

Lundi 3 mai 2004 à 18 h

Us et abus du concept de masse

Bernard Vuilleumier

L'enseignement peine à faire comprendre aux élèves qui commencent à étudier la physique que la masse d'un corps n'est pas égale à son poids, que la masse correspond à une quantité de matière contenue dans le corps alors que le poids est la force avec laquelle la Terre attire ce corps. Les enseignants invoquent des exemples mille fois répétés : un kilogramme reste un kilogramme, que vous soyez sur la Terre ou sur la Lune, mais, si vous pesez votre kilogramme, vous n'obtiendrez pas le même résultat sur les deux astres ! En d'autres termes, la masse d'un corps est invariante alors que son poids dépend du lieu. Admettons que les élèves ont compris et assimilé cette distinction lorsqu'ils arrivent au collège et qu'il s'en trouve quelques-uns pour poursuivre l'étude de la physique. Ils découvriront alors certainement, en abordant la théorie de la relativité restreinte, une formule et une interprétation qui laissent entendre que la masse m d'un corps augmente avec sa vitesse selon l'expression

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

où m_0 est la masse au repos du corps, v sa vitesse, c la vitesse de la lumière dans le vide et β le rapport $\frac{v}{c}$.
 Disons-le sans ambages : l'interprétation qui considère que la masse d'un corps augmente avec sa vitesse est une horreur épistémologique. L'adopter, c'est renier un des acquis les plus importants de la relativité restreinte : le temps n'est pas universel; il ne s'écoule pas de la même manière dans tous les systèmes de référence.
 En revanche, la masse est un invariant. Il est donc de loin préférable d'attirer l'attention sur ce « temps relatif », - véritable nouveauté conceptuelle - qui est seul responsable de la difficulté croissante d'accélérer une masse lorsque sa vitesse approche celle de la lumière, plutôt que de laisser entendre que la masse du corps augmente avec sa vitesse. Les diagrammes d'espace-temps (voir lettre AM182) permettent d'illustrer cette question. Dans ces diagrammes, la masse m est un invariant, quel que soit le système de référence depuis lequel on l'observe :

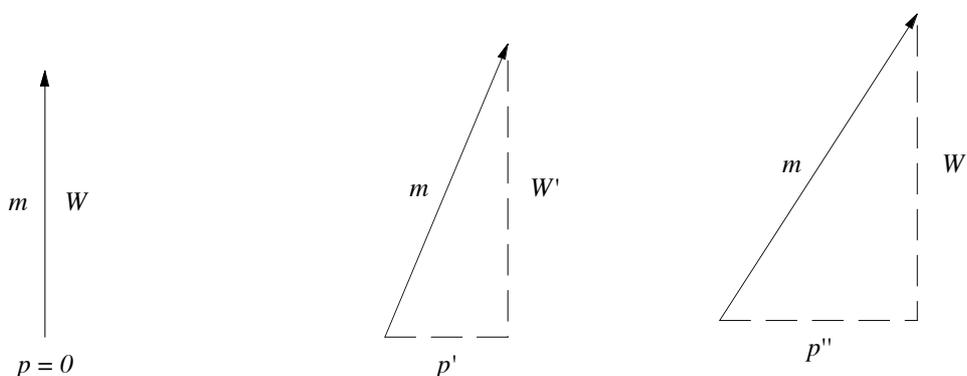


Fig. 1 : Vecteur énergie-quantité de mouvement d'une particule animée de différentes vitesses. En géométrie hyperbolique le carré de l'hypothénuse d'un triangle rectangle n'est pas donné par la somme des carrés des deux autres côtés, mais par leur différence. Le vecteur énergie-quantité de mouvement de la particule a donc la même grandeur dans les trois systèmes de référence. On appelle cette grandeur masse de la particule.

$$m = \sqrt{W^2 - p^2} = \sqrt{W'^2 - p'^2} = \sqrt{W''^2 - p''^2}$$

Le vecteur énergie-quantité de mouvement d'une particule a une composante temporelle W qui est l'énergie relativiste de la particule. Si la particule est en mouvement, il a une composante spatiale p qui est la quantité de mouvement de la particule. La grandeur du vecteur énergie-quantité de mouvement est la masse m de la particule.

Prochaine réunion : lundi 6 septembre 2004 à 17 h

Travaux pratiques

■ Exercice 1

- a) Expliquez pourquoi, contrairement aux apparences, la grandeur du vecteur énergie-quantité de mouvement, appelée masse de la particule, est la même dans les trois situations de la figure 1.
- b) Calculez la vitesse à laquelle se déplace la particule dans les trois systèmes.
- c) En admettant que la masse de la particule vaut m , exprimez son énergie et sa quantité de mouvement dans les trois systèmes.

■ Exercice 2

Dans les salons, vous entendrez souvent : « la masse peut se transformer en énergie et l'énergie en masse ». Cet énoncé assez vague résume quelques conséquences de deux principes fondamentaux tout à fait précis et non équivoques. Énoncez ces deux principes.

■ Exercice 3 (adapté de Taylor et Wheeler)

- | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | La masse garde la même valeur dans tous les systèmes inertiels. |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | L'énergie relