

Fusion et fission nucléaire

La relation d'Einstein

Introduction

Regardons la vidéo suivante de ScienceEtonnante:



Figure 1: QR-code de la vidéo

Réponds aux questions suivantes:

1. Quelle est l'équation la plus connue de la physique?
2. Comment devrait-on écrire cette équation?
3. Quelles quantités varient simultanément?
4. Dans l'équation d'Einstein, que représente m ?
5. Dans l'équation d'Einstein, que représente E ?
6. Pourquoi dit-on qu'il y a une perte de masse dans un atome d'hydrogène?
7. De quoi est composé un noyau d'hélium?
8. Peut-on dire qu'il est possible de transformer de la masse en énergie?

La relation d'Einstein

C'est en 1905 qu'Einstein publia l'équation $E = mc^2$, sur base de nombreux travaux d'autres scientifiques qui avaient déjà observé cette équation dans des situations particulières.

Décortiquons cette équation:

- cette équation parle de deux attributs E et m d'un corps supposé au repos;
- la lettre m fait référence à la masse de ce corps (au repos!), exprimée en kilogrammes kg;
- la lettre E fait référence à l'énergie totale de ce corps (au repos!), exprimée en joules J ;
- la lettre c fait référence à la vitesse de la lumière, qui est une constante universelle et vaut environ $300000\text{km/s} = 3 \cdot 10^8\text{m/s}$.

Dans cette équation, la masse est une mesure de la résistance du corps à se mettre en mouvement et n'est donc pas une mesure de la quantité de matière.

Comment interpréter cette équation? Elle nous dit qu'une variation de l'énergie d'un corps au repos correspond à une variation de la masse de ce corps. De plus, le facteur c^2 qui lie ces variations entre énergie et masse fait qu'une variation de l'énergie correspond à une variation sensiblement plus petite de la masse (une variation environ 10^{17} fois plus petite).

Voici un tableau donnant différentes variations d'énergie et la variation de masse correspondante:

Énergie (J)	Exemple	Masse (kg)	Exemple
$2,11 \cdot 10^{18}$	Consommation totale d'énergie de la Belgique en 1 an	23,5	un enfant de 8 ans
$9 \cdot 10^{10}$	Énergie consommée par une personne en un an	$1 \cdot 10^{-6}$	un moustique
$3,8 \cdot 10^{26}$	Énergie émise par le Soleil en une seconde	$4,2 \cdot 10^9$	la grande pyramide de Gizeh
$1 \cdot 10^6$	Énergie cinétique d'une voiture à 100 km/h	$1,11 \cdot 10^{-11}$	dix cellules
$8,368 \cdot 10^6$	Énergie d'un repas de 2000 kcal	$9,3 \cdot 10^{-11}$	un dixième de grain de sable
1	Énergie pour soulever une pomme d'un mètre	$1,11 \cdot 10^{-17}$	une bactérie
$2,9288 \cdot 10^6$	Énergie dépensée lors d'une course de 10 km	$3,26 \cdot 10^{-11}$	30 cellules

Le défaut de masse dans la formation de noyaux

Nous avons vu dans la vidéo que la masse d'un noyau d'hélium n'est pas égale à la somme des masses des 4 nucléons qui le compose, à cause de l'énergie nécessaire pour la création de ce noyau. Analysons un autre exemple: celui du noyau d'un isotope de l'hydrogène, le deutérium.

Le noyau de cet isotope contient un proton et un neutron.

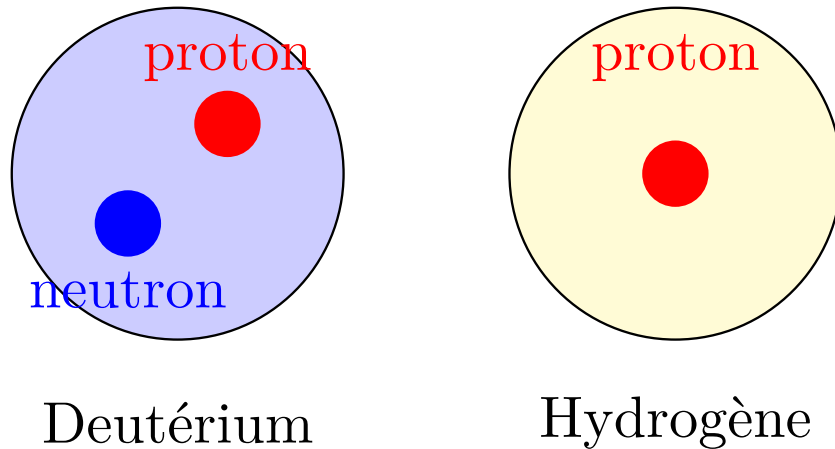
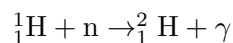


Figure 2: Représentation des noyaux de deuterium et de l'hydrogène

Voici un tableau résumant les valeurs des masses et du défaut de masse, ainsi que l'énergie correspondant à ce défaut.

Élément	Valeur
Masse du proton (p)	$1.67262 \times 10^{-27}\text{kg}$
Masse du neutron (n)	$1.67493 \times 10^{-27}\text{kg}$
Somme des masses (p + n)	$3.34755 \times 10^{-27}\text{kg}$
Masse réelle du deutérium	$3.34449 \times 10^{-27}\text{kg}$
Défaut de masse	$3.06 \times 10^{-30}\text{kg}$
Énergie de liaison	$2.75 \times 10^{-13} \text{ J}$

Un noyau de deutérium est créé à partir d'hydrogène lorsqu'un proton capture un neutron. Ce processus peut se produire naturellement, mais à un taux très faible, ou être provoqué artificiellement dans des réacteurs nucléaires. L'équation de formation du deutérium peut s'écrire :



Cette réaction libère de l'énergie sous forme de rayonnement gamma, correspondant au défaut de masse.

Conservation de l'énergie et de la masse

Vous avez rencontré deux lois de conservation: la loi de conservation de la masse et la loi de conservation de l'énergie.

Conservation de la masse

Dans un système fermé, la masse totale reste constante. Pour une réaction chimique, la masse des réactifs est égale à la masse des produits.

Conservation de l'énergie

L'énergie totale d'un système fermé reste constante au cours du temps. L'énergie ne peut être ni créée ni détruite ; elle peut seulement être transformée d'une forme à une autre (de l'énergie potentielle vers de l'énergie cinétique, par exemple).

Ces deux lois ont été utilisées par Einstein pour démontrer son équation. Ces lois expliquent pourquoi il est faux de dire que l'on peut convertir de la masse en énergie: cela entrerait en contradiction avec les lois de conservation. Ainsi, une forme d'énergie se convertit en une autre. En ce qui concerne la masse, celle-ci peut se transformer en une masse associée à une énergie: par exemple, la masse perdue à cause de l'énergie de liaison au sein d'un noyau de deutérium a été transformée en une masse associée au rayonnement gamma produit lors de la création du noyau.

Les réactions nucléaires

Introduction

Regardons la vidéo suivante de ScienceEtonnante:



Figure 3: QR-code de la vidéo

Réponds aux questions suivantes:

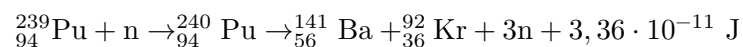
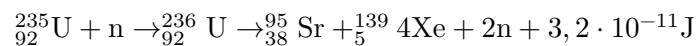
1. peut-on produire de l'énergie?
2. de quoi a-t-on besoin pour faire une fission?
3. combien y a-t-il de neutrons dans un noyau de magnésium 26?
4. que doit-il se produire pour qu'une réaction de fission puisse s'auto-entretenir?
5. quels noyaux permettent de créer des réactions de fission qui s'auto-entretiennent?
6. quels noyaux doit-on utiliser pour produire un noyau d'hélium par fusion?
7. qu'est-ce que la barrière énergétique?

La fission

Fission nucléaire

La fission nucléaire est une réaction selon laquelle un noyau lourd se sépare en deux autres noyaux, plus légers. Cette réaction est accompagnée par l'émission de plusieurs neutrons (en général 2 ou 3) et d'un dégagement d'énergie.

Dans les centrales nucléaires, les réactions de fission sont causées par bombardement d'un noyau lourd par un neutron. Voici deux exemples de réaction par fission:



Pour chacune de ces deux réactions, l'énergie correspond au défaut de masse entre les produits de fission et le noyau de départ. Concentrons nous sur la réaction de fission de l'uranium-235. Pour cette réaction, l'énergie totale dégagée est de $3,2 \cdot 10^{-11}$ J. Cette énergie se décompose de la manière suivante:

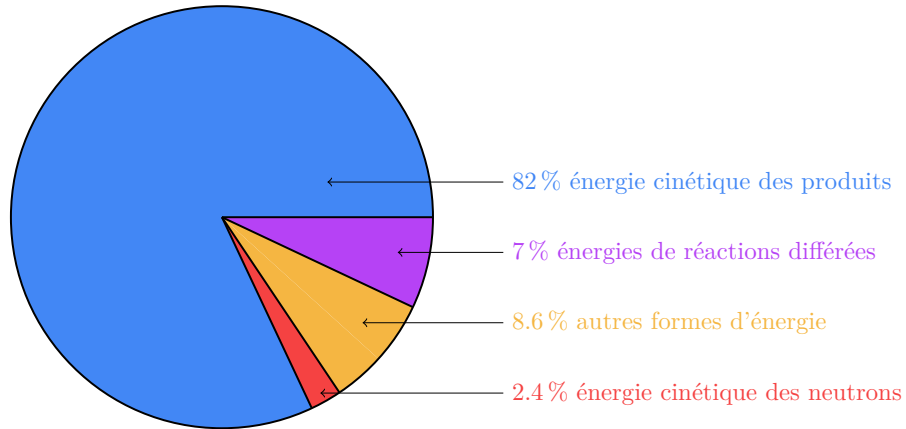


Figure 4: Énergie d'une réaction de fission de l'uranium-235

L'énergie récupérable par une centrale nucléaire est de l'ordre de 95%, c'est-à-dire environ $3,04 \cdot 10^{-11}$ J. Ce nombre semble ridiculement petit mais est en fait énorme à grande échelle. Voici un tableau comparant les différentes manières de produire l'électricité nécessaire pour alimenter une maison pendant un an:

Source d'énergie	Quantité nécessaire pour 1 an
Uranium	0,0017 kg
Charbon	3 400 kg
Gaz naturel	825 m ³
Pétrole	700 litres
Panneaux solaires	30 m ² de surface

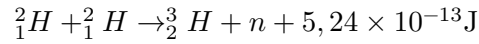
La fusion

Fusion nucléaire

La fusion nucléaire est une réaction selon laquelle des noyaux légers fusionnent pour former des noyaux plus lourds. Cette réaction s'accompagne d'une libération importante d'énergie.

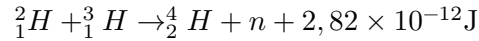
Voici deux exemples de réactions de fusion nucléaire, faisant intervenir des isotopes de l'hydrogène:

1. Fusion deutérium-deutérium



Dans cette réaction, l'énergie dégagée correspond aux énergies cinétiques des produits (75% pour le neutron et 25% pour le noyau d'hélium-3).

2. Fusion deutérium-tritium (isotope de l'hydrogène avec 2 neutrons)



Dans cette réaction, l'énergie dégagée correspond aux énergies cinétiques des produits (80% pour le neutron et 20% pour le noyau d'hélium-3).

Voici un tableau comparant les différentes réactions nucléaires, pour alimenter en électricité une maison pendant un an.

