تلك البروتونات المحيطة به فقط - كما هو الحال بالنسبة للقوة النووية - ومن ثم فإن قوة التنافر الكهربي تزداد بزيادة العدد الذري Z للنواة وبالتالي تزداد بزيادة عدد الكتلة A . ومن ثم تنخفض طاقة الترابط



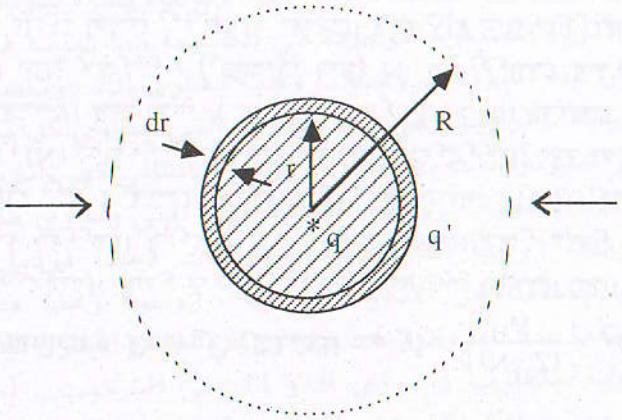
النووي كلما زادت A . وهذا يفسر الانخفاض المشاهد في طاقة الترابط النووي عندما يكون عدد الكتلة A كبيرا (انظر الشكل 5.5) . حيث نجد أن طاقة الترابط النووي/نيوكليون تنخفض باستمرار كلما زادت A حيث تسجل ادنى قيمة لها عند اقليم اليورانيوم ، كما ذكرنا انفاً .

ويمكن حساب طاقة التنافر الكهربي بين البروتونات وذلك باعتبار أن النواة عبارة عن كرة مشحونة بانتظام بشحنة قدرها Ze ومن ثم تعطى كثافة الشحنة σ بالعلاقة :

$$\sigma = \frac{Ze}{\frac{4}{3}\pi R^3} \qquad (28.5)$$

حيث R نصف قطر النواة. والمقدار $\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)$ عبارة عن حجم الكرة.

ويبين الشكل (7.5) توزيع الشحنات على نواة تأخذ شكلا كرويا ، وذلك لغرض حساب الطاقة الكهربية الناتجة عن الشحنات الموجبة في النواة ، حيث نجد أن هناك شريحة سمكها dr تقع على بعد قدره r من مركز النواة وتقع هذه الشريحة خارج كرية نصف قطرها r .




الشكل (7.5) طاقة كولوم الناتجة عن توزيع منتظم للشحنات داخل النواة .

$$\left(q = \frac{4}{3}\pi r^3\sigma \;,\; q' = 4\pi r^2 dr\sigma\right)$$

وتحوي هذه الكرية شحنة قدرها $q = \frac{4}{3}\pi r^3 \sigma$ مركزة عند مركز النواة . أما الشريحة فتحمل شحنة قدرها $q' = 4\pi r^2 dr\,\sigma$ . وبالتالي فإن الطاقة الكهربية الكلية الناتجة عن هذا التوزيع تعطى بالعلاقة :

$$E = \int_0^R \frac{4}{3}\pi r^3 \sigma \cdot 4\pi r^2 \sigma \frac{dr}{r} \qquad (29.5)$$

$$= \frac{16}{15}\pi^2 \sigma^2 R^5 \qquad (30.5)$$

وبالتعويض عن $\sigma$ من معادلة (28.5) ينتج أن :

$$E = \frac{3}{5}\frac{Z^2 e^2}{R} \qquad (31.5)$$

لاحظ أن هذا التعبير للطاقة يحوي كمية زائدة إذ أننا اعتبرنا أن كل بروتون قد وزعت شحنته على السطح الكلي للنواة وهذا غير ممكن. وبالتالي نحتاج الى تصحيح . ويتم ذلك بطرح قيمة الطاقة الذاتية للبروتون الواحد التي يمكن استنتاجها باستخدام معادلة (31.5) حيث :

$$E' = \frac{3}{5}\frac{e^2}{R} \quad (Z=1)$$

وينتج أن هذا التصحيح الناتج عن جميع البروتونات (Z بروتون) يعطى بالعلاقة :

$$E' = \frac{3}{5} Z \frac{e^2}{R}$$

وينتج أن طاقة كولوم المصححة تعطى بالعلاقة :

$$E_C = \frac{3}{5}\frac{Z^2 e^2}{R} - \frac{3}{5} Z \frac{e^2}{R}$$

$$= \frac{3}{5}\frac{e^2}{R} Z(Z-1) \qquad (32.5)$$

وبمقارنة هذه العلاقة مع الحد الثالث في العلاقة (26.5) يمكن استنتاج قيمة c حيث نجد أن :



