5 . الانشطار والاندماج

تصميم الدرس

5 . 1 . طاقة الربط لكل نوية

كلما كانت النواة ثقيلة (A كبيرة) كلما كانت طاقة الربط الكلية لها أكبر. هذا لا يعني كونها مستقرة. مثال ذلك، طاقة الربط لليورانيوم ^{235}U تساوي 800 Mev، وللحديد ^{56}Fe تكون Mev 490 . من خلال هذا يبدو أن اليورانيوم أكثر استقرار من الحديد.... وهو أكثر استقرارا من اليورانيوم 235.

في الحقيقة، مقارنة طاقة الربط النووي لا يكفي لمعرفة النواة الأكثر استقرارا، لضبط استقرار النواة يجب اعتبار مقدار يدعى: طاقة الربط لكل نوية.

يرمز له بـ: $\frac{E_\ell}{A}$، وعليه يكون لليورانيوم ^{235}U طاقة ربط لكل نوية تساوي: $\frac{E_\ell}{A} = 7,6Mev$ بينما للحديد ^{56}Fe طاقة الربط لكل نوية هي $\frac{E_\ell}{A} = 8,8Mev$. إن طاقة الربط لكل نوية الخاصة بالحديد هي أكبر من طاقة الربط النووي لكل نوية الخاصة باليورانيوم.

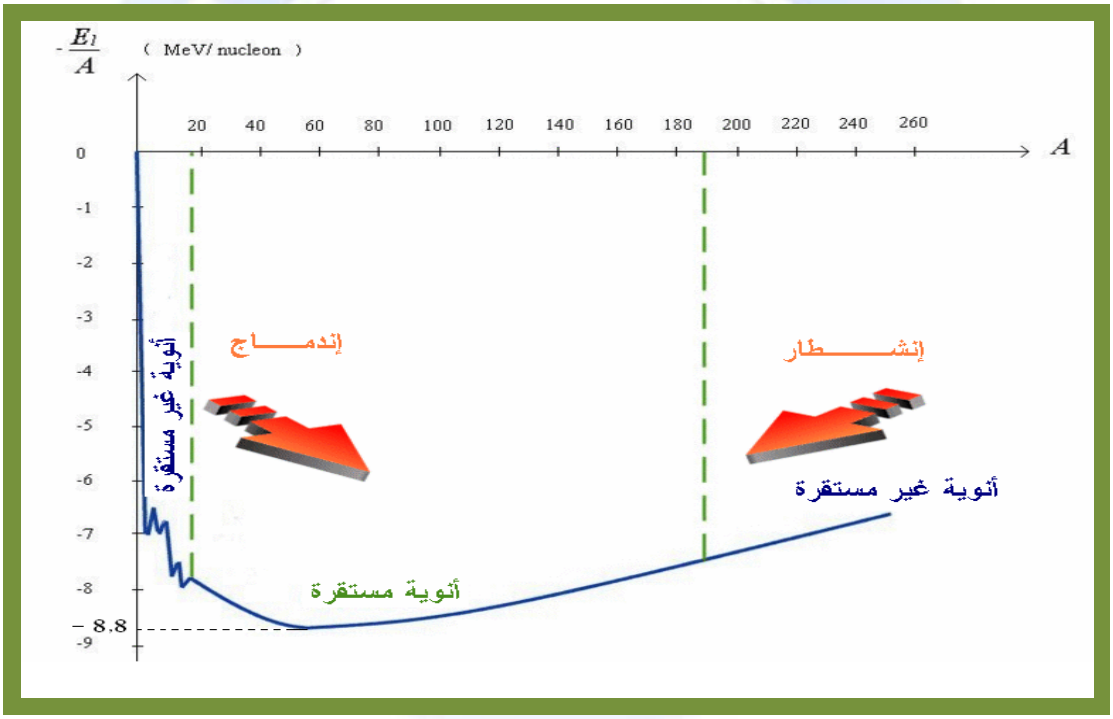
نلاحظ أن $\left(\frac{E_\ell}{A}\right)_{Fe} > \left(\frac{E_\ell}{A}\right)_{U}$ ومنه الحديد أكثر استقرارا من اليورانيوم.