Type de réaction	Éléments requis	Masse nécessaire pour 1 an
Fission	Uranium-235	~0,17 g
Fusion D-T	Deutérium + Tritium	~0,04 g
Fusion D-D	Deutérium	~0,06 g

Malheureusement, il n'est pas encore possible de réaliser de manière fiable et exploitable une fusion nucléaire. Les centrales à fusion sont encore en développement et présentent de nombreux défauts. Un projet mondial, exécuté en France, essaye de développer un réacteur à fusion nucléaire: c'est le projet ITER. Voici une courte vidéo qui l'explique.



Figure 5: QR-code de la vidéo

La fusion nucléaire est un phénomène fondamental qui alimente le Soleil. Cette réaction est la source principale de l'énergie solaire dont nous bénéficions sur Terre. Le processus de fusion dans le Soleil est si intense qu'il entraîne une perte de masse significative : environ 4,2 millions de tonnes par seconde sont converties en énergie.

Les réactions nucléaires au cœur du Soleil sont complexes et variées, formant des chaînes de réactions interconnectées. La chaîne proton-proton (PP) est la plus importante, représentant la majorité des réactions de fusion solaire. À titre d'illustration, voici les étapes principales d'une partie de la chaîne, qui débute par la fusion de deux noyaux d'hydrogène-1:

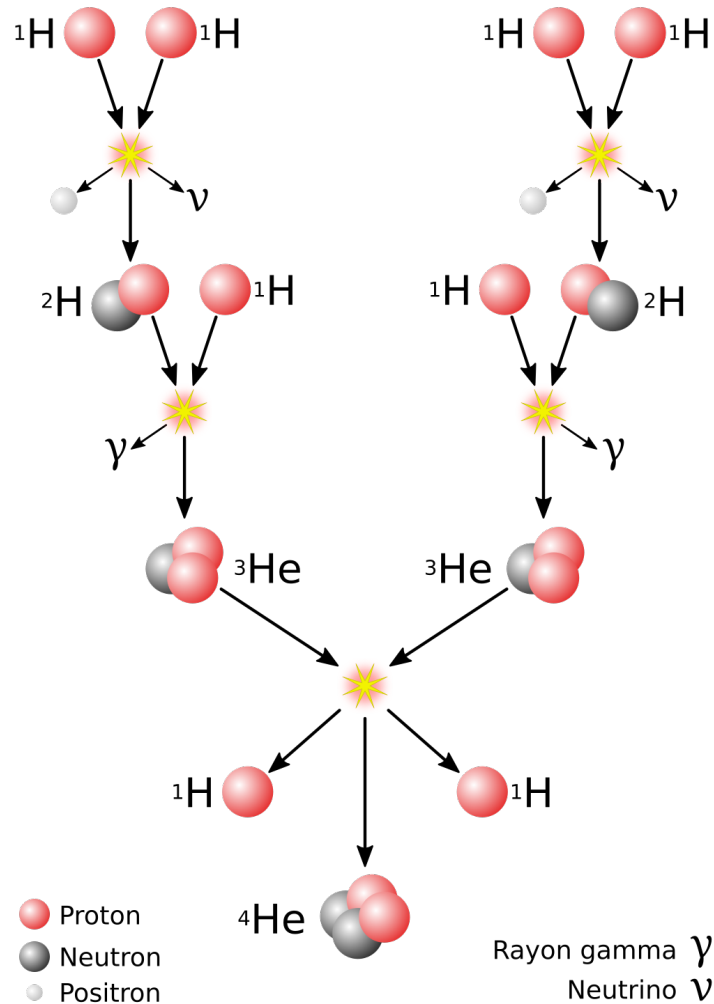


Figure 6: Source: https://fr.wikipedia.org/wiki/Chaîne_proton-proton

Ces réactions se produisent dans des conditions extrêmes de température (environ 15 millions de degrés Celsius) et de pression au cœur du Soleil.