MASSE

La masse d'un corps est une notion théorique correspondant à l'idée intuitive et floue de "quantité de matière" contenue dans un corps. Elle se manifeste d'abord par la force de gravitation qui s'exerce universellement entre corps massifs. Cette "masse pesante" est directement liée au poids d'un corps et mesure l'action de la pesanteur sur celui-ci. La masse, par ailleurs, caractérise la résistance d'un corps à la modification de son mouvement : c'est le coefficient d'inertie, ou "masse inertielle", du corps. Dans ces deux acceptations, la masse est additive selon la mécanique newtonienne. Einstein a montré en 1905 que cette propriété n'était qu'approximative : la masse d'un corps mesure son énergie interne (relation d'Einstein, $E_0 = mc^2$), et toute variation d'énergie s'accompagne d'une variation de masse.

Masse et pesanteur

Au départ, la notion de masse vise à caractériser la "quantité de matière" contenue dans un objet physique. Cette grandeur se révèle d'abord à nos sens par l'intermédiaire du poids de l'objet : la force de pesanteur qu'exerce la Terre est de toute évidence d'autant plus grande que l'objet contient plus de matière. La pratique courante tend ainsi à assimiler masse et poids, à mesurer la première par le second. Cependant, une étude plus attentive révèle que le poids d'un objet (la force de pesanteur qui s'exerce sur lui) n'est pas constant à la surface de la Terre et varie avec la latitude et l'altitude (0,2 p. 100 de plus à l'équateur, et 0,15 p. 100 de moins au sommet du mont Blanc qu'à Paris). La masse, par contre, pour pouvoir caractériser la quantité de matière de l'objet considéré en tant que tel, doit lui être intrinsèque et ne pas dépendre des conditions extérieures. Or, si le poids d'un objet varie de place en place, on constate que le rapport des poids de deux objets donnés est indépendant du lieu et des autres conditions extérieures. On est donc amené à définir le rapport des masses $m1$ et $m2$ de deux objets comme égal au rapport constant de leurs poids P_1 et P_2 : $m_2/m_1 = P_2/P_1$. Il suffit alors de définir, arbitrairement, une masse unité pour mesurer une masse quelconque par la comparaison des poids correspondants.

La masse unité conventionnelle est aujourd'hui le "kilogramme international", défini par un étalon en platine iridié conservé au Bureau international des poids et mesures, à Sèvres. Cette masse correspond à peu près à celle d'un litre d'eau ; c'était la définition initiale du kilogramme adoptée par la Convention en 1793, mais elle est insuffisamment précise pour la métrologie moderne. Il est probable qu'une nouvelle définition, fondée sur les masses d'objets atomiques, sera donnée dans l'avenir au kilogramme, comme cela a été le cas pour le mètre et la seconde.

La notion de masse ainsi définie est additive. Cette propriété essentielle est conforme à l'idée intuitive de quantité de matière : la masse (quantité de matière) d'un système composé de deux objets est la somme des masses (quantités de matière) de chaque objet. C'est d'ailleurs cette additivité qui permet la procédure usuelle de mesure d'une masse à la balance par comparaison avec la masse cumulée d'un ensemble choisi de poids standards.

Ainsi le poids P d'un objet, est-il le produit de sa masse m, caractéristique intrinsèque de l'objet, par une grandeur g qui décrit le champ de pesanteur en chaque point : $P = mg$. C'est la variation du champ de pesanteur selon le lieu qui explique les variations du poids. Sur la Lune, la pesanteur est six fois moindre que sur la Terre ; les bonds télévisés des astronautes ont illustrés cette diminution de poids, mais sans changement de masse (perdre du poids n'est donc pas si difficile, c'est pour perdre de la masse qu'il faut suivre un régime). Le champ de pesanteur lui-même, et c'est là encore une contribution majeure de Newton, est engendré par les masses des corps autres que celui sur lequel il agit. Ainsi, dans le cas le plus simple, deux masses ponctuelles m_1 et m_2 s'attirent-elles avec une force f :

$$f = Gm_1m_2/d^2,$$

où d est la distance qui les sépare, la fameuse loi de "l'inverse carré", et G une constante universelle : la constante de Newton, ou constante de la gravitation. C'est la loi fondamentale de "l'attraction universelle" de Newton.