إن معرفة طاقة الربط لكل نوية $\frac{E_\ell}{A}$ تمكننا من مقارنة استقرار الأنوية فيما بينها، وهو ما قام به أستون.

يعبر عن طاقة الربط لكل نوية بـ eV/Nuc أو MeV/Nuc .

إنها فعلا طاقة الربط $\frac{E_\ell}{A}$ لكل نوية المسؤولة عن استقرار النواة. عادة ما يعبر عنها بـ Mev لكل نوية. تكون النواة أكثر استقرارا كلما كانت طاقة الربط لكل نوية لها أكبر.

يمثل المنحنى المبين على الوثيقة التالية والذي يدعى منحنى أستون Aston (الصورة المقابلة)، عكس طاقة الربط لكل نوية $(-E_\ell / A)$ بدلالة العدد الكتلي A



نرى بأن الذرات الخفيفة جدا تمتلك طاقة ربط لكل نوية ضعيفة.

ونرى كذلك بأنه من أجل $50 < A < 75$ يظهر في المنحنى جزء أصغري مسطح يمثل النويات الأكثر استقرارا. القيمة الوسطية لـ $\frac{E_\ell}{A}$ هي 8.7 Mev.

من أجل $A > 100$ يتزايد المنحنى ببطء. كتلة النويات الممثلة له أكبر فهي أقل استقرارا.

يمكن للذرات القليلة الاستقرار(E_ℓ / A ضعيف) أن تتحول إلى ذرات أكثر استقرارا وذلك بتحرير طاقة.

توجد آليتان مختلفتان ممكنتان كما هو موضح في مخطط أستون.

- الانشطار: الذي يؤدي إلى تجزئة النواة - الهدف الثقيلة والقليلة الاستقرار، بقذفها بجسيمات، مثل النيترونات.
- الاندماج: الذي يتمثل في الحصول على ذرات أكثر ثقلا بواسطة التصادم بين جسيمات خفيفة أقل استقرارا.

5 . 2 . الانشطار

5 . 2 . 1 . مبدأ الانشطار

قام العالمان الألمانيان أوتوهاهن وفريتز ستراسمان سنة 1938 باكتشاف غريب. فقد وجدا بأن قذف اليورانيوم بالنيترونات ينتج أحيانا ذرات أكثر صغرا، أبعادها تساوي تقريبا نصف أبعاد النواة الأصلية لليورانيوم.

ليز مايتنر وأوتو فريش، وهما عالمان ألمانيان يعملان في اسكندنافيا، حققا ما حدث: إن نواة اليورانيوم، بعد امتصاصها للنيترون، تجزأت إلى جزأين.

سميت هذه الظاهرة الجديدة الانشطار النووي، لأنها تشبه الانشطار البيولوجي (الانقسام الخلوي). يمكن تصور الآلية على أن نواة اليورانيوم تمثل قطرة سائل. وتبعا لهذا النموذج لقطرة السائل، يعطي النيترون الممتص لنواة اليورانيوم طاقة داخلية إضافية (كأن قطرة السائل تسخن). هذه المرحلة الوسطية أو النواة المركبة، اليورانيوم236 ($^{236}_{92}U$) موجود في حالة مثارة غير مستقرة. تنقسم إذا النواة إلى نواتين N_1 و N_2 تدعيان شظيتي الانشطار.

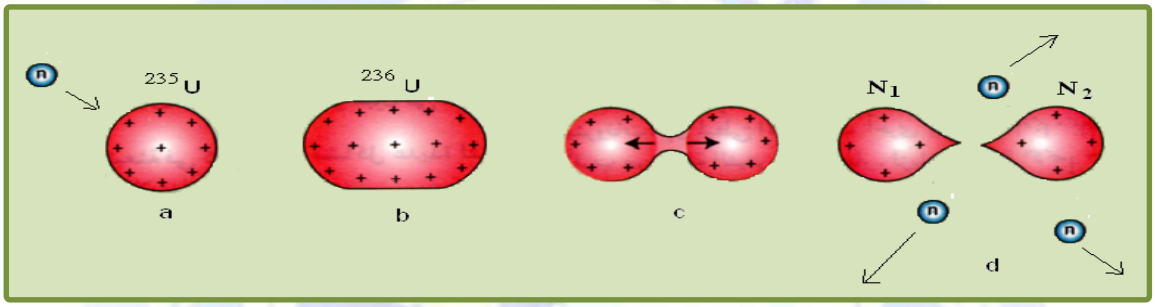
ينبعث في هذه الآلية عدد معين من النيترونات (إثنان أو ثلاثة في الغالب).
يمكن كتابة معادلة التفاعل كالتالي:

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{236}_{92}U^{*} \rightarrow N_1 + N_2 + \text{neutrons}$$

النواة المركبة $^{236}_{92}U^{*}$ تتواجد فقط خلال $10^{-12}s$، وعليه تكون الآلية سريعة جدا من جملة التفاعلات الممكنة :

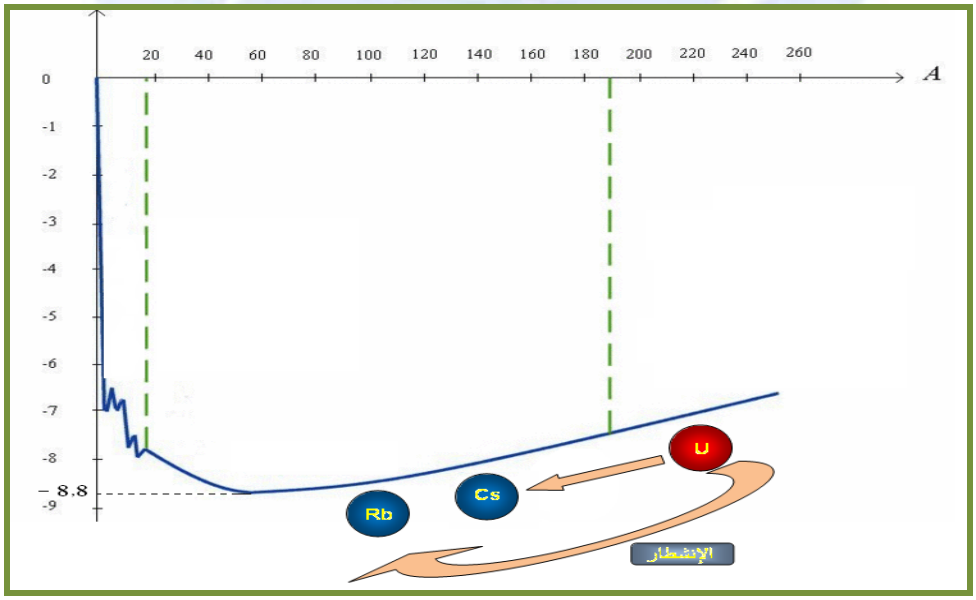
$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{141}_{56}Ba + ^{92}_{36}Kr + 3^{1}_{0}n$$

يمثل المخطط التالي آلية الانشطار النووي تبعا لنموذج قطرة السائل:



تنتج طاقة كبيرة عن تفاعل الانشطار: لأن اليورانيوم 235 أكبر بكثير من كتلة شظايا الانشطار والنيترونات المتحصل عليها.

يمكن رؤية ذلك في المنحنى الممثل لطاقة الربط لكل نوية.



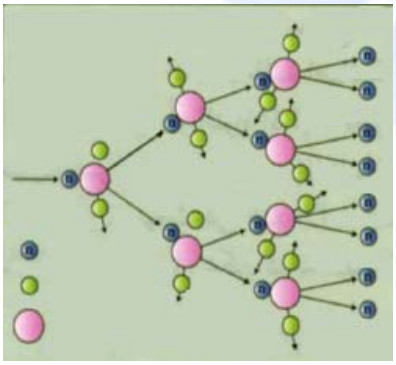
طاقة الربط لكل نوية لليورانيوم تساوي تقريبا 7,6Mev/nucléon، ولكن لشظايا الانشطار التي تمتلك كتلة تقارب A≈100، تكون طاقة الربط المتوسطة لكل نوية تقارب8,5Mev/nucléon، يكون الفارق في الطاقة بين النواة الأصلية لليورانيوم وشظايا الانشطار هو: 8,5-7,6 = 0,9 Mev/nucléon

بما أنه يوجد 236 نوية معنية لكل انشطار، فإن الطاقة الكلية المحررة هي:

0,9 Mev/nucléon x 236 nucléon=200Mev

وهذا يمثل طاقة كبيرة في حدث نووي بسيط.