$$\frac{3}{5}\frac{e^2}{R} Z(Z-1) = \frac{CZ(Z-1)}{A^{1/3}}$$

$$\therefore \quad C = \frac{3}{5}\frac{e^2}{r_0} \qquad (33.5)$$

وحيث أن : $r_0 \approx (1.2 - 1.4)$ F

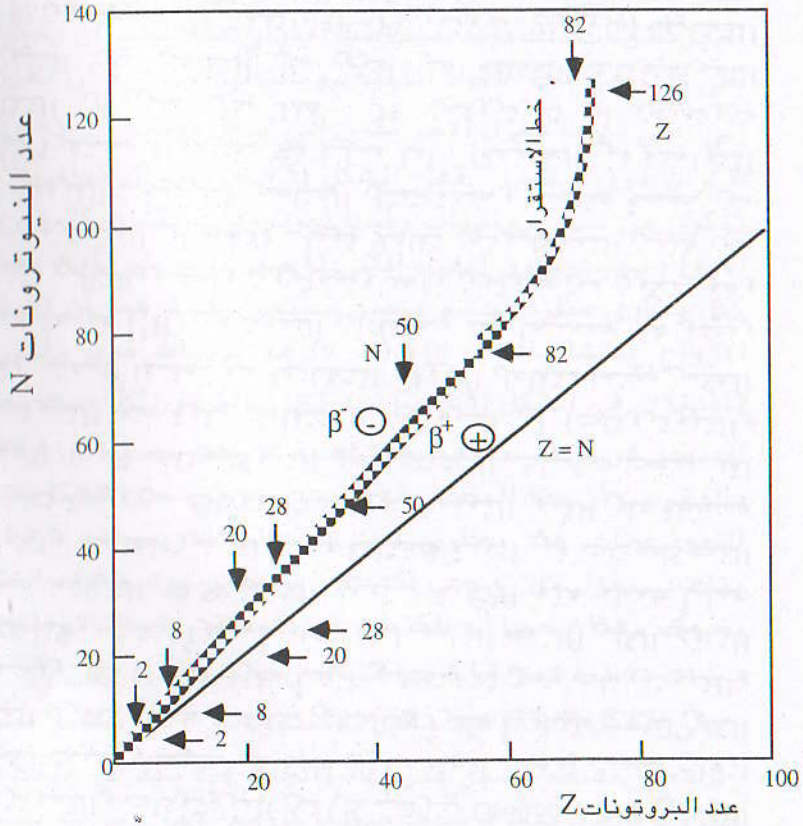
فإن : c تتراوح بين (0.62 - 0.72) م أ ف .

لاحظ أن اشارة هذا الحد هي سالبة مما تعني أنه يؤدي الى تناقص في الطاقة الكلية للنواة ، ويبدو ذلك منطقياً لأن هذه القوة الكهربية قوة تنافر بين الشحنات المتشابهة .

### 4. الحد الرابع $\frac{d(N-Z)^2}{A}$ - أو حد التماثل (Symmetry Energy) :

يمثل هذا الحد العلاقة بين عدد البروتونات Z وعدد النيوترونات N في النواة . وعند رسم العلاقة بين N , Z للأنوية المعروفة نجد أنها تعطى بالشكل (8,5) . حيث نجد أن الانوية المستقرة هي تلك التي يتساوى عندها عدد البروتونات (Z) مع عدد النيوترونات (N) وذلك في حالة الانوية الخفيفة ($A < 40$) . وعندما تزداد A يبدأ خط الاستقرار في التباعد عن خط تساوي N , Z (كما بالشكل) ، ويرجع ذلك الى أنه بزيادة عدد البروتونات فإن قوة التنافر الكهربي بينها تزداد ومن ثم تصبح الانوية غير مستقرة . وللحفاظ على الاستقرار نجد أن عدد النيوترونات N يأخذ في تجاوز عدد البروتونات Z حتى يصل إلى حوالي 1.6 من عدد البروتونات عند الأنوية الثقيلة . كما وأننا نلاحظ أن الأنوية المستقرة تتجمع حول خط الاستقرار المبين . ومعظم هذه الانوية تحتوي على عدد زوجي من كل من البروتونات والنيوترونات (أي انوية زوجية - زوجية even - even) . أما الأنوية على جانبي هذا الخط فهي أنوية غير مستقرة (مشعه) . فالأنوية الواقعة على يمين خط الاستقرار هي انوية تحتوي على مزيد من البروتونات (غنية بالبروتونات) ومن ثم يمكنها أن تتخلص من هذا البروتون الزائد وتطلق اشعة $\beta^+$ (يتحول البروتون إلى نيوترون) وتقترب من خط الاستقرار . (انظر تحلل ß) . أما الأنوية على يسار الخط فهي تمثل تلك الأنوية التي تحتوي على مزيد من النيوترونات (غنية بالنيوترونات)

ومن ثم يمكنها ان تتخلص من هذا النيوترون الزائد وتطلق اشعة $\beta^-$ (يتحول النيوترون الى بروتون) وتقترب من خط الاستقرار (انظر تحلل ß) . أما الأرقام على الشكل فتمثل الاعداد السحرية (انظر الباب السادس).




الشكل (8.5) العلاقة بين N,Z للأنوية المعروفة . الأنوية الواقعة على يمين خط الاستقرار هي انوية مشعه تطلق اشعة $\beta^+$ (تحتوي على المزيد من البروتونات) أما تلك الواقعة على يسار الخط فهي انوية مشعه تطلق اشعة $\beta^-$ (تحتوي على المزيد من النيوترونات) .



وهكذا يتضح لنا ان عدد البروتونات أو النيوترونات له تأثير مباشر على استقرار الأنوية أو عدمه. كما وأن هذا الاستقرار يعتمد على كون هذه الاعداد زوجية أو فردية. (وهذا ما سوف نوضحه فيما بعد) لاحظ أن حد التماثل يساوي صفراً عندما Z = N ؛ وهذا يتفق مع الشكل (8,4) إذ نجد أنه عندما يتساوى عدد البروتونات مع عدد النيوترونات فإننا نحصل على أنوية مستقرة ($A \approx 40$) . أما عندما يختلف هذان العددان فإننا نحصل على أنوية تنخفض طاقاتها النووية بمقدار يتناسب مع (N - Z) وهكذا اعطي هذا المقدار الاشارة السالبة . لاحظ أن A تقع في مقام هذا الحد وبالتالي فإنه في حالة الأنوية الثقيلة تنقص قيمة هذا الحد كلما ازدادت A أي أن تأثير هذا الحد على طاقة الترابط النووي يتناسب عكسياً مع عدد الكتلة A .

**5. الحد الخامس $\pm \frac{e}{A}$ : أو حد التزاوج Pairing Energy Term :**

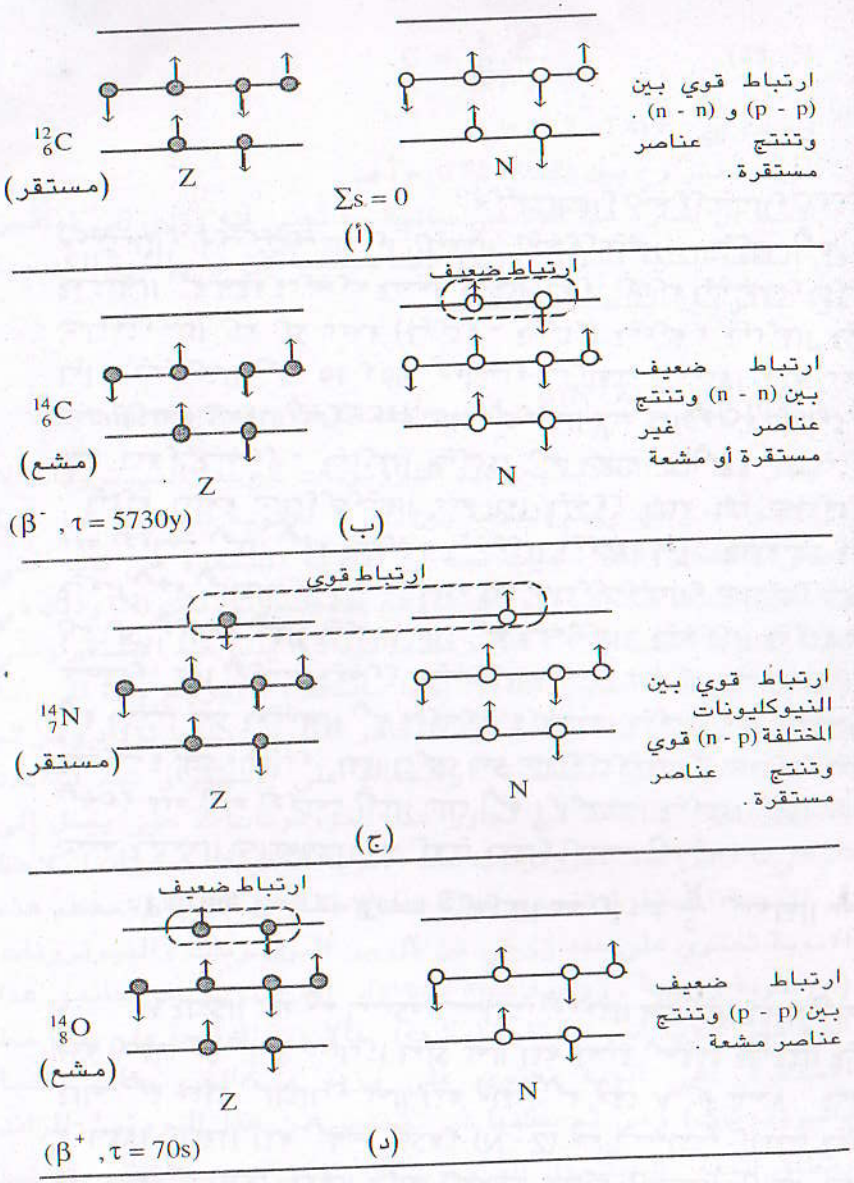
وهو حد تصحيحي محض ولكنه يتفق مع المشاهدات العملية حيث وجد أن اكثر الأنوية استقراراً هي تلك التي تحتوي على عدد زوجي من البروتونات أو النيوترونات كما ذكرنا انفا . وبإلقاء نظرة سريعة على احصاء عدد الأنوية المستقرة الموجودة في الطبيعة كما نبينه في الجدول (1.5) نجد أن عدد الأنوية الزوجية - زوجية يساوي 201 . ونقصد هنا بالأنوية الزوجية - الزوجية هي تلك الأنوية التي يساوي كل من عدد البروتونات والنيوترونات بها عدداً زوجياً . وبالتالي فهي انوية شفعية - شفعية . أما الأنوية الزوجية - فردية فهي التي يساوي عدد البروتونات بها عدداً زوجياً أما عدد النيوترونات فعدداً فردياً ، بالترتيب . وهي تختلف عن الأنوية الفردية - زوجية وهنا عدد البروتونات فردي أما عدد النيوترونات فهو زوجي . ومن الجدول نجد أن عدد هذه الأنوية متقارب ويساوي 69 و 61 على الترتيب . أما الأنوية الفردية - فردية (وترية - وترية) فعدد كل من البروتونات والنيوترونات بها فردي . وهي أنوية خمسة موجودة فقط في الطبيعة وهذه هي أنوية : الهيدروجين الثقيل أو الديوتيريوم والليثيوم والبورون والنيتروجين والتانتليوم .

عدد الأنوية المستقرة المتواجدة في الطبيعة

| نوع النواة | عدد الأنوية |
|---|---|
| زوجي – زوجي | 201 |
| زوجي – فردي | 69 |
| فردي – زوجي | 61 |
| فردي – فردي | 5 ( $^{2}_{1}H$ , $^{6}_{3}L$ , $^{10}_{5}B$ , $^{14}_{7}N$ , $^{180}_{73}Ta$) |

ويمكن تفسير وجود عدد كبير من الأنوية المستقرة عندما يكون عدد البروتونات والنيوترونات زوجياً . وذلك في ضوء اقتران الازواج المتشابهة من النيوكليونات حيث نجد أنه في مستويات الاستقرار الأرضي Ground - State يترتب كل من البروتونات والنيوترونات في ازواج بحيث يتضاد اتجاه مغزل Spin كل منهما وبحيث يكون المغزل الكلي للزوج مساوياً صفراً وبالتالي تتلاشى جميع مغازل البروتونات والنيوترونات ومن ثم يتلاشى أيضاً مغزل النواة ككل ويصبح عزمها الزاوي الكلي (الزخم الزاوي لها) مساوياً صفراً ايضاً . وهذا هو المشاهد عملياً لمعظم هذه الأنوية . يبين الشكل (9.5) الترابط بين ازواج النيوكليونات في انوية مختلفة وذلك لغرض المقارنة واجراء دراسة بسيطة على القوى النووية بين النيوكليونات من وجهة نظر وصفية . لقد بينت دراسات التشتت بين النيوكليونات الحرة (البروتونات والنيوترونات) أن البروتونات تتفاعل بقوة مع النيوترونات أو العكس بينما تتفاعل الازواج المتشابهة مع بعضها البعض بقوة أقل . ويبدو هذا صحيحاً فقد وجدنا أن الديوترون ($^{2}_{1}H$) هو عنصر مستقر وهو يتكون من بروتون واحد ونيوترون واحد وبالتالي فإن التفاعل بين هذين النيوكليونين تفاعلاً قوياً . (لاحظ أن الديوترون هو واحد من خمسة عناصر وحيدة تمثل العناصر الفردية - الفردية المستقرة المتواجدة في الطبيعة) . أما عمليا فلا نجد نواة مستقرة تتكون من بروتونين أو نيوترونين ؟! . هذا يدل على أن التفاعل بين النيوكليونات المختلفة هو أقوى من التفاعل بين النيوكليونات المتشابهة (بروتون - بروتون (P - P) أو نيوترون - نيوترون (n - n)) .






الشكل (9.5) الترابط بين النيوكليونات .

وهذا يضعنا أمام معضلة ، إذا كان الأمر كذلك ، فلماذا يتوفر عدد كبير من الأنوية الزوجية ـ الزوجية المستقرة أما الأنوية الفردية ـ الفردية فنادرة الحدوث ؟!

دعنا نشرح في البداية كيف يتم الترابط بين أزواج النيوكليونات أولاً ينبغي على النيوكليونات كي تتفاعل مع بعضها البعض أن تحتل نفس مستوى الطاقة أي تحتل نفس المستوى الكمي . فإذا تم لزوج من النيوكليونات ذلك فإنه حسب مبدأ باولي مثلاً يجب أن يختلف الزوج على الأقل في أحد الأعداد الكمية ، وبالتالي مثلا نجد أن مغزل احدهما إلى أعلى بينما مغزل الاخر يكون إلى اسفل وينتج أن $\Sigma s = 0$ ويحدث اقتران قوي بينهما . ففي الشكل (9.5 .أ) نجد أن نواة $^{12}_{6}C$ المستقرة تتكون من ست بروتونات وست نيوترونات يقترن كل زوج من هذه الازواج بحيث يكون المغزل الكلي له صفراً ومن ثم يكون مغزل النواة ككل يساوي صفرا وينتج عنصر مستقر . لاحظ هنا أن الارتباط بين الازواج المتشابهة (p - p) و (n - n) هو ارتباط قوي ولكن هل هذه قاعدة؟! . في الشكل (9.5.ب) نجد نظير الكربون $^{14}_{6}C$ حيث نجد أن هذا العنصر هو عنصر مشع ، يطلق اشعة $\beta^-$ بعمر نصف قدره 5730 سنة . بالرغم من أن هذا العنصر هو زوجي ـ زوجي . من الشكل نجد أن عدد النيوترونات هنا يساوي 8 نيوترونات تترتب في أزواج بحيث يتلاشى مغزل كل زوج . ولكن الزوج الأخير يرتبط فيه النيوترونان بضعف وهذا يفسر أن العنصر غير مستقر . وبالتالي فإن الترابط بين (n - n) هنا ليس قويا كما هو الحال بالنسبة للكربون $^{12}_{6}C$ .

في الشكل (9.5.د) نجد نظير الاكسجين $^{14}_{8}O$ وهو عنصر مشع ويطلق $\beta^+$ بعمر نصف قصير قدره 70 ثانية . هنا نجد أن هناك زوجا من البروتونات يرتبط ارتباطا ضعيفا كل مع الاخر ومن ثم ينتج النظير المشع .

لاحظ أنه في الشكل (9.5.جـ) نجد أن هناك زوجا من النيوكليونات عبارة عن بروتون ونيوترون يرتبطان مع بعضهما ارتباطا قويا . حيث يتكون النيتروجين $^{14}_{7}N$ . الذي يمثل أحد خمسة عناصر فردية ـ فردية مستقرة . هنا نجد أن ازواج البروتونات والنيوترونات قد ارتبطت مع بعضها البعض ليكون العزم الكلي لها صفرا . أما



البروتون الفردي والنيوترون الفردي الذين لم يتزاوجا مع مثيليهما فقد ارتبطا مع بعضهما البعض ارتباطا قويا ونتج العنصر المستقر $^{14}_{7}N$ .

وهكذا نجد أنه في النواة لا توجد قاعدة معينة يمكن أن تنطبق عليها جميع الحالات . كما ونلاحظ أنه في حالة الأنوية الثقيلة فإننا نجد أن الارتباط بين الازواج المتشابهة اكبر من مثيله بين الازواج المختلفة . فمثلا نجد أن قوة الترابط بين بروتون ونيوترون تصبح أضعف من الترابط بين زوج من البروتونات . وقد يعزى ذلك الى التعديل الناتج في دالة موجة البروتون نتيجة لقوى كولوم ومن ثم يجد النيوترون نفسه بعيداً عن المستوى المتواجد به البروتون ومن ثم يصبح التفاعل بينهما اقل من مثيله بين بروتونين . وهذا يفسر عدم وجود انوية ثقيلة فردية ـ فردية اكبر من النيتروجين هذا باستثناء $^{180}Ta$ إلا أنه هو أيضا غير مستقر (وبعمر نصف قدره $10^{13}y$) .

