

## 1 Qu'est-ce que la célèbre formule d'EINSTEIN donnant l'énergie de masse ?

### 1.1 L'énigme de la masse manquante

Voici quelques données numériques assez précises :

$$m_p = 1,67262 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_n = 1,67493 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Donnez la composition et le symbole de l'hélium 4 :

.....

En utilisant les données, calculez la masse de ce noyau :

.....

.....

.....

Comparez avec la masse mesurée (pour l'ion hélium  $\text{He}^{2+}$ , dans un spectromètre de masse)  $m_{\text{He}} = 6,64449 \times 10^{-27} \text{ kg}$  :

.....

.....

En déduire le défaut de masse, noté  $\Delta m$ , et sa valeur relative  $\frac{\Delta m}{m}$ , que vous exprimerez en pourcentage :

.....

.....

Constat :

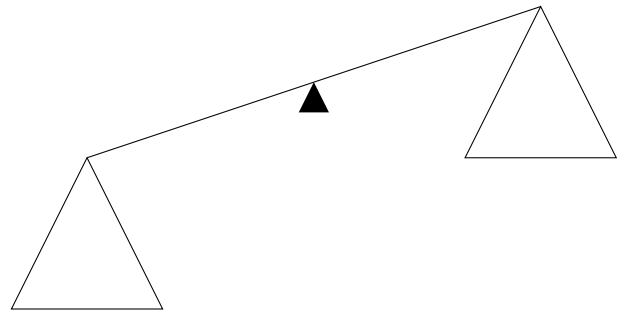


FIG. 1 – Le trébuchet du défaut de masse.

- La masse de 2 neutrons + 2 protons libres est ..... à la masse de ces 4 nucléons associés dans un noyau d'Hélium!
- Le principe de conservation de la masse de LAVOISIER est pris en ..... ;
- De plus, il est assez évident qu'il faut ..... de l'énergie pour détruire un noyau stable, c'est-à-dire pour casser les liaisons entre les nucléons (liaisons assurée par l'interaction ..... ) ;
- D'où la question : .....

### 1.2 L'idée d'EINSTEIN & le plus célèbre *post scriptum* au monde

EINSTEIN a résolu l'énigme de la masse manquante en associant, à toute particule de masse au repos  $m$ , une énergie  $E_0$  telle que :

.....

Remarque : comme  $c = 2,99792 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $c^2$  a une valeur importante et donc l'énergie  $E_0$  est toujours assez importante! Néanmoins, une telle énergie n'est pas « directement disponible » à 100 %, comme nous allons le voir.

### 1.3 À quoi correspond le défaut de masse *in fine* ?

Le défaut de masse correspond à ..... accaparée par les liaisons entre nucléons. Cette énergie assure la ..... du noyau. C'est l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour le dissocier en nucléons libres.

## 2 Quelles nouvelles unités allons-nous utiliser afin de simplifier les calculs et d'éviter de devenir chèvres ?

### 2.1 Changeons l'unité de masse : L'unité de masse atomique (symbole u)

Le kilogramme (kg) est mal adapté aux masses rencontrées à l'échelle atomique. On préfère utiliser l'.....  
..... :

L'unité de masse atomique (u. m. a. en abrégé) est définie comme le douzième de la masse du carbone 12.

Par définition de la ....., la masse du carbone 12 est de ..... ; par conséquent, l'unité de masse atomique a pour valeur en kilogramme :

$$1 \text{ u} = \frac{12 \times 10^{-3} \text{ kg}}{12 \times N_A}$$

avec  $N_A = 6,02214 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  pour le nombre d'AVOGADRO. Application numérique :

.....

La masse d'un nucléon est alors approximativement égale à ....., et celle d'un noyau est approximativement ..... . Masses de l'électron, du proton et du neutron :

$$m_{e^-} = 9,10938 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_p = 1,67262 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_n = 1,67494 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Convertir ces masses en u. m. a. (notez bien les détails des calculs!) :

.....

.....

.....

### 2.2 Changeons l'unité d'énergie : L'électronvolt

Le joule (J) est mal adapté pour les transferts énergétiques à l'échelle atomique et nucléaire. On utilise

l'électronvolt :

$$1 \text{ eV} = 1,60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

L'électronvolt est bien adapté aux énergies mises en jeu lors d'une réaction chimique entre deux molécules, ou lors du changement de niveau d'énergie d'un électron dans un atome.

On utilise aussi le **kiloélectronvolt** :

.....

Le kiloélectronvolt est bien adapté aux énergies courantes des rayons gamma.

En énergie nucléaire, on utilise surtout le **mégaélectronvolt** :

.....

Le mégaélectronvolt est bien adapté aux énergies libérées par les noyaux.

Calcul des énergies de masse au repos pour l'électron, le proton et le neutron :

.....

.....

.....

Convertir ces énergies de masse en électronvolt :

.....

.....

.....

Convertir ces énergies de masse en mégaélectronvolt, en

divisant par  $10^6$  :

.....  
 .....  
 .....

### 2.3 Aujourd'hui c'est la fête, on combine les deux changements d'unités !

En utilisant la définition de l'unité de masse atomique (u), calculer l'énergie de masse correspondante, en joule

(J), puis mégaelectronvolt (MeV) :

.....  
 .....  
 .....

Cette valeur de l'énergie de masse de l'unité de masse atomique va être utilisée comme unité d'énergie dans les calculs d'énergie dégagée par les réactions nucléaires, et va permettre de rendre les calculs beaucoup plus simples.

*Remarque importante : l'exactitude de vos calculs et le respect des chiffres significatifs ont une fâcheuse importance en Physique Nucléaire.*

TAB. 1 – Masses & énergies de masse de quelques particules.

Particule	Symbole	Masse (kg)	Masse (u)	Énergie de masse (MeV)
Électron	${}_{-1}^0\text{e}$	$9,10938 \times 10^{-31}$	$5,48579 \times 10^{-4}$	0,511 00
Proton	${}_{1}^1\text{p}$	$1,67262 \times 10^{-27}$	1,007 27	938,265
Neutron	${}_{0}^1\text{n}$	$1,67494 \times 10^{-27}$	1,008 67	939,570

## 3 Quels sont les noyaux qui sont stables & fréquentables ?

### 3.1 L'énergie de liaison, le retour

Voici les énergies de liaison de quelques noyaux :

- ${}_{2}^4\text{He}$  : 28,4 MeV ;
- ${}_{26}^{56}\text{Fe}$  : 478,8 MeV ;
- ${}_{92}^{235}\text{U}$  : 1743,5 MeV ;

Quel est le noyau le plus stable ?

.....  
 .....  
 .....

Or le ..... est plus stable que l' .....  
 ou que l' .....

Conclusion : Pour comparer la stabilité des différents noyaux, il faut comparer les énergies de liaison par nucléons :

.....

On trace  $-E_{\ell}/A$  en fonction de  $A$  : la courbe d'ASTON.

Le noyau est d'autant plus stable que  $E_{\ell}/A$  est .....

L'usage du signe moins devant  $E_{\ell}/A$  permet d'avoir les noyaux les plus stables au bas de la courbe.

### 3.2 La courbe d'ASTON

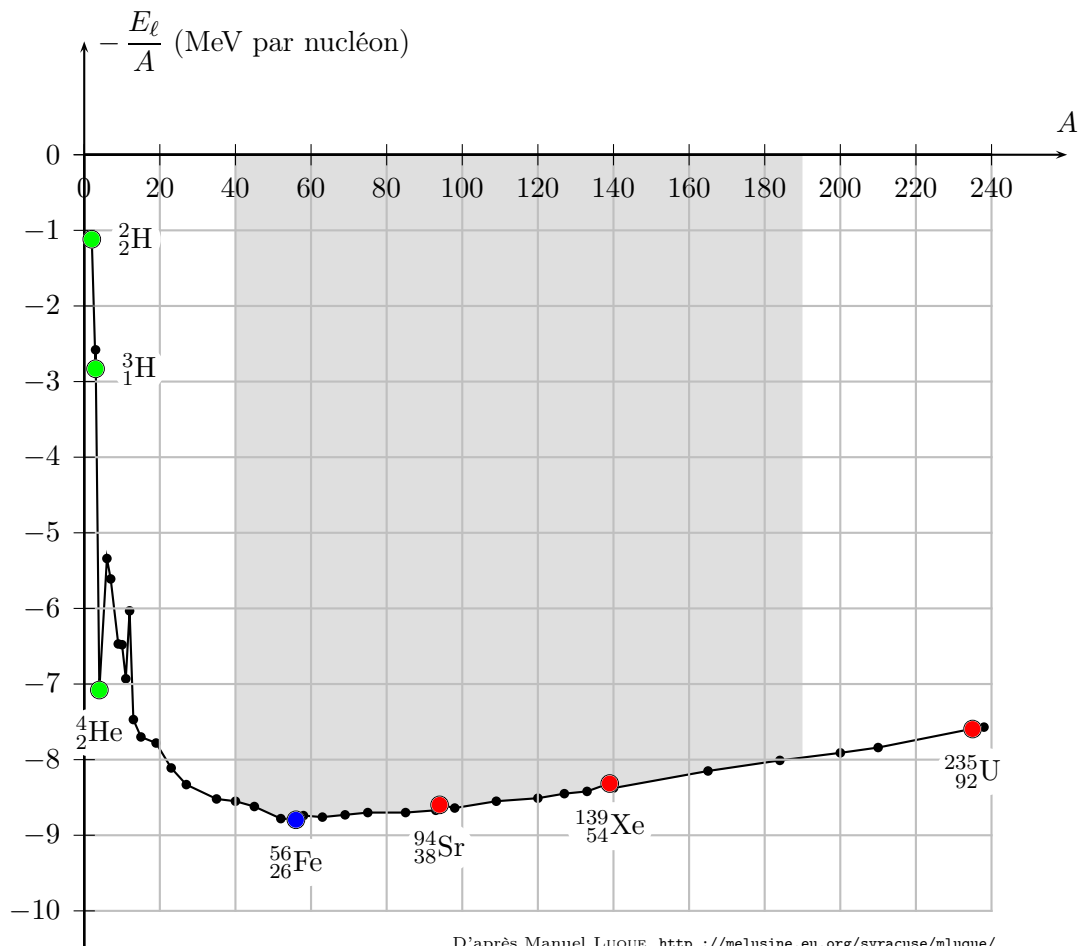


FIG. 2 – Courbe d'Aston.

### 3.3 Exploitation de la courbe d'ASTON

- Pour  $1 < A < 20$ ,  $E_l/A$  varie de façon discontinue.

Les noyaux légers peuvent ..... en un noyau plus stable, plus bas dans le diagramme.

↷ Tracez un exemple sur la courbe d'Aston.

- Pour  $20 < A < 190$ , la courbe est entre  $-8$  MeV et  $-8,7$  MeV, et présente un plateau au niveau du fer 56 ou du cuivre 63.

Les noyaux sont .....  
.....



FIG. 3 – Mileva MARITCH et Albert EINSTEIN.

- Pour  $A > 190$ , la courbe remonte au dessus de  $-8$  MeV.

les noyaux lourds peuvent se ..... (la ..... ) pour donner des noyaux plus légers, plus bas dans le diagramme.

↷ Tracez un exemple sur la courbe d'Aston.

« Tout le monde est un génie. Mais si vous jugez un poisson par sa capacité à grimper aux arbres, il passera sa vie entière persuadé qu'il est totalement stupide. » – Albert EINSTEIN