عمليا إن الطاقة الناتجة عن انشطار واحد فقط تكون ضعيفة، لكن إذا تم افتعال انشطارات عدة في وقت قصير، فإن الطاقة الناتجة تكون كبيرة على **المستوى العياني، وهو ما يحدث حين انفجار قنبلة نووية (قنبلة A)**



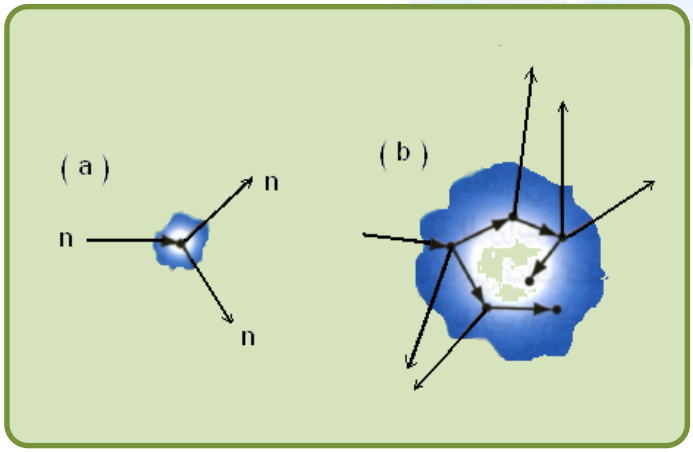
إن النيترونات المنبعثة في كل تفاعل انشطار تُحدث تفاعلات أخرى. معنى ذلك أن النيترون الابتدائي يفتعل انشطار نواة اليورانيوم، أما النيترونان أو الثلاثة نيترونات المنبعثة فإنها تحدث تفاعلات انشطار أخرى، وهكذا تتضاعف الآلية كما هو مبين في الصورة المقابلة الموضحة للتفاعل المتسلسل.

يجب حل مشاكل عديدة لتشغيل معاعل نووي :

• أولا احتمال امتصاص نيترون من نواة اليورانيوم 235 يكون كبيرا فقط بنيترونات بطيئة، بينما تكون النيترونات المنبعثة في تفاعلات انشطار سريعة، لذا تستعمل مادة تدعى المبطيء (moderateur) لإبطاء حركة النيترونات. إن المبطيء الأكثر نفعية هو المكون من ذرات تمتلك كتلة تكون الأقرب من كتلة النيترونات. أحسن نموذج للمبطيء هو الماء الثقيل $^{2}_{1}H_2O$ حيث $^{2}_{1}H$ هي ذرة الديتيريوم، وفيها بروتون ونيترون واحد.

• ثانيا إن امتصاص النيترونات المتكونة في تفاعل انشطار من طرف ذرات أخرى ينتج تفاعلات أخرى في المفاعل، بدلا أن تنتج تفاعلات انشطار. لزيادة احتمال انشطار اليورانيوم 235، يجب تخصيب اليورانيوم الطبيعي لتزداد نسبة اليورانيوم 235.

• ثالثا تستطيع النيترونات أن تنفذ عبر سطح المفاعل قبل أن يحدث تفاعل انشطار. يجب أن تكون كتلة الوقود كبيرة بما فيه الكفاية حتى يتمكن تفاعل متسلسل ذاتي التسيير من الاستمرار. تدعى الكتلة الصغرى لليورانيوم اللازمة الكتلة الحرجة. القيمة النموذجية لهذه الكتلة هي بضعة كيلوغرامات.



إذا كانت كتلة اليورانيوم أقل من الكتلة الحرجة (الشكل a)، فإن كثيرا من النويات تبتعد قبل حدوث **تفاعل الانشطار ولا يمكن الحفاظ على التفاعل المتسلسل أما**

إذا تجاوزت كتلة اليورانيوم الكتلة الحرجة (الشكل b) يمكن حدوث تفاعل متسلسل.

للحصول على تفاعل متسلسل مغذى ذاتيا، ينبغي أن يحدث على الأقل تفاعل انشطار ناتج عن نيترون، يكون هذا النيترون هو الآخر ناتجا عن تفاعل انشطار. يكون لدينا إذن مفاعل حرج بمعامل تضاعف مساو للوحدة. إن المفاعلات مجهزة بقضبان مراقبة تمتص النيترونات للحفاظ على استعمال المفاعل النووي في هذه الحالة الحرجة.