مما سبق يتضح لنا أنه يمكن تعيين قيمة الحد $\frac{e}{A}$ للأنوية المختلفة وذلك كما يلي :

1. للأنوية الزوجية ـ زوجية فإن e تأخذ قيمة موجبة . (ويمثل ذلك زيادة في طاقة الترابط النووي) .
2. للأنوية الفردية ـ زوجية أو الزوجية ـ فردية فإن e تساوي صفراً .
3. للأنوية الفردية ـ فردية فإن e تأخذ قيمة سالبة (ويمثل ذلك نقصا في طاقة الترابط النووي وبالتالي يقل عدد الأنوية المستقرة الفردية ـ الفردية في الطبيعة) .

**6. الحد الأخير $\xi$ : أو حد القشرة :**

وهو حد تصحيحي خاص بالأعداد السحرية (انظر الباب السادس) إذ نجد أن الأنوية تتمتع باستقرار كبير عندما يقترب عدد البروتونات أو النيوترونات بها من الأعداد السحرية . وقد وجد أنه عندما يقترب عدد البروتونات أو النيوترونات من الاعداد السحرية فإن $\xi$ تصبح موجبة (ويمثل ذلك زيادة في استقرار النواة ومن ثم زيادة في طاقة الترابط النووي) . هذا الحد ذا تأثير صغير على طاقة الترابط النووي حيث يمكن أحيانا اهماله ، ولكننا ذكرناه هنا بقصد استيفاء الموضوع .

يمكن حساب الثوابت السابقة عن طريق المقارنه مع النتائج العملية وقد وجد أنه يمكن اعطاء طاقة الترابط النووي لمعظم الأنوية بالعلاقة :

$$B = 15.7\,A - 17.8\,A^{2/3} - \frac{0.6\,Z^2}{A^{1/3}} - \frac{20\,(N-Z)^2}{A} \pm \frac{125}{A} \quad (34.5)$$

حيث تقدر B بوحدات م أ ف .

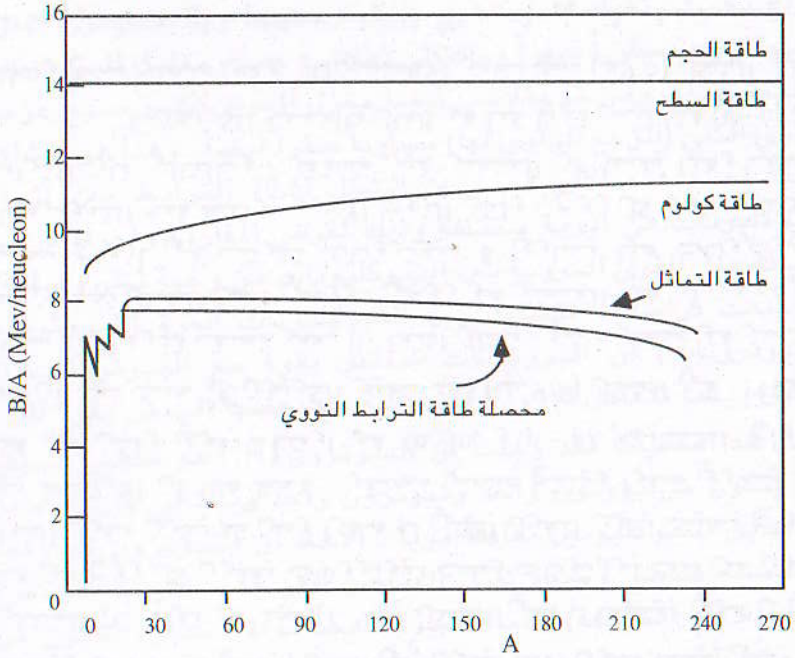
لاحظ أن الحد الأخير :

أ ـ موجب للأنوية الزوجية ـ زوجية .

ب ـ صفر للأنوية الزوجية ـ فردية أو الفردية زوجية .

جـ ـ سالب للأنوية الفردية ـ الفردية .

يبين الشكل (10.5) المساهمات النسبية للحدود المختلفة الواردة في الصيغة شبه التجريبية .




الشكل (10.5) المساهمات النسبية للحدود المختلفة الواردة في الصيغة شبه التجريبية .



## 9.5 تطبيقات على الصيغة شبه التجريبية :

### 1 . القطع المكافىء الخاص بكتل الايزوبارات :

سندرس الان العلاقة (34.5) عند التفاعلات التي تظل فيها A ثابته ونعني بها تحولات اشعة ß . (انظر الباب التاسع) . وهنا فإن طاقة الترابط النووي تصبح دالة فقط في $Z^2$ , Z أي أن :

$$B = aZ + bZ^2$$

حيث b,a ثوابت .

وهذه هي معادلة قطع مكافىء .

لاحظ أنه في حالة الانوية الفردية ـ زوجية أو الزوجية ـ فردية فإن الحد الأخير في المعادلة (34.5) يصبح صفراً . وسوف نتناول حالتين بالتفصيل :

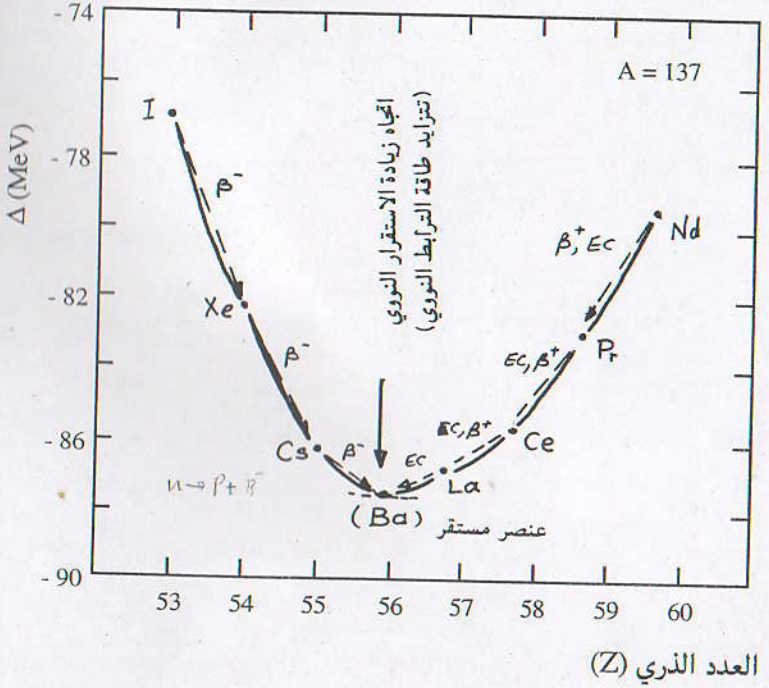
### أ ـ عندما A فردية :

فإننا نحصل على قطع مكافىء واحد . ويبين الشكل (11.5) طاقة الترابط النووي (زيادة الكتلة) كدالة في Z للعناصر ذات A = 137 حيث نجد أن هناك قطعا مكافئا واحدا وذلك حسب المعادلة (34.5) لاحظ هنا أن الأنوية على يمين الشكل هي انوية غير مستقرة وتأخذ في التحلل عن طريق اطلاق اشعة $\beta^+$ والأسر الالكتروني (EC) (حيث تتناقص Z) ، وذلك كي تصل إلى قاع المنحنى حيث توجد العناصر الاكثر استقرارا مثل $^{137}_{56}Ba$ . أما العناصر على يسار الشكل فهي الأخرى غير مستقرة وتتحلل مطلقة اشعة $\beta^-$ (حيث تتزايد Z) في محاولاتها للوصول الى الاستقرار ومن ثم تصل الى الباريوم $^{137}Ba$ . لاحظ هنا أيضا أن طاقة الترابط النووي (ومن ثم Δ) تتزايد باستمرار على يمين ويسار الشكل حتى تصل الى قاع المنحنى عند الباريوم الذي يتمتع بأكبر طاقة ترابط نووي (لاحظ أن اشارة هذه الطاقة بالسالب لأنها طاقة ترابط) .

### ب ـ عندما A زوجية :

يمكن أن نحصل على هذه النواة بطريقتين : إما عندما تكون

الأنوية فردية ـ فردية أو زوجية ـ زوجية . وبالتالي نتوقع أن نحصل على قطعين مكافئين (وذلك حسب قيم الحد الأخير في العلاقة 34.5) .

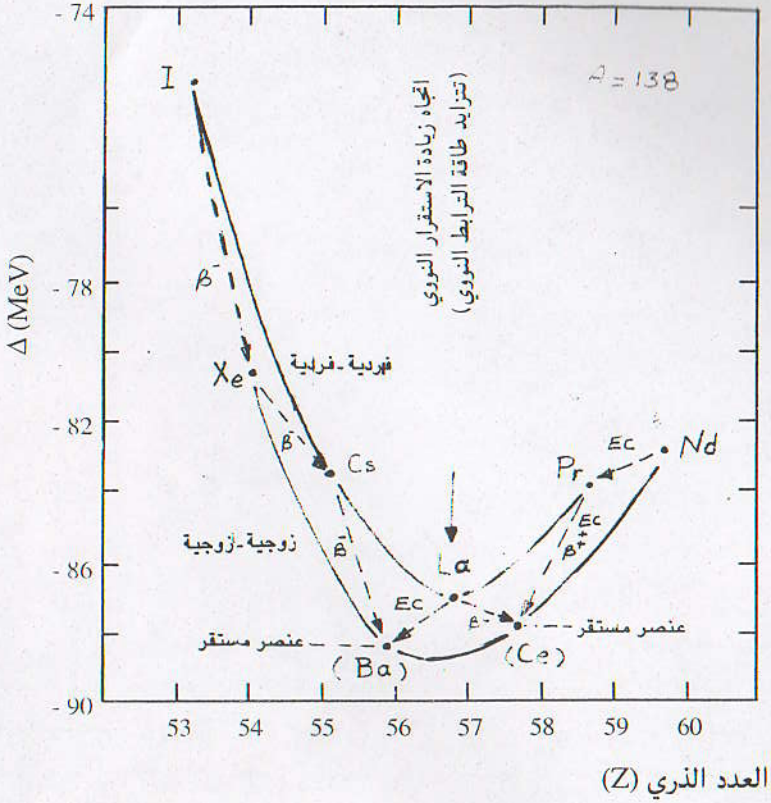



الشكل (11.5) طاقة الترابط النووي (زيادة الكتلة) كدالة في العدد الذري (Z) للعناصر ذات A = 137 . (لاحظ أنه يمكن الحصول على طاقة الترابط النووي بالتعويض في معادلة 34.5)

يبين الشكل (12.5) طاقة الترابط النووي كدالة في العدد الذري Z للعناصر ذات A = 138 . حيث نجد أن هناك قطعين مكافئين احدهما للأنوية الفردية ـ الفردية والاخر الخاص بالأنوية الزوجية ـ الزوجية



حيث نجد أن الأنوية الزوجية ـ الزوجية تقع تحت الأنوية الفردية ـ الفردية (لماذا ؟!) .




