

Nucléaire, chimie, gravitation

Comparaisons

Chute de 1 kg d'eau sur 500 mètres	$5 \cdot 10^3$ joules
Combustion chimique de 1 kg de pétrole	$5 \cdot 10^7$ Joules
Fission nucléaire de 1 kg d'uranium	10^{14} Joules
Fusion nucléaire de 1 kg d'hélium	10^{15} Joules

<https://fr.wikipedia.org/wiki/E%3Dmc2>

Bilan masse-énergie dans le domaine nucléaire

La transformation de masse en énergie est nettement visible dans le bilan des réactions nucléaires au sein des centrales, des piles et des bombes atomiques. L'énergie correspondant à une masse de 1 kg de matière qui serait intégralement transformée en énergie est énorme : 9×10^{16} joules. Une telle énergie équivalrait à celle produite par un réacteur nucléaire d'une puissance électrique de 1 400 MW pendant deux ans environ. [...]

Production d'énergie des étoiles. [...] Au centre du Soleil, les conditions physiques sont telles que s'y produisent des réactions nucléaires capables, au bout d'une chaîne de processus, de transformer quatre noyaux d'hydrogène (quatre protons) et deux électrons, en un noyau d'hélium (${}^4\text{He}$) et deux neutrinos électroniques, plus des photons gamma : $4 \text{ p}^+ + 2 \text{ e}^- \rightarrow {}^4\text{He}^{++} + 2 \nu_e + 2 \gamma$. Il se produit de l'ordre de $9,2 \times 10^{37}$ réactions élémentaires par seconde dégageant une énergie de 26,73 MeV chacune. Il se trouve que la masse au repos du noyau d'hélium est inférieure à la somme des masses au repos des deux protons et deux neutrons qui le constituent. L'énergie équivalente à cette différence de masse est la source de l'énergie du Soleil.

Grâce à l'importance du facteur de conversion c^2 et à la masse considérable convertie, l'énergie libérée permet à l'étoile de briller pendant une bonne douzaine de milliards d'années. En effet, le flux énergétique des photons émis par le Soleil est de $3,828 \times 10^{26}$ W, auquel s'ajoute celui des neutrinos de $8,8 \times 10^{24}$ W, soit un flux énergétique total de $3,916 \times 10^{26}$ W. Cela correspond à une perte de masse de 4,3 millions de tonnes par seconde, impliquant la transformation de quelque 620 millions de tonnes d'hydrogène en hélium chaque seconde, la perte de masse étant alors d'environ 0,7 % de la masse initialement en jeu.

Domaine moléculaire et atomique

Cette relation s'applique à d'autres domaines que le nucléaire. Par exemple en chimie, lorsque 1 000 moles d'hydrogène (soit en pratique 500 moles de dihydrogène, soit environ 1 kg) se combinent avec 500 moles d'oxygène (soit en pratique 250 moles de dioxygène, soit environ 8 kg) pour former 500 moles (soit environ 9 kg) de vapeur d'eau, environ $1,21 \times 10^8$ joules d'énergie sont libérés (soit 121 MJ, sachant que l'enthalpie de réaction est de -242 kJ/mol). Cette énergie correspond à une perte de masse d'environ $1,35 \times 10^{-9}$ kg, soit 1,35 microgramme, ce qui entraîne que la masse de l'eau formée est inférieure de cette quantité à la masse initiale de 9,008 kilogrammes des réactifs, soit une perte de masse relative de 0,15 ppb ($1/10^9$). Le défaut de masse, de l'ordre du dixième de milliardième en valeur relative, est trop infime pour pouvoir être mis en évidence par des mesures expérimentales, qui arrivent au mieux à l'ordre du centième de millionième. C'est pour ça que l'on continue à utiliser sans inconvénient le « théorème classique » de la conservation de la masse dans les réactions chimiques et dans la vie courante. [...] Un autre cas d'équivalence entre variation de masse et énergie est donné par le défaut de masse de l'atome le plus simple : la masse de l'atome d'hydrogène est inférieure à la somme des masses de l'électron et du proton d'une quantité juste égale à l'équivalent en masse de l'énergie d'ionisation de l'atome, bien que ce défaut soit tout à fait hors de portée de la mesure courante, puisqu'il vaut 13,6 eV soit :

$$\Delta m = \frac{13,6 \times 1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{(2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2} \approx 2,4 \cdot 10^{-35} \text{ kg}$$

c'est-à-dire un peu plus de quatorze milliardèmes (1,4 centième de millionième) des masses d'un proton et d'un électron libres.

Domaine gravitationnel

La masse d'un corps qui s'élève dans un champ de gravitation ne change pas *du point de vue d'un observateur qui suit ce corps*. En revanche, *la masse du système global*, composé de l'ensemble des masses à l'origine du champ de gravitation, elle, est susceptible d'augmenter d'une quantité équivalente à l'énergie potentielle acquise par l'objet si cette énergie vient de l'extérieur du système.

Dans des systèmes gravitationnels ordinaires, la quantité d'énergie diffusée sous forme d'ondes gravitationnelles est négligeable. En revanche, dans les fusions de trous noirs, elle peut devenir considérable. Dans le cas de l'évènement GW150914 découvert en 2015, son équivalent était d'environ trois masses solaires pour une masse initiale du système (juste avant fusion) de plus de 60 masses solaires.