On peut la comprendre en considérant que la masse m_1 engendre un champ gravitationnel qui agit sur la masse m_2, et réciproquement. La similarité de la loi de Newton avec la loi de Coulomb qui décrit les forces entre charges électriques amène à penser les masses comme des "charges gravitationnelles", au sens général de la notion de charge en physique d'aujourd'hui : grandeur qui caractérise à la fois un certain champ de force engendré par un corps (rôle actif) et la réponse de ce corps aux champs de force similaires engendrés par d'autres (rôle passif).

Masse et inertie

Il existe une autre caractérisation de la masse d'un corps à partir de son comportement dynamique. L'expérience courante l'indique aussi bien : plus la masse (quantité de matière) d'un objet est grande, plus il est difficile de le mettre en mouvement ou de l'arrêter, autrement dit de modifier son état de mouvement. Le principe de l'inertie, ébauché par Galilée, puis par Descartes, et énoncé par Newton, indique qu'un corps sur lequel n'agit aucune force poursuit un mouvement uniforme (rectiligne, à vitesse constante). Une force donnée F modifiera la vitesse en grandeur et/ou en direction, c'est à dire provoquera une accélération γ du corps d'autant plus grande que la masse du corps sera faible. La loi fondamentale de la dynamique, due encore à Newton, s'écrit : $\gamma = F/m$. Elle traduit parfaitement le rôle de la masse comme coefficient inertiel, caractérisant la résistance du corps au changement de son état de mouvement. Dans cette nouvelle acception, la masse reste une propriété additive, comme on le déduit aisément de l'additivité des forces. Cette conception de la masse est beaucoup plus générale que la précédente ; au lieu de se présenter comme une grandeur liée à un phénomène physique particulier, la pesanteur, elle se définit par la réponse d'un corps à une force absolument quelconque, qui peut être aussi bien de nature électrique, magnétique, etc., que gravitationnelle. On peut donc légitimement distinguer a priori pour chaque corps deux masses, la masse inerte m_i qui intervient dans la loi (générale) de Newton, $F = m_i\gamma$, et la masse pesante m_p qui caractérise la force gravitationnelle (ou poids), $P = m_P g$, agissant sur le corps dans un champ de pesanteur g.

Les observations et les expériences confirment que, pour tous les corps sans exception, le rapport m_P/m_i est le même, ce qui permet, moyennant un choix naturel d'unités, d'identifier m_P et m_i, donnant ainsi une valeur commune (*la masse*) à la masse inerte et à la masse pesante. Le principe de ces vérifications est simple : si la force agissant sur le corps est la pesanteur ($F = P$), l'équation de Newton s'écrit : $\gamma = P/m_i = (m_P/m_i)g$. L'accélération, donc la vitesse et la trajectoire du corps dans un champ de pesanteur donné, dépend ainsi du rapport m_P/m_i. Or l'on constate que tous les corps ont même mouvement dans un champ de pesanteur donné. La chute des corps à la surface de la Terre en offre l'exemple élémentaire : un gravier de 10 grammes et un rocher de 10 tonnes tombent avec la même accélération g, "l'accélération de la pesanteur" ; si la force qui s'exerce sur le second est un million de fois plus forte que sur le premier, son inertie est également un million de fois supérieure (il est un million de fois plus difficile à accélérer), et il y a exacte compensation. De même, la période d'oscillation d'un pendule (de longueur donnée) est-elle indépendante de sa masse, comme la période de révolution d'un satellite (d'orbite donnée). Des mesures très précises, d'abord effectuées par le physicien Hongrois Loránd Eötvös (1890) et, plus récemment, par l'Américain R. H. Dicke vers 1960, ont confirmé l'universalité du rapport m_P/m_i pour de très nombreux corps, avec une précision qui atteint aujourd'hui 10^{-11}.

Cette concordance entre deux grandeurs de natures très différentes, une charge gravitationnelle et un coefficient inertiel, n'a pas d'explication naturelle dans le cadre de la physique classique. Sa conséquence essentielle, l'identité des mouvements de différents corps sous l'action d'un champs gravitationnel, a servi de point de départ à Einstein pour construire sa relativité générale, sous forme géométrique : c'est en effet l'indépendance du mouvement gravitationnel d'un corps par rapport à sa propre masse qui permet de considérer ce mouvement comme dû à la seule structure de l'espace-temps (cf. ESPACE-TEMPS).
Dans la théorie d'Einstein, la masse inerte et la masse pesante (passive), identifiées a priori, disparaissent en quelque sorte : les équations de mouvement déterminent des trajectoires dans un espace-temps courbe en vertu de critères purement géométriques - ce sont les "géodésiques" de l'espace- temps. Il reste que la structure même de cet espace-temps courbe est déterminée par les masses pesantes (actives) des corps physiques.