الشكل (12.5) طاقة الترابط النووي كدالة في العدد الذري Z للعناصر ذات A = 138 .

كما ونلاحظ أن الأنوية تنتقل من أحد القطعين الى الاخر . وهي تطلق أشعة ß الموجبة أو السالبة والتحول الداخلي ... ويستمر ذلك حتى تصل الأنوية الى قاع المنحنى حيث نحصل على اكثر العناصر استقرارا . يلاحظ هنا وجود عنصرين مستقرين عند منحنى الأنوية

الزوجية - الزوجيه وهما عنصري Ba , Ce . حيث تبلغ طاقة الترابط النووي عند هاذين العنصرين قيمة عظمى (يمثل هذان العنصران قاع المنحنى) .

ويمكن استنتاج قيمة $Z_{min}$ الصغرى للعنصر الذي يقع عند قاع المنحنى وذلك بمفاضلة معادلة (34.5) بالنسبة للعدد الذري Z (بحيث تظل A ثابتة) ومساواة التفاضل بالصفر وينتج أن :

$$Z_{min} = \frac{40\,A}{0.6\,A^{2/3} + 80} \qquad (35\,.\,5)$$

ويمكنك الان اجراء اختبار بسيط وذلك بحساب $Z_{min}$ لكل من= A 138 و A = 137 .

**2 . خط الاستقرار النووي :**

يبين الشكل (8.5) العلاقة بين N , Z للأنوية المعروفة . ويمكن الان استنتاج العلاقة التي تصف هذا الشكل باستخدام الصيغة شبه التجريبية المبينة بمعادلة (17.5) التي يمكن أن نكتبها الان على الصورة التالية :

$$M(Z,A) = Z\,m_H + (A - Z)\,m_n - aA + bA^{2/3} + C\frac{Z^2}{A^{1/3}} + \frac{d\,(N - Z)^2}{A} \pm \frac{e}{A}$$

بمفاضلة هذه المعادلة بالنسبة للعدد الذري Z ووضع الناتج مساويا للصفر ينتج أن :

$$\frac{\partial M}{\partial Z} = m_H - m_n + 2C\frac{Z}{A^{1/3}} - \frac{2d\,(N - Z)}{A} = 0 \qquad (36\,.\,5)$$

وحيث أن $(m_H - m_n)$ تساوي تقريبا صفرا فإنه يمكن استنتاج أن :

$$Z = \frac{N}{1 + \frac{c}{d}A^{2/3}} \qquad (37\,.\,5)$$

تبين هذه العلاقة أن Z تتناسب مع N ومن ثم تصف هذه العلاقة خط الاستقرار النووي المبين بالشكل (8.5) .

ويمكن ضبط النسبة $\frac{c}{d}$ من الشكل بحيث تعطى أفضل تمثيل للشكل (8.5) حيث نجد أن :



$$\frac{c}{d} = 0.03 \qquad (38\,.\,5)$$

وبالتالي يمكن كتابة معادلة (37.5) على الصورة :

$$Z = \frac{N}{1 + 0.03\,A^{2/3}} \qquad (39\,.\,5)$$

وباستخدام قيمة C التي تتراوح بين 0.62 , 0.72 فإنه يمكن حساب قيمة الثابت d حيث نجد أن هذه القيمة تتراوح بين (20 , 23) م أ ف .

يتضح من المعادلة (37.5) أنه عندما تكون A صغيرة فإن $Z \cong N$ وهذا يمثل بداية المنحنى (8.5) حيث يتساوى عدد البروتونات مع عدد النيوترونات لتحقيق استقرار النواة . أما عندما تأخذ A في الزيادة (اكبر من 40) فإن قيمة الحد تأخذ في الزيادة ومن ثم تبدأ N في الابتعاد عن Z لتحقيق الاستقرار النووي . ويمكن أن ننظر إلى هذه النقطة من وجهة نظر فيزيائية ، اذ يبدو أن هناك تنافسا بين طاقة التنافر الكهربية (الممثلة بالثابت C) وطاقة التماثل (الممثلة بالثابت d) . وعندما تزداد A وتزداد Z فإنه يلزمنا اضافة المزيد من النيوترونات التي تعمل كعازل بين البروتونات ومن ثم تعمل على التخفيف من قوة التنافر الكهربية بين هذه البروتونات .

## مسائل على الباب الخامس

1. احسب سرعة بروتون عندما يدخل مجالا مغناطيسيا شدته 2 تسلا اذا علمت أنه يدور في مسار نصف قطره 0.8 متراً .

2. اذا استخدم مطياف كتلة لفصل نظيري اليورانيوم 235 , 238 عن بعضهما البعض وذلك بتأيين كل منهما حيث يتسارعان نحو مصعد جهده 100 KV ثم يدخلان إلى مجال مغناطيسي شدته 5 تسلا أوجد المسافة بين نقطتي تجمع النظيرين .

3. احسب طاقات الترابط النووي/نيوكليون لكل من الأنوية التالية :
$^{235}_{92}U$ , $^{238}_{92}U$ , $^{232}_{90}Th$ , $^{12}_{6}C$ , $^{2}_{1}H$ , $^{3}_{1}H$ , $^{6}_{3}Li$ , $^{57}_{26}Fe$

4. باستخدام الصيغة الشبه تجريبية احسب كتل الأنوية التالية :
$^{16}_{8}O$ , $^{137}_{55}Cs$ , $^{239}_{94}Pu$

5. اوجد طاقة التوتر السطحي لنواة الرصاص ـ 207 .