من أكبر مشاكل المفاعلات النووية: النفايات النووية التي تخلفها، وهذا نظرا لطول نصف عمر بعض العناصر مثل اليود الذي يتميز بنصف عمر $1,57x10^7$ans ، لذا ينبغي توفر شروط خاصة لتخزين هذه النفايات.

5 . 2 . 2 . حصيلة الطاقة لتفاعل انشطار

البلوتونيوم 239 نواة انشطارية، يستعمل أحيانا كوقود في المراكز النووية.

عندما تقذف نواة البلوتونيوم 239 بنيترونات بطيئة تنشطر إلى نواتين بنتين ونيترونات. أحد التفاعلات الممكنة هو التالي:

$$^{239}_{94}\mathrm{Pu} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{102}_{42}\mathrm{Mo} + {}^{135}_{52}\mathrm{I} + 3\ {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

كتل كل نواة متدخلة في التفاعل هي: m(Pu)=239,053u
m(I)=134,6917u , m(n) = 1,008665u ,m(Mo)=101,910u

يكتب و يحسب ضياع الكتلة خلال التفاعل كما يلي:

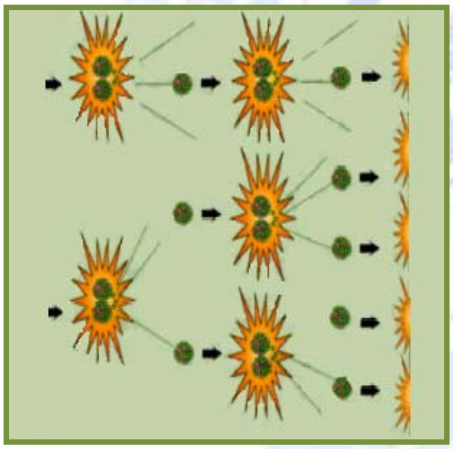
$$\Delta m = m(Pu) + m(n) - [m(Mo) + m(I) + 3m(n)]$$
$$\Delta m = m(Pu) - m(Mo) - m(I) - 2m(n)$$
$$\Delta m = 239,053 - 101,910 - 134,6917 - 2 \times 1,008665$$

$$\Delta m = 0,2086670\ u$$

هذا الضياع في الكتلة يوافق ضياعا في الطاقة :

$$\Delta E = 0,2086670 \times 931,5 = 194,376 MeV$$

تكون الطاقة المحررة في هذا التفاعل حوالي $E_{lib} = 194,376 MeV$



إحراجية : في المتوسط، يعطي نيترون لكل تفاعل انشطار تفاعل انشطار آخر

إحراجية عالية : في المتوسط، أكثر من نيترون واحد يعطي لكل تفاعل انشطار تفاعلات انشطار آخر معدل تفاعلات الانشطار يتزايد بطريقة أسية.

أردنا حساب الطاقة بالجول التي يمكن استرجاعها باستخدام كلغ واحد من البلوتونيوم (m =1kg)، يجب علينا في البداية حساب عدد الأنوية N القابلة للانشطار:

$$N = \frac{m}{m(Pu)} x N_A$$

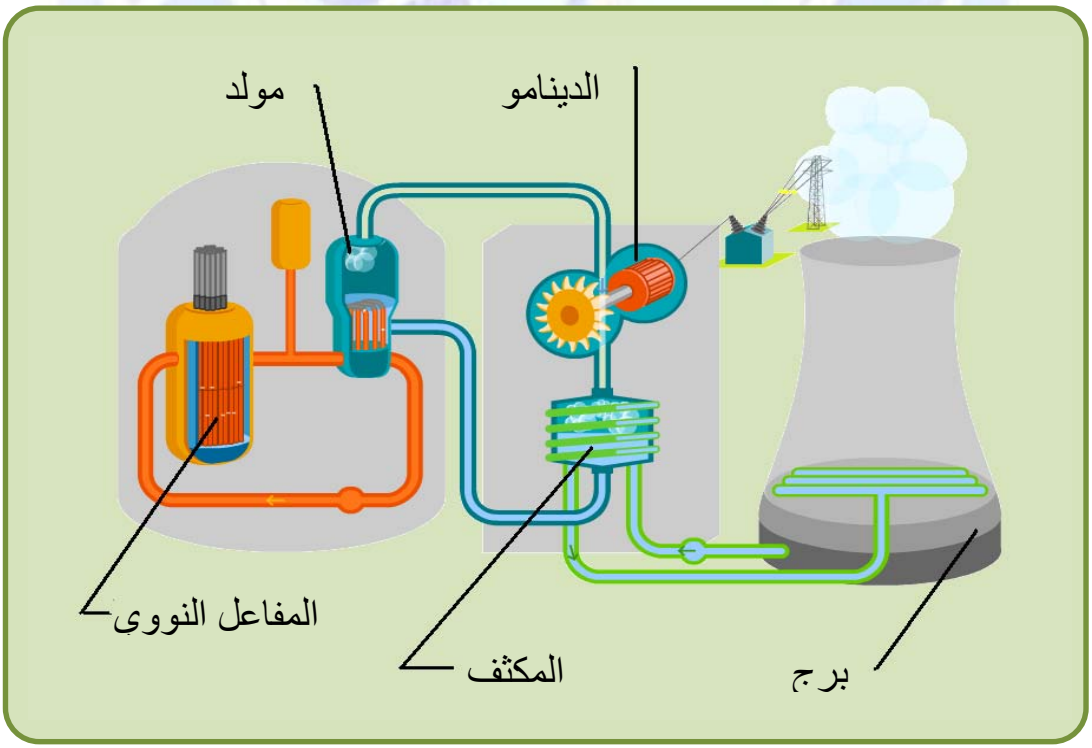
لإيجاد الطاقة الكلية المحررة :

$$E_t = E_{lib} \times N = E_{lib} \frac{m}{m(Pu)} N_A$$

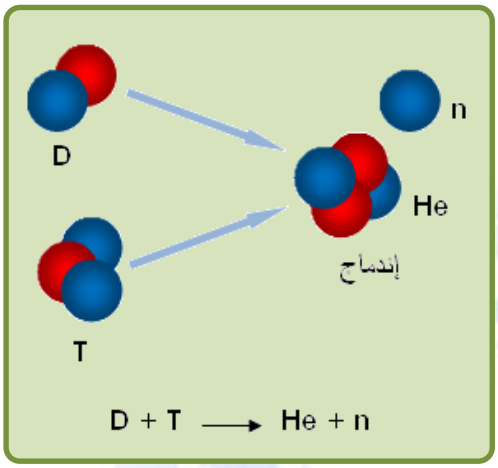
$$E_t = \frac{1000}{239} \times 6,02.10^{23} \times 194,376 \times 1,6 \times 10^{-13}$$

$$E_t = 438,7.10^{13} J$$

في المحطات النووية لتوليد الطاقة الكهربائية التي تعمل وفق مبدأ تفاعل الانشطار النووي، يستعمل الماء تحت ضغط عالي جدا كمعدل لنقل الحرارة الكبيرة التي ينتجها تفاعل الانشطار. تدعى المحطات التي تعمل بالماء تحت ضغط عالي : المفاعل بالماء تحت الضغط centrale de type eau pressurisée .



5 . 3 . 1 . مبدأ الاندماج

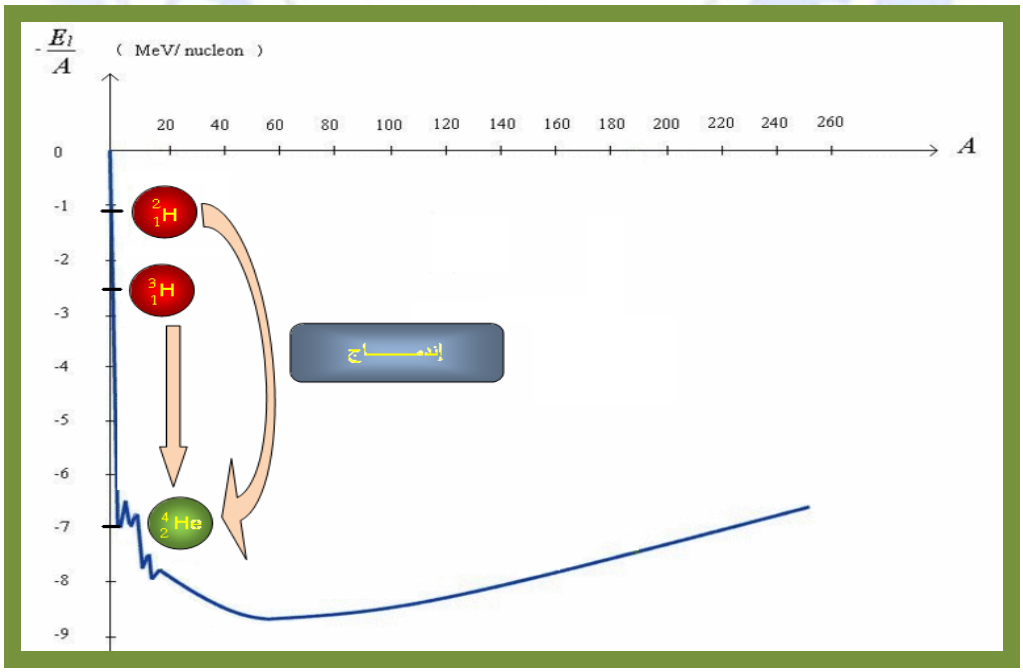


الطريقة التي تشترك فيها نواتان خفيفتان من الهيروجين على سبيل المثال لتشكيل نواة أكثر ثقلا (الهيليوم) تدعى الاندماج النووي. إن التفاعل الأكثر استعمالا في تفاعل الاندماج يستخدم أنوية الدتريوم D $\left({}_1^2\mathrm{H}\right)$ والتريتيوم T $\left({}_1^3\mathrm{H}\right)$، وهما نضيران للهيدروجين $\left({}_1^1\mathrm{H}\right)$

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

بطاقة محررة أثناء التفاعل 17,59 MeV .

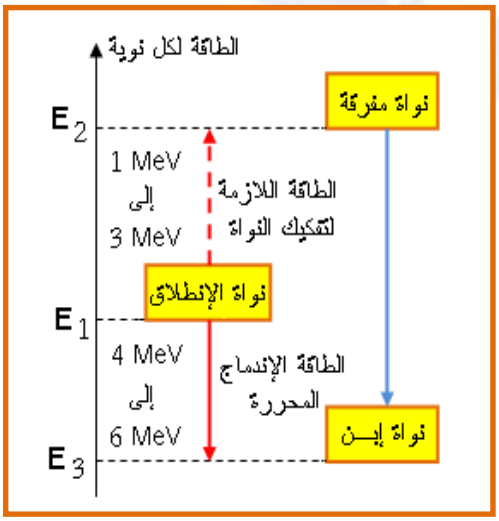
تمثل الوثيقة التالية تفاعل الاندماج السابق على مخطط Aston :



بالنظر إلى منحنى أستون أو منحنى طاقة الربط المتوسطة لكل نوية بدلالة عدد النويات يظهر أن أنوية صغيرة يمكن لها تكوين أنوية كبيرة بتحرير الطاقة لأن طاقة الربط لكل نوية صغيرة تكون أصغر منها للأنوية ذات الكتلة الأكبر، نعتقد أننا نعلم بأن معظم العناصر في الكون تشكلت في البداية من خلال تفاعلات الاندماج. يحدث اليوم تفاعل الاندماج باستمرار في النجوم وفي الشمس منتجا كميات هائلة من طاقة الإشعاع.

يحدث تفاعل اندماج غير مراقب في القنبلة الهيدروجينية بين أنوية الهيدروجين ونحصل على أنوية الهيليوم

تمثل الوثيقة المقابلة مخطط الطاقة الخاص بتفاعل الاندماج:



بمقارنة الطاقة المحررة أثناء تفاعل الاندماج مع الطاقة المحررة أثناء تفاعل الانشطار، نلاحظ بأن طاقة الاندماج لكل نوية تكون أكبر، بالإضافة إلى أن مفاعل الاندماج يمكن

أن يستخدم الهيدروجين الموجود في مياه المحيطات، حيث تكون الوفرة الطبيعية للديتريوم $^{2}_{1}H$ تساوي 0,015%، بمعنى ذلك أنه يوجد غرام واحد من الديتريوم في كل 60 لترا من الماء.

تمثل الوثيقة المقابلة، المفاعل النووي " توكاماك ITER " الذي يتم بناؤه في سنة 2012 والذي يمكن أن يكون عمليا في سنة 2036 ، كما أن الوثيقة تبين طول المفاعل بالنسبة لطول الانسان (في الأسفل على اليمين داخل الدائرة الصفراء)

على الرغم من عدم وجود مفاعل اندماج ليومنا هذا، إلا أنه تحقق الكثير من التطور لتجاوز الصعوبات، يكمن المشكل في أن الكتل لها شحنات موجبة وتتنافر. يتطلب ذلك أن تكون للأنوية طاقة حركية كبيرة جدا لكي تندمج.

يتطلب الحصول على تفاعلات اندماج درجات حرارة عالية. لذا يجري الحديث عن مفاعلات نووية حرارية للاندماج.

لا يكفي توفر درجات حرارة عالية فقط في مفاعل اندماج، بل يجب أن تكون كذلك للانوية المستعملة كثافة كبيرة لأجل الحصول على تصادم عال جدا. تكمن إحدى صعوبات الاندماج المراقب في حصر الأنوية لمدة طويلة بكثافة كبيرة نوعا ما حتى تحدث تفاعلات اندماج محررة لطاقة كافية. وعند هذه الحرارة المطلوبة للاندماج تكون الذرات متأينة وتشكل مجموعة الإلكترونات والأيونات البلازما.

إن الآلات العادية التي تتبخر عن درجة حرارة مقدرة ببضعة آلاف لا تستخدم لاحتواء البلازما. هناك تقنيتان هامتان للإحتواء هما الآن قيد التجربة : الاحتواء المغناطيسي والاحتواء العطالي.

تستخدم الحقول المغناطيسية في الاحتواء المغناطيسي لمحولة احتواء البلازما الساخنة. أحسن مفاعل يتميز بشكل حلقي ويدعى " توكاماك" تم تطويره لأول مرة في الاتحاد السوفييتي. يستعمل توكاماك تركيبا مؤلفا من حلقتين مغناطيسيتين لاحتواء البلازما.

الطريقة الثانية لاحتواء الوقود من أجل الاندماج هي الاحتواء العطالي، حيث يقذف قرص صغير من الديتريوم والتريتيوم بواسطة أشعة ليزر كثيفة جدا في عدة اتجاهات وفي آن واحد. إن تدفق الطاقة في مفاعل من هذا النوع يسخن ويؤين القرص ليكون منها بلازما.

5 . 3 . 2 . حصيلة الطاقة لتفاعل الاندماج

لتكن معادلة الاندماج التالية:

$$^{2}_{1}H+^{3}_{1}H\rightarrow^{4}_{2}He+^{1}_{0}n$$

إن هذا التفاعل هو الأكثر احتمالا في مفاعلات الاندماج مستقبلا نظرا للخصائص الفيزيائية والتكنولوجية الجيدة له مقارنة بالتفاعلات الأخرى. وقود هذا التفاعل هو مزيج من الديتريوم ($^{2}_{1}H$ أو D) والتريتيوم ($^{3}_{1}H$ أو T).

تكون كتل مختلف الدقائق:

$m_D=2,01355u$, $m_T=3,01550u$

$m(He)=4,00150u$ ، $m(n)=1,00866u$

نحسب نقصان الكتلة لهذا التفاعل:

$$m_i - m_f = (2,01355+3,01550) - (1,00866+4,00150) = 1,889.10^{-2}u$$

تكون الطاقة المحررة على شكل طاقة حركية للمكونات:

$$E = (m_i - m_f)\, c^2 = 1,889.10^{-2}\ u$$

فمثلا ، لتشكيل مول من الهيليوم ، تتحرر طاقة قدرها:

$$\mathcal{E} = N_a.E = 6,02x10^{23}x17,6x1,6x10^{-13} = 1,70x10^{12}J$$

إن هذه الطاقة كبيرة جدا، وهي تعادل تقريبا 5 مرات الطاقة المحررة من انشطار اليورانيوم235 من أجل نفس كتلة الوقود.