Au début du siècle, Einstein a montré la nécessité de modifier les conceptions de la mécanique newtonienne en remplaçant les notions classiques d'espace et de temps par des notions plus élaborées et plus intriquées. On sait qu'un aspect majeur de ces nouvelles notions est l'existence pour tous les corps matériels d'une vitesse limite c, qui coïncide avec la vitesse de la lumière. Cela implique une modification de la dynamique newtonienne : à une force constante ne peut plus correspondre une accélération constante qui conduirait, sur un temps suffisant, à une vitesse supérieure à la limite c. Il faut donc nécessairement que l'inertie d'un corps augmente avec sa vitesse, et s'accroisse même indéfiniment lorsque cette vitesse approche la limite c, de façon qu'il soit de plus en plus difficile d'accélérer le corps et que sa vitesse ne puisse tendre qu'asymptotiquement vers c.

De fait, l'étude détaillée de la théorie amène à définir un coefficient d'inertie dépendant de la vitesse :

$$I(v) = m/\sqrt{1 - v^2/c^2},$$

qui présente bien ces caractéristiques, m étant la masse du corps. Pour des vitesses v faibles devant c, qui sont celles de l'expérience commune et de la physique newtonienne, on peut négliger le terme v^2/c^2 devant l'unité et écrire $I \simeq m$, retrouvant ainsi la masse comme coefficient inertiel. Insistons sur le fait que la masse m reste une constante caractéristique du corps, de sa quantité de matière. Il est incorrect et trompeur d'inclure la variation avec la vitesse dans la notion de masse comme on le fait parfois : mieux vaut définir l'inertie (variable) $I(v)$ et la relier à la masse (constante) m.

Exerçant une force sur un corps, on accroît, en même temps que son inertie, son énergie en lui communiquant de l'énergie cinétique. La relativité einsteinienne fait apparaître une relation simple entre l'énergie totale d'un corps E et son inertie I ; c'est la relation fondementale $E = Ic^2$ (où c est toujours la vitesse limite). Utilisant l'expression de l'inertie en fonction de la vitesse, on peut écrire cette relation sous la forme :

$$E = (1/\sqrt{1 - v^2/c^2} - 1)mc^2 + mc^2.$$

Le premier terme, dépendant de la vitesse et s'annulant pour $v = 0$, est tout simplement l'énergie cinétique E_{cin} du corps ; de fait, pour les faibles vitesses v, ce terme se réduit à l'expression newtonienne classique $E_{cin} \simeq mv^2/2$. Le second terme, $E_0 = mc^2$, est l'énergie du corps au repos ($v = 0$) ; c'est donc son énergie interne, dite encore énergie de masse.

L'identification qui apparaît ainsi entre masse et énergie interne (au coefficient c^2 près) est l'une des conséquences les plus célèbres et les plus marquantes de la relativité d'Einstein. C'est ce qu'on appelle, un peu rapidement sans doute, "l'équivalence masse-énergie". Elle implique une modification conceptuelle profonde de la notion même de masse et, en particulier, la perte de sa propriété d'additivité.

En effet, considérons plusieurs corps qui s'unissent en un autre plus stable, par exemple la réaction de combustion des atomes de carbone et d'atomes d'oxygène donnant naissance aux molécules de gaz carbonique, ou le cycle des réactions de fusion thermonucléaire conduisant de quatre noyaux d'hydrogène au noyau d'hélium (source de l'énergie stellaire). Il y a dégagement d'énergie (c'est le sens même de la stabilité) et donc diminution de l'énergie interne du corps final par rapport à la somme des énergies internes des composants. Il en va de même pour les masses, proportionnelles à ces énergies internes. Il n'y a plus additivité : la masse finale présente un "défaut" par rapport à la somme des masses initiales. Le dégagement d'énergie s'est fait aux dépens de la masse totale, ce qui permet d'exprimer le défaut de masse Δm en terme de la perte d'énergie interne ΔE_0 :

$$\Delta m = \Delta E_0/c^2.$$

Cependant, ce défaut de masse est infime dans la pratique quotidienne, car la valeur du coefficient de conversion $1/c^2$ est faible. Pour les assemblages mécaniques courants, le défaut de masse relatif $\Delta m/m$ ne dépasse guère 10^{-15} ; pour un système gravitationnel lié, tel le couple Terre-Lune, il est de l'ordre de 10^{-12} ; pour les composés chimiques liés par des forces électriques, il atteint à peine 10^{-7}. Enfin, dans le cas des forces nucléaires, par exemple pour la réaction de fusion thermonucléaire précitée, il devient de l'ordre du millième et peut approcher l'unité pour les liaisons entre particules fondamentales.