6. احسب طاقة ترابط النيوترون عندما يؤسر بواسطة : أ) نواة $U^{235}$ ب) نواة $U^{238}$. قارن هذه الطاقة بمتوسط طاقة الترابط النووي/نيوكليون .

7. باستخدام الصيغة الشبه تجريبية . اثبت انه للأنوية المرآتية فإن:

$$[M(Z_1,A) - M(Z_2,A)] = (m_n - m_H) + (Z_1 - 1)\frac{6e^2}{R}$$

حيث :

$$Z_1 = Z_2 + 1$$

8. باستخدام الصيغة الشبه تجريبية ، احسب النسب المئوية لمساهمات كل من : الطاقة الحجمية ، طاقة التوتر السطحي ، طاقة التنافر الكهربي وطاقة التماثل في طاقة الترابط



النووي/نيوكليون لنواتين عددي كتلتيهما : A = 50 , 235 .

9. تطلق الأنوية المرآتية التالية اشعة $\beta^+$ بطاقة عظمى مبينه قرين كل منها :

| | | |
|---|---|---|
| $^{11}_{6}C \longrightarrow {}^{11}_{5}B$ | 0.97 | MeV |
| $^{13}_{7}N \longrightarrow {}^{15}_{6}C$ | 1.18 | MeV |
| $^{15}_{8}O \longrightarrow {}^{15}_{7}N$ | 1.73 | MeV |
| $^{17}_{9}F \longrightarrow {}^{17}_{8}O$ | 1.75 | MeV |
| $^{23}_{12}Mg \longrightarrow {}^{23}_{11}Na$ | 3.09 | MeV |
| $^{25}_{13}Al \longrightarrow {}^{25}_{12}Mg$ | 3.24 | MeV |

باستخدام معادلة (12.9 , 12'.9) التي تبين العلاقة بين الطاقة العظمى لتحلل $\beta^+$ وفرق الكتل . ارسم العلاقة بين :
$[M(Z_1,A) - M(Z_2,A)]$ و $Z_1 - 1$ (انظر المسألة رقم (7)) . لهذه الأنوية .
من الرسم أوجد قيمة ثابت نصف القطر $R_0$ للنواة (بافتراض أنها كرة مشحونة بانتظام) .

10. باستخدام الصيغة شبه التجريبية : احسب طاقة ترابط جسمات $\alpha$ المنطلقة من كل من : $U^{235}$ , $U^{238}$.

11. اثبت أنه يمكن اعطاء طاقة الترابط النووية/نيوكليون بالعلاقة :

$$\frac{B}{A} = -0.0082 + f - 0.0004\frac{A-2Z}{A}$$

حيث f هو الكسر التجميعي .

12. باستخدام العلاقة (36.5) اثبت أنه باهمال الحد الخاص بقوة كولوم فإن اكثر الانوية استقراراً هي تلك التي يتساوى فيها عدد البروتونات مع عدد النيوترونات .

13. اثبت انه باستخدام معادله (36.5) وباهمال الحد الخاص بالتماثل فإن اكثر الأنوية استقرار هي الأنوية المتكونة فقط من النيوترونات .

14. تبين المعادلة (34.5) أن طاقة التوتر السطحي تصبح كبيرة الأثر في حالة الأنوية الخفيفة . بينما تصبح طاقة كولوم كبيرة الاثر في حالة الأنوية الثقيلة . أما عندما يتم الأخذ في عين الاعتبار هاتين الطاقتين فإنه عند قيمة معينة لعدد الكتلة A تصبح النواة اكثر استقراراً . أوجد بالتقريب هذه النواة .
ثم قارن ذلك بالقيمة الصغرى التي يبينها الشكل (3.5) الذي يوضح الكسر التجميعي كدالة في A.



# الباب السادس
# التركيب النووي والنماذج النووية

**مقدمة:**

نتناول في هذا الباب التركيب النووي والنماذج النووية وسوف نركز اهتمامنا على أهم النماذج النووية التي تبين لنا صورة النواة والتي تفسر بعضا من الظواهر النووية الكثيرة. وهناك في الواقع أعداد كثيرة وكبيرة من النماذج النووية التي تبين مدى اهتمام العلماء بدراسة النواة والتي لم يحظ حتى الأن واحد منها بالنجاح الشامل. فلا زالت المحاولات تترى لمعرفة ما يجب معرفته عن النواة وكنهها.

## 1.6 نموذج القشور النووية Shell Model

ينظر إلى النواة هنا على انها تتكون من النيوكليونات التي تترتب في أغلفة معينة مثلها في ذلك مثل الأغلفة الذرية للالكترونات. ويتحرك كل نيوكليون حركة مستقلة عن الأخر ولكنها جميعا تتحرك في المجال (الجهد) النووي الناتج عنها جميعا أيضا. (أنظر الشكل 3 . 1). لقد لوحظ أن بعض الأنوية تتمتع باستقرار كبير وهذه هي الأنوية التي تحتوي على عدد من البروتونات أو النيوترونات يساوي الأرقام التالية:

126 , 82 , 50 , 28 , 20 , 8 , 2

والتي أطلق عليها: الأرقام السحرية Magic Numbers.

لقد وجد أن هناك قطع في طاقة الترابط النووي الخاصة بأخر نيوترون مضاف إلى النواة عند الأعداد السحرية السابقة. وذلك كما يتضح من الشكل (6 . 1) حيث نجد أن طاقة ترابط النيوترون تأخذ قيماً معينة تزداد بزيادة عدد النيوترونات حتى تصل قيمتها العظمى عند العدد السحري ثم تهبط فجأة بعده مباشرة إلى قيم صغيرة حيث تعاود الكرة مرة أخرى لتبلغ قيمة عظمى أخرى عند عدد سحري أخر وهكذا.