



Paul Mazon

Coup de chapeau à la Cosmologie

Paul Mazon

Coup de chapeau
à la Cosmologie

© Paul Mazon, 2024

ISBN numérique : 979-10-405-4424-1

Librinova”

www.librinova.com

Le Code de la propriété intellectuelle interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l’auteur ou de ses ayants cause, est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

ÉNERGIE ET MASSE

Évoquons la relation profonde qui existe entre l'énergie et la masse. Pour cela, nous avons besoin de connaître la vitesse c de la lumière. En se basant sur les mesures les plus modernes, elle a été fixée exactement à 299.792.458 m/s par le Bureau International des Poids et Mesures en 1983. C'est cette valeur qui sert à la définition du mètre : c 'est la distance parcourue dans le vide par la lumière pendant le durée de $1/299.792.458$ de seconde. Comme la mesure des durées est extraordinairement précise grâce aux apports de l'optique et de la photonique (18 chiffres après la virgule !), celle du mètre est désormais bien plus précise que celle fournie auparavant par le mètre étalon en platine iridié du pavillon de Sèvres à Breteuil ou par la longueur d'onde orangée du krypton 86. Une heure-lumière correspond à environ un milliard de kilomètres et une année-lumière (al) ou ly (light year) à environ 10^{13} km. Une vraie question sur laquelle nous reviendrons : pourquoi LA vitesse de la lumière ?

La mécanique classique (Galilée, Newton) a introduit le concept d'énergie cinétique (due à la vitesse, mais vitesse par rapport à quoi ?) par l'expression bien connue $\frac{1}{2}mv^2$. Celle d'un ace au tennis (balle de masse m voisine de 60 g et v de plus de 200 km/h) peut atteindre 100 Joule, comme celle d'une boule de pétanque lancée lors d'un tir. En astrophysique, les énergies mises en jeu sont souvent colossales à cause des masses impliquées et les puissances de 10 élevées s'imposent. Pour la Terre par exemple (masse de $6 \cdot 10^{24}$ kg et vitesse 30 km/s par rapport au Soleil), c'est plus que 10^{33} J. En revanche, pour les particules, c'est plutôt 10^{-n} à cause de leur masse très faible, d'où cette unité d'énergie mieux adaptée à leur cas qu'est l'électron-Volt (eV) égal à $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule. Un eV correspond à une température d'agitation thermique $k_B T$ de 11605 K où k_B est la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

Exemples de conversion d'énergie en masse :

- Le proton (noyau d'H) a une masse m de $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg et une dimension de l'ordre du Fermi (10^{-15} m) ce qui lui confère la densité énorme de 10^9 t/cm³ (cf. les étoiles à neutrons ou à quarks) ! Sa masse au repos, mc^2 , exprimée en unités d'énergie est 938 MeV. Or, la masse totale de ses constituants (3 quarks

massiques et différents bosons de masse nulle) est seulement 9,6 Mev, presque cent fois moins ! Idem pour le neutron légèrement plus massique. D'où vient cet excès de masse ? De l'énorme énergie de liaison des quarks, surtout par interaction forte.

- Un rayon cosmique d'ultra haute énergie (rarement détecté) est souvent un proton ultrarapide de vitesse presque c , appelé Zetta particule car son énergie est environ 1000 à la puissance 7, c'est-à-dire 10^{21} eV. C'est environ celle d'une ace au tennis. Énorme pour une seule particule mais non dangereux car son arrivée dans l'atmosphère terrestre provoque tout une cascade de particules par collisions avec les atomes ou molécules rencontrées dans l'atmosphère. Son énergie cinétique ne peut être donnée par l'expression classique $\frac{1}{2}mv^2$ égale ici à $\frac{1}{2}mc^2$ (car elle serait inférieure à son énergie au repos mc^2 alors que la particule est presque à la vitesse de la lumière). La bonne expression, elle est relativiste, n'est pas mc^2 mais γmc^2 comme si la masse du proton avait augmenté de m à γm sous l'effet de la vitesse donc de l'énergie. γ , le facteur de Lorentz égal à $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$, vaut ici environ 10^{12} , ce qui correspond à une vitesse v égale à c au Fermi/s près c'est-à-dire à 10^{-15} m/s près.