On voit donc que l'additivité de la masse reste valable avec une excellente approximation dans le domaine des sciences et techniques courantes (mécanique, chimie) ; elle ne doit être sérieusement remise en cause que pour les phénomènes nucléaires et subnucléaires, ou l'importance du défaut de masse relatif est un indice de l'intensité considérable des forces mises en jeu.

On a vu combien la relativité einsteinienne amenait à modifier la notion newtonienne de masse. En fait, le point de vue le plus systématique et le plus cohérent avec le principe de relativité consiste à définir la masse comme un "invariant relativiste" lié à l'énergie et à la quantité de mouvement d'un corps. Cela signifie que, si l'énergie E d'un corps et sa quantité de mouvement p sont variables avec sa vitesse et dépendent donc du système de référence utilisé, il existe une combinaison de ces grandeurs qui est invariante et prend la même valeur dans tous les référentiels. C'est justement la masse m, donnée par la relation :

$$E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2.$$

À vitesse nulle, dans le référentiel où le corps est au repos, on a $p = 0$ et l'on retrouve $mc^2 = E_0$, donnant l'énergie interne. À titre de comparaison, la relation de Galilée correspondante entre E, p et m s'écrit :

$$E = \frac{p^2}{2m} + E_0,$$

où l'énergie interne E_0 est indépendante de m. L'intérêt de ces considérations est de faire apparaître une possibilité nouvelle qu'offre la théorie d'Einstein par rapport à la théorie de Newton, à savoir la possibilité de corps de masse nulle, $m = 0$. Pour ces corps, on a $E = pc$; on peut voir, à partir de l'expression générale :

$$E = mc^2/\sqrt{1 - v^2/c^2},$$

que l'on doit toujours avoir $v = c$. Autrement dit, de tels corps se déplacent toujours à la vitesse limite c, qui est donc nécessairement invariante (indépendante du référentiel ; c'est l'une des bases de la relativité einsteinienne) : accroître ou diminuer leur énergie ne change pas leur vitesse. Il n'existe évidemment pas de référentiel où ces corps soient au repos. Ces corps sont très éloignés des objets de l'expérience courante. A l'heure actuelle, on connaît comme particules de masse nulle le photon, ou quanton de lumière (c'est pourquoi la vitesse limite c est celle de la lumière), et peut-être certains des neutrinos.

Masse et interactions

Nous savons que la matière est composée d'atomes, eux-mêmes composés d'électrons et d'un noyau constitué de particules plus fondamentales : les quarks et gluons, qui forment les nucléons, regroupés dans le noyau. La masse d'un corps quelconque est donc fournie par celle de ses constituants, en tenant compte du défaut de masse introduit plus haut. Un grand intérêt s'attache ainsi à la compréhension des masses des particules.

Or, dans la physique quantique des particules et des interactions fondamentales, la notion de masse présente plusieurs aspects des plus intéressants. Rappelons tout d'abord qu'une interaction entre deux particules est transmise par l'échange entre elles de particules médiatrices, des quantons du champ d'interaction, tel le photon, vecteur de l'interaction électromagnétique entre particules chargées (cf. PHYSIQUE QUANTIQUE).

Ces quantons intermédiaires sont dits "virtuels" ; leur existence éphémère, entre leur émission et leur absorption, ne peut dépasser, sous peine de violer la loi de conservation de l'énergie, une durée Δt liée, par l'inégalité de Heisenberg, à la dispersion en énergie $\Delta E \geqslant mc^2$ nécessaire pour assurer leur apparition :

$$\Delta t \leqslant \hbar/mc^2,$$

où $\hbar$ est la constante de Planck. Une action physique ne pouvant se propager à une vitesse supérieure à la vitesse limite c, la portée de l'interaction médiatisée par le quanton ne saurait agir à une distance supérieure à $c\Delta t$. En conséquence, la portée a d'une interaction est liée à la masse m du quanton qui la transmet par :

$$a \simeq \hbar/mc.$$

C'est ce raisonnement qui permit à Hideki Yukawa, en 1935, de prévoir la masse des méson π, responsables présumés des interactions nucléaires. La portée infinie des forces électromagnétiques s'explique grâce à la même formule, par la masse nulle du photon (cf. physique NUCLÉAIRE).

