



La question qui tue !

Qu'est-ce qu'une particule sans masse?



Merce Cunningham dans
Collage III (1958).

Masse et distance

En physique des particules, énergies, masses, durées et distances sont intimement liées. En effet, deux constantes fondamentales interviennent sans cesse dans les calculs : la relativité s'appuie sur la vitesse de la lumière c , qui est le rapport d'une longueur et d'une durée, et la mécanique quantique fait apparaître la constante de Planck h , qui le produit d'une énergie et d'un temps. Une masse peut se traduire en terme d'énergie par la relation $E=mc^2$. Or une énergie est inversement proportionnelle à une durée (via h), et donc également inversement proportionnelle à une distance (par l'intermédiaire de c). On aboutit donc à ce que des masses élevées sont associées à des courtes distances, et des masses légères à des grandes distances... en particulier quand on étudie les particules véhiculant les interactions fondamentales.

Dans la vie courante tout objet a une masse. Cela signifie qu'il résiste à un mouvement qu'on voudrait lui imprimer et qu'il peut tomber : c'est un élément essentiel de sa définition. Tous les objets, aussi évanescents soient-ils, ont une masse, même un nuage, de la fumée ou un gaz ! Ces vues soutiennent parfaitement la conception newtonienne de la masse comme quantité de matière. Newton a établi la loi selon laquelle une force exercée sur un objet lui imprime une accélération qui lui est proportionnelle, la masse étant justement le coefficient de proportionnalité, représentant en quelque sorte la résistance que l'objet oppose à cette force. Une force agissant sur un objet de masse nulle, s'il en était, lui imprimerait une accélération infinie.

Dans le monde de la physique subatomique, nous traitons de particules de grande énergie. Or nous savons que les lois de la mécanique classique newtonienne ne sont plus valables quand les vitesses mises en jeu s'approchent de celle de la lumière dans le vide. Il faut alors recourir à la relativité restreinte, selon laquelle la masse est dans une relation d'équivalence avec l'énergie : l'une peut se transformer en l'autre et réciproquement. Autrement dit, si les circonstances s'y prêtent, la totalité de la masse d'une particule peut être convertie en « énergie pure ». Ainsi Einstein a pu déclarer : « la masse est une mesure de l'énergie qui est contenue dans un corps. » La masse est devenue une propriété des particules parmi d'autres : elle mesure la fraction de son énergie mobilisée sous forme « matière ». Rien n'interdit désormais d'imaginer une particule de masse nulle.

Attention : une particule sans masse n'est pas une particule sans énergie ! C'est « simplement » une particule dont aucune fraction de son énergie n'est « matérialisée ». Fort opportunément, la théorie de la relativité indique que quelle que soit sa masse (nulle ou non), aucun objet ne peut dépasser une vitesse limite, à savoir la vitesse de la lumière dans le vide. En particulier, un objet sans masse circule toujours à la vitesse de la lumière. Il ne peut pas être « au repos » : une force aussi petite soit-elle lui conférerait immédiatement la vitesse de la lumière.

Une particule sans masse existe-t-elle ?

Mais où trouve-t-on des particules sans masse ? Pour cela, il faut s'intéresser aux quatre interactions fondamentales (électromagnétique, interaction faible, interaction forte, gravité). On peut les décrire par des échanges de particules que l'on peut dire « messagères ». Moins ces particules échangées seront massives, plus la « portée » de l'interaction sera grande. Ainsi, l'interaction électromagnétique, qui a une portée infinie (jusqu'à nouvel ordre), est véhiculée par une particule messagère, le photon, de masse nulle. Ces photons se déplacent à la vitesse de la lumière dans le vide.

Il existe deux autres interactions dont on pense que les particules messagères sont de masse nulle : la gravité et l'interaction forte. Mais la situation est alors moins claire. D'une part, on n'a toujours pas observé de graviton, ni proposé de description théorique satisfaisante



Qu'est-ce qu'une particule sans masse?

de cette particule. D'autre part, les propriétés de l'interaction forte sont assez différentes de celle de l'électromagnétisme, de sorte que les gluons restent confinés au sein d'assemblages de quarks (voir Élémentaire N°4). Enfin, la quatrième interaction, dite faible (responsable entre autres de la radioactivité bêta) possède, elle, des particules messagères massives, ce qui donne lieu à des effets de courte portée. On voit donc qu'il existe bel et bien des particules sans masse, et qu'elles sont nécessaires pour décrire certaines des interactions fondamentales !

La bascule à neutrinos

Les neutrinos ont failli être les seules autres particules du Modèle Standard de la physique des particules à être sans masse. Depuis quelques années, les oscillations de neutrinos (voir « Théorie ») ont prouvé que ce n'était pas le cas : les neutrinos ont bel et bien une masse... mais une masse très petite, bien inférieure à celle des quarks et des leptons. Or les physiciens n'aiment guère ce genre de situation. On peut bien essayer d'imaginer un principe physique nouveau qui interdise aux neutrinos d'acquérir une masse. Mais alors, la masse est exactement nulle ! Comment expliquer une masse très petite ? Pour cela, on doit supposer un choix extrêmement particulier des paramètres théoriques qui décrivent notre compréhension actuelle de la physique des particules (le Modèle Standard)... Tout ça pour aboutir exactement aux valeurs des masses mesurées. Cette idée est assez déplaisante pour les physiciens qui préfèrent des théories « robustes », peu affectées par des modifications raisonnables des paramètres.

Pour échapper au problème, certains théoriciens ont invoqué l'existence de deux types de neutrinos pour chaque saveur (neutrino-e, neutrino-mu, neutrino-tau) : les uns seraient de masse nulle, les autres, supermassifs, seraient décrits par une théorie qui engloberait le Modèle Standard, mais décrirait également des phénomènes survenant à des énergies beaucoup plus élevées et, actuellement, inaccessibles expérimentalement. Ces différents types de neutrinos interagiraient les uns avec les autres, ce qui aboutirait à un résultat peu intuitif : les neutrinos de masse nulle se verraient dotés d'une masse très petite, inversement proportionnelle à l'échelle de masse des neutrinos supermassifs. Ainsi, plus le neutrino lourd est massif, plus le neutrino léger est... léger ! Cette idée amusante qui relie des masses très différentes fut surnommée mécanisme de bascule (« see-saw mechanism »).

Il n'est pas difficile de trouver des théories agissant à des échelles d'énergies très élevées, et aboutissant à des masses de neutrinos légers de l'ordre de celles observées expérimentalement via les oscillations de neutrinos (voir « Théorie »). Ce mécanisme n'est toutefois possible que si le neutrino est sa propre antiparticule, c'est-à-dire une particule dite de « Majorana ». Si cette hypothèse était vérifiée, il resterait à comprendre d'où viennent ces neutrinos supermassifs, et comment leur présence pourrait être détectée autrement que par leur contribution aux masses des neutrinos légers !

Ainsi, si une particule de masse nulle peut sembler peu intuitive, il n'est guère plus évident d'expliquer l'existence de particules de masse très faible... et il faut pour cela recourir à des particules supermassives ! Les neutrinos continueront-ils ainsi longtemps à fournir des paradoxes aux physiciens ?