Exemples de conversion de masse en énergie :

- Bombes à U (uranium), Pu (plutonium), H (hydrogène). L'énergie des deux bombes lancées en 1945 sur Hiroshima et Nagasaki avoisinait la vingtaine de kilotonnes TNT (trinitrotoluène), ce qui correspond d'après les caractéristiques du TNT à une énergie inférieure à 10^{14} J. Malgré la puissance destructrice, le défaut de masse correspondant à cette énergie est minime, de l'ordre du gramme. Quant à la Tsar Bomba (50 mégatonnes TNT), une bombe composite à hydrogène dont la fusion est amorcée par la fission de plutonium, bombe la plus puissante testée en 1961 par l'URSS, le défaut de masse est de l'ordre de deux ou trois kilogrammes. La transformation de masse en énergie a un rendement exceptionnel puisque c^2 est voisin de 10^{17} dans le système international d'unités ! Les deux exemples suivants ramèneront nos performances militaires à de plus justes proportions.

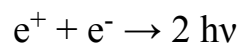
- Soleil : à chaque seconde, 600 millions de tonnes d'hydrogène y sont fusionnées en 596 millions de tonnes d'hélium par la chaîne proton-proton. Le défaut de masse de $4 \cdot 10^9$ kg correspond à $4 \cdot 10^{26}$ Joule. Le Soleil est ainsi une

centrale nucléaire naturelle de puissance $4 \cdot 10^{26}$ Watt (c'est 10^9 Watt pour nos centrales classiques). Malgré tout, il existera encore quelques milliards d'années avant de devenir une géante rouge qui vaporisera notre planète et le système solaire (une catastrophe pour nous mais juste une petite lueur dans le cosmos pour d'éventuels observateurs extraterrestres).

- Plus fort encore, l'évènement GW150914. Cette dénomination donne la date (14 septembre 2015) de la première détection d'ondes gravitationnelles (GW pour Gravitational Waves) par les deux LIGO (Laser Interferometry Gravitational waves Observatory) situés dans l'état de Washington et en Louisiane. Distants de 3000 kilomètres, ces deux interféromètres de Michelson à bras géants, associés aux suivis de nombreuses observations astronomiques classiques, ont permis de confirmer la propagation de ces ondes à la vitesse attendue c et de déterminer leur localisation (hémisphère sud, direction nuages de Magellan) et leur cause. Il s'agissait de la fusion de deux trous noirs de masses solaires (m_S) 36 et 29 ayant donné naissance à un seul trou noir de masse $62 m_S$. Le défaut de masse de $3 m_S$ a engendré l'énergie énorme de 10^{48} Joule, très supérieure à l'énergie rayonnée par toutes les étoiles visibles. Comme il existe des trous noirs de plusieurs milliards de m_S , on peut s'attendre à déceler des énergies encore plus élevées.

Exemple de conversion totale :

Matière et antimatière s'annihilent complètement au contact en fournissant de l'énergie (photons). Par exemple, avec un positron et un électron, on aura



chaque photon ayant au moins une énergie de 0,511 MeV (elle correspond à la masse au repos de e^- ou de e^+). La conversion inverse (création d'une paire électron-positron par l'interaction de deux photons) est possible si les photons ont une énergie totale suffisante correspondant à une température d'1,022 MeV soit environ 10^{10} K. À des températures supérieures, les photons peuvent générer des particules bien plus massives (proton-antiproton ou neutron-antineutron par exemple), comme aux premiers instants de l'Univers. Aujourd'hui, l'antimatière semble avoir disparu (mais pas la matière) alors que les annihilations se font par paires matière-antimatière pour préserver la neutralité électrique. Cela laisse

supposer une possible asymétrie matière-antimatière qui aurait privilégié la matière très tôt dans l'histoire de l'Univers, environ une seconde après le Big Bang selon les cosmologistes. Cependant, les rayons cosmiques et la foudre en créent et des atomes d'antihydrogène (un antiproton lié à un positron) ont même été produits et conservés quelques temps en laboratoire.