Il serait souhaitable, par ailleurs, que la théorie permette de comprendre et de calculer les valeurs des masses des particules.
Or, malgré les grands progrès de la théorie des interactions fondamentales, les masses des particules y posent de sérieux problèmes. Certains faits sont clairs : les masses des particules sont d'autant plus grandes que les interactions qui les régissent sont plus intenses. Ainsi, les leptons (électrons, muons, neutrinos) qui ne sont pas soumis aux interactions nucléaires fortes sont nettement plus légers que les hadrons (nucléons, mésons, etc.) qui y sont soumis. Cela s'explique : si la masse d'une particule est son énergie interne (à $1/c^2$ près), elle doit englober l'énergie dont les divers champs engendrés par la particule sont le siège, contributions d'autant plus fortes que ces champs correspondent à des interactions plus intenses.

Considérons par exemple le cas de l'électromagnétisme. Supposons qu'un électron hypothétique dépourvu de charge électrique (on le dit "nu") ait une masse m_0. Pour un électron réel, chargé, le champ électromagnétique qui l'entoure est porteur d'une énergie et donc d'une contribution δm à la masse totale m, qui est ainsi somme de ces deux termes :

$$m = m_0 + \delta m.$$

Seule la masse totale m est observable, bien que la théorie soit au départ exprimée à partir de la masse nue m_0. Il est donc nécessaire de "renormaliser" la théorie, pour l'exprimer en termes de la masse (renormalisée) m. Or le calcul, en électrodynamique quantique, fournit une valeur infinie pour la "correction" interactive δm, ce qui implique évidemment une valeur également infinie pour la masse nue m_0 (puisque m est finie). Malgré cette situation étrange, on peut mener de façon cohérente la renormalisation de la théorie et éliminer les infinités ainsi apparues. Cette procédure conduit à des résultats admirablement précis, mais ses fondements mathématiques restent ouverts à l'interrogation. De plus, dans le cas des interactions fortes (chromodynamique quantique), on ne sait pas à l'heure actuelle mener cette procédure à terme (cf. PARTICULES ÉLÉMENTAIRES).

Le problème fondamental reste de comprendre les échelles de masse des particules à l'intérieur mème de chaque famille. Ainsi, aucune ébauche d'explication n'existe encore pour comprendre les masses des leptons chargés – électron, muons, tauon –, qui sont dans les rapports respectifs 1 : 207 : 34.

En ce qui concerne les masses de leurs neutrinos, on ne sait pas si elles sont rigoureusement nulles, ou si, comme certaines indications récentes le laissent penser, les neutrinos muoniques et tauoniques ont des masses faibles, mais non nulles. Enfin, l'ordre de grandeur même de ces masses, par exemple celle de l'électron $m_e = 0,9.10^{-30} kg$, reste mystérieux (on donne en général son énergie de masse en électronvolts, à savoir $E_e = m_e c^2 = 0,51 MeV$). Les mêmes questions se posent pour la famille des quarks.

Ces questions sont d'un intérêt capital non seulement pour la physique des particules, mais aussi pour la cosmologie. Divers problèmes quant à l'évolution initiale de l'Univers ou à sa structure présente (par exemple, son caractère ouvert ou fermé) dépendent des masses de ces constituants – connus ou non. Ainsi, l'existence d'une masse neutrinique non nulle pourrait modifier qualitativement le contenu énergétique total de l'Univers, comme la présence éventuelle de particules lourdes hypothétiques (monopoles, axions ?). Il est possible que la solution des énigmes posées par les masses des constituants fondamentaux de la matière exige la formulation d'idées radicalement neuves.

JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND

Bibliographie

M. FANTIN, "Le Kilogramme américain rentre dans le rang", in *La Recherche*, n° 178, p.856, juin 1986 / R. FEYNMAN, *La nature de la physique*, Seuil, Paris, 1980 / C. KITTEL, W. D. KNIGHT & M. A. RUDERMAN, *Mécanique (Berkeley)*, Armand Colin, Paris, 5e éd. 1984 / L. LANDAU & E. LIFCHITZ, *Mécanique*, Moscou, 1960 / M. LE BELLAC, *Introduction à la mécanique*, Belin, Paris, 1985 / J. ROSMORDUC, *Une histoire de la physique et de la chimie*, Seuil, 1986 / E. TAYLOR & J. WHEELER, *À la découverte de l'espace-temps et de la physique relativiste*, Dunod, 1970 / M.-A. TONNELAT, *Histoire du principe de relativité*, Flammarion, Paris, 1971.