

I. التكافؤ كتلة-طاقة

• طاقة الكتلة

خاصية

تمثل الكتلة شكلا من أشكال الطاقة يسمى طاقة الكتلة.
طاقة الكتلة هي الطاقة التي يتوفر عليها كل جسم - حتى ولو كان في سكون-

$$E = mc^2 \quad (J)$$

بسبب كتلته فقط و تعبيرها:

$$c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

حيث c سرعة انتشار الضوء:

- إذا كان الجسم في حركة فإنه يتوفر علاوة على ذلك، على طاقة حركية.
- يترتب عن هذه العلاقة أن كل تغير يحصل في طاقة مجموعة يقابله تغير في كتلتها، والعكس

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

صحيح. العلاقة بين التغيرين هي:

على السلم الذري أو النووي يعبر عن الطاقة بوحدة مناسبة تسمى "الإلكترون - فولط" (eV)

$$1 \text{ eV} = 1,6.10^{-19} \text{ J}$$

أو مضاعفها "الميغا إلكترون - فولط" (MeV):

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,6.10^{-13} \text{ J}$$

• مثال: طاقة الكتلة لبروتون كتلته $m_p = 1,673.10^{-27} \text{ kg}$ هي:

$$E = 1,673.10^{-27} \times (3.10^8)^2 = 1,5.10^{-10} \text{ J}$$

$$E = \frac{1,5.10^{-10}}{1,6.10^{-13}} = 937,5 \text{ MeV}$$

II. طاقة الربط لنواة

• النقص الكتلي

تجريبيا يلاحظ أن كتلة نواة الذرة هي دائما أصغر من مجموع كتل النويات المكونة لها.

الفرق بينهما يسمى النقص الكتلي للنواة، و تعبيره:

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_X$$

حيث: m_X : كتلة النواة، m_p : كتلة بروتون، m_n : كتلة نوترون.



$$\Delta m > 0$$

على السلم الذري أو النووي يعبر عن الكتلة بوحدة مناسبة تسمى "وحدة الكتلة الذرية" (u):

$$1u = \frac{1}{12} \times m(^{12}_6\text{C}) = \frac{M(^{12}_6\text{C})}{12 \times N_A} = 1,66054.10^{-27} \text{ kg}$$

• **مثال:** النقص الكتلي لنواة الهليوم ${}^4_2\text{He}$ هو: $\Delta m = 5,038 \cdot 10^{-29} \text{ Kg}$

$$\Delta m = \frac{5,038 \cdot 10^{-29}}{1,66054 \cdot 10^{-27}} = 0,03034 \text{ u} \quad \text{أي:}$$

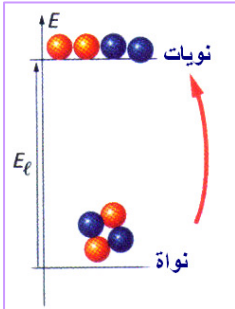
تستعمل أيضا وحدة أخرى للكتلة وهي MeV / c^2 بحيث: $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV} / c^2$

• طاقة الربط لنواة

هي الطاقة اللازم منحها لنواة في حالة سكون لتفتيتها إلى نويات منفصلة و في

تعريف

$$E_\ell = \Delta m \cdot c^2 \quad \text{سكون. و تعبيرها هو:}$$



عكسيا حين تتكون نواة انطلاقا من نويات منفصلة تتحرر الطاقة E_ℓ .

• **مثال:** طاقة الربط لنواة الهليوم ${}^4_2\text{He}$ هي:

$$E_\ell = 0,03034 \times 931,5 = 28,26 \text{ MeV}$$

• طاقة الربط لنوية

$$\frac{E_\ell}{A}$$

هي طاقة الربط المتوسطة لنوية و تساوي النسبة التالية:

تعريف

• **مثال:** طاقة الربط لنوية تمثل الطاقة الضرورية لانتزاع نوية واحد من النواة.

و تستعمل لمقارنة النويدات من حيث استقرارها: كلما كانت مرتفعة كلما كانت النواة مستقرة أكثر.

• **مثال:**

$$\frac{E_\ell}{A} = \frac{492}{56} = 8,79 \text{ MeV} / \text{nucleon} \quad \leftarrow \quad E_\ell = 492 \text{ MeV} \quad \text{هي: } {}^{56}_{26}\text{Fe} \text{ الحديد}$$

$$\frac{E_\ell}{A} = \frac{1802}{238} = 7,57 \text{ MeV} / \text{nucleon} \quad \leftarrow \quad E_\ell = 1802 \text{ MeV} \quad \text{هي: } {}^{238}_{92}\text{U} \text{ اليورانيوم}$$

نواة الحديد 56 أكثر استقرارا من نواة اليورانيوم 238.

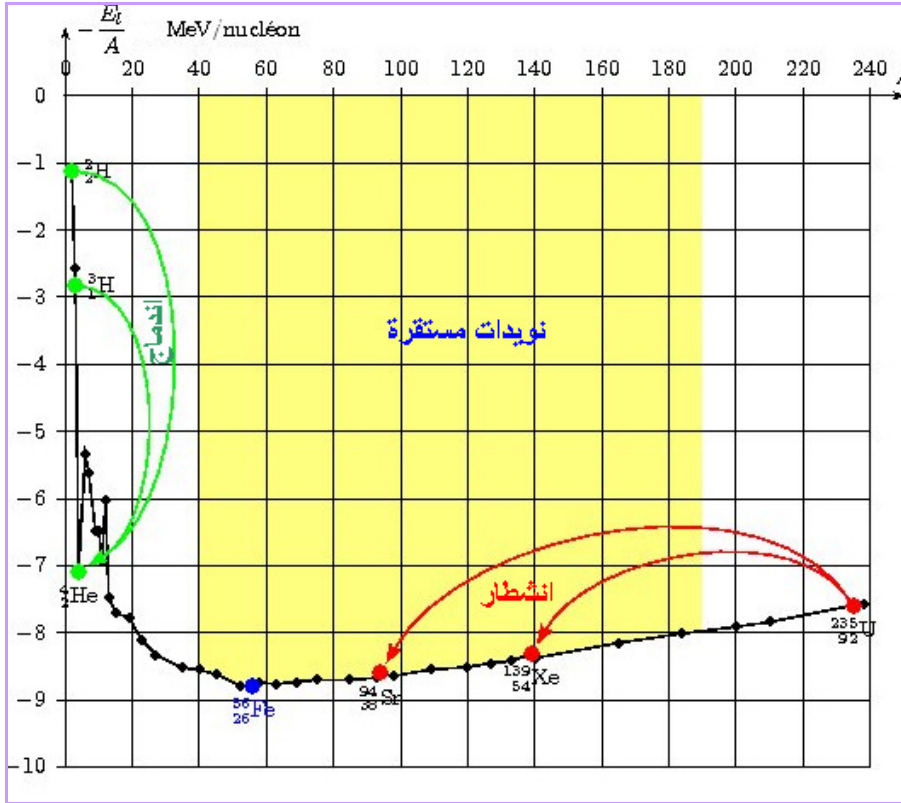
• منحنى "أسطون"

تتغير طاقة الربط المتوسطة لنوية بدلالة عدد الكتلة A للنواة.

يمثل منحنى أسطون تغيرات مقابل طاقة الربط المتوسطة لنوية بدلالة عدد الكتلة.

في هذا المنحنى الحالة المرجعية للطاقة ($E=0$) هي حالة نويات منفصلة و في سكون.

يوافق أكبر استقرار القيمة الدنيا للمنحنى أي القيمة القصوى لطاقة الربط المتوسطة لنوية.



أهمية المنحنى:

- يمكن المنحنى من مقارنة النويدات من حيث استقرارها:
- في المجال $40 \leq A \leq 190$ تقع النويدات المستقرة التي لها طاقة ربط متوسطة عليا: $E_b/A \approx 8 \text{ MeV / nucleon}$
- على طرفي المبيان تقع النويدات الأقل استقرارا وهي نوعان:
 - نويدات ثقيلة يمكنها أن تنشط إلى نواتين أخف منها و أكثر استقرارا مع تحرير طاقة.
 - نويدات خفيفة يمكنها أن تندمج لتعطي نويدة أثقل منها مع تحرير طاقة.

III. الانشطار و الاندماج النوويان

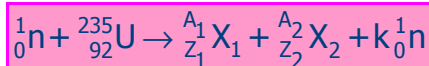
• الانشطار النووي

هو تفاعل نووي محرّض خلاله تنقسم نواة ثقيلة و قابلة للانشطار إلى نواتين خفيفتين وذلك تحت تأثير اصطدامها بنوترون طاقته الحركية لا تتعدى $0,1 \text{ MeV}$ (ما يسمى نوترونا حراريا). هذا التفاعل ناشر للطاقة.

تعريف

• انشطار اليورانيوم 235

يعتبر اليورانيوم 235 النوية الطبيعية الوحيدة القابلة للانشطار و معادلة الانشطار العامة هي:

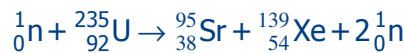


عموما العدد k يتراوح بين 1 و 3 نوترونات.

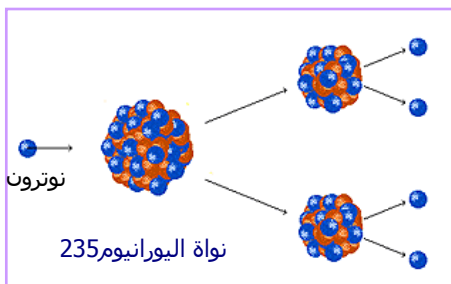
قانونا الانحفاظ يفرضان العلاقتين التاليتين:

$$\begin{cases} A_1 + A_2 + k = 236 \\ Z_1 + Z_2 = 92 \end{cases}$$

• مثال:



• التفاعل المتسلسل



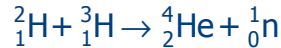
يمكن للنوترونات المنبعثة خلال انشطار أن تحدث بدورها انشطار نوى أخرى. إذا كان عدد النوترونات المنبعثة خلال كل انشطار أكبر من 1 فإنه يحدث تفاعل متسلسل.

• الاندماج النووي

تعريف

هو تفاعل نووي محرّض خلاله تندمج نواتان خفيفتان فتنتج نواة أثقل.
و هو تفاعل ناشر للطاقة.
هذا التفاعل لا يحدث إلا عند درجة حرارة مرتفعة جدا (10^8 K) لذلك فهو يسمى تفاعلا نوويا حراريا.

• **مثال:** اندماج نظائر الهيدروجين الذي هو مصدر طاقة الشمس:



IV. حصة الكتلة و الطاقة

• الطاقة التي يحررها تفاعل نووي

• تعبيرها باستعمال تناقص الكتلة

الطاقة التي يحررها تفاعل نووي معادلته:

$${}^{A_1}_{Z_1}\text{X}_1 + {}^{A_2}_{Z_2}\text{X}_2 \rightarrow {}^{A_3}_{Z_3}\text{X}_3 + {}^{A_4}_{Z_4}\text{X}_4$$

توافق تناقص الكتلة الإجمالية Δm للمجموعة و تعبيرها هو:

حيث:

$$\Delta m = (m_{X_3} + m_{X_4}) - (m_{X_1} + m_{X_2})$$

👉 $\Delta m < 0 \leftarrow \Delta E < 0$: المجموعة تحرر (تفقد) طاقة.

• **مثال:** لنحسب الطاقة التي يحررها تفاعل الاندماج ذو المعادلة:

$${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$$

معطيات: $m_n = 1,009 \text{ u} / m_{{}^4_2\text{He}} = 4,003 \text{ u} / m_{{}^3_1\text{H}} = 3,016 \text{ u} / m_{{}^2_1\text{H}} = 2,014 \text{ u}$

تناقص الكتلة الإجمالية هو:

$$\Delta m = (m_{{}^4_2\text{He}} + m_n) - (m_{{}^2_1\text{H}} + m_{{}^3_1\text{H}}) = -0,018 \text{ u}$$

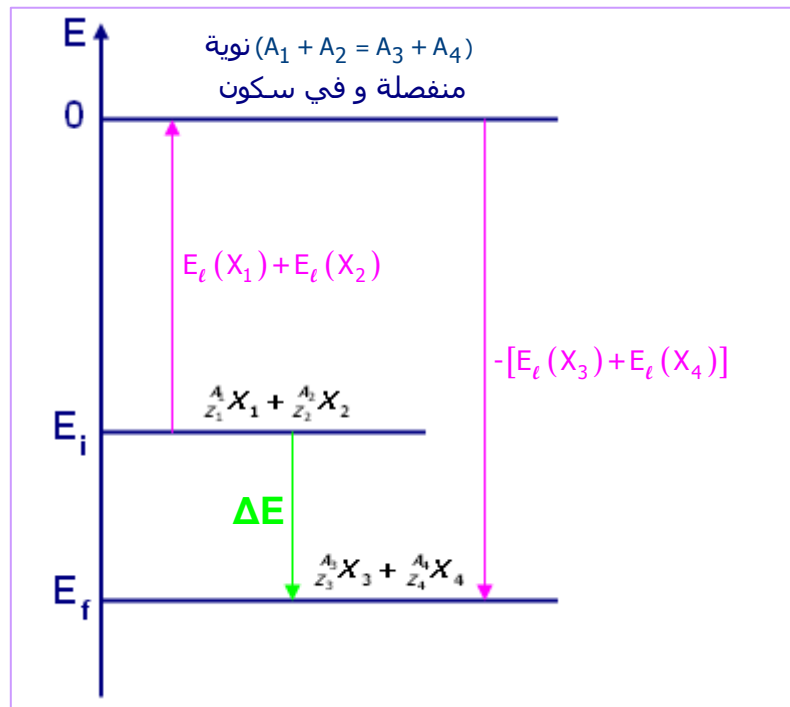
و الطاقة المحررة هي:

$$\Delta E = -0,018 \times 931,5 \approx -17 \text{ MeV}$$

التفاعل ينشر طاقة تساوي 17 MeV عن كل نواة هليوم ناتجة.

• تعبيرها باستعمال طاقات الربط

ننجز مخططا طاقيا لتفاعل نووي معادلته:

$${}_{Z_1}^{A_1}X_1 + {}_{Z_2}^{A_2}X_2 \rightarrow {}_{Z_3}^{A_3}X_3 + {}_{Z_4}^{A_4}X_4$$


من هذا المخطط نستنتج ما يلي:

الطاقة التي يحررها تفاعل نووي معادلته:

$${}_{Z_1}^{A_1}X_1 + {}_{Z_2}^{A_2}X_2 \rightarrow {}_{Z_3}^{A_3}X_3 + {}_{Z_4}^{A_4}X_4$$

هي:

$$\Delta E = [E_\ell(X_1) + E_\ell(X_2)] - [E_\ell(X_3) + E_\ell(X_4)]$$

• **مثال:** لنعد حساب الطاقة التي يحررها تفاعل الاندماج ذو المعادلة:

$${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$$

معطيات: طاقة الربط المتوسطة لنوية للنويدات:

$$\frac{E_\ell}{A}({}_2^4\text{He}) = 7,0 \text{ MeV / nucléon} \quad / \quad \frac{E_\ell}{A}({}_1^3\text{H}) = 2,8 \text{ MeV / nucléon} \quad / \quad \frac{E_\ell}{A}({}_1^2\text{H}) = 1,2 \text{ MeV / nucléon}$$

الطاقة المحررة هي:

$$\Delta E = E_\ell({}_1^2\text{H}) + E_\ell({}_1^3\text{H}) - E_\ell({}_2^4\text{He})$$

$$\Delta E = (2 \times 1,2) + (3 \times 2,8) - (4 \times 7) \approx -17 \text{ MeV}$$

• أشكال الطاقة المحررة

تظهر الطاقة التي يحررها تفاعل نووي على الأشكال التالية:

- طاقة حركية للنواتج (معظمها يتحول إلى طاقة حرارية)
- طاقة إشعاعية (طاقة الإشعاع γ)

تمارين

من بين نظائر الكربون نجد $^{12}_6\text{C}$ و $^{14}_6\text{C}$

1- أحسب بالنسبة لنواة $^{14}_6\text{C}$

أ - النقص الكتلي Δm .

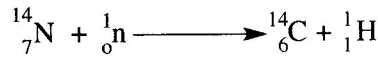
ب - طاقة الربط E_l (ب MeV).

ج - طاقة الربط بالنسبة لنوية $^{12}_6\text{C}$ (ب MeV)

2 - طاقة الربط بالنسبة لنوية للنواة $^{12}_6\text{C}$ هي $E' = 7,68 \text{ MeV}$

استنتج النواة الأكثر استقرارا من بين $^{12}_6\text{C}$ و $^{14}_6\text{C}$.

3 - يتكون الكربون 14 في الطبقات العليا للغلاف الجوي بعد اصطدام نوترون بالأزوت حسب المعادلة التالية :



أحسب طاقة هذا التفاعل .

4 - الكربون 14 اشعاعي النشاط β^- .

أ - أكتب معادلة تفتت الكربون 14 .

ب - أحسب الطاقة المحررة خلال هذا التفاعل.

كتلة نواة $^{12}_6\text{C}$: $m(^{12}\text{C}) = 11,9967 \text{ u}$

نعطي : كتلة نواة $^{14}_6\text{C}$: $m(^{14}\text{C}) = 13,9999 \text{ u}$

كتلة النوترون : $m_n = 1,00866 \text{ u}$

كتلة البروتون : $m_p = 1,00728 \text{ u}$

كتلة نواة $^{14}_7\text{N}$: $m(^{14}\text{N}) = 13,9992 \text{ u}$

كتلة الالكترون : $m_e = 0,000549 \text{ u}$

$$1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV} \cdot \text{c}^{-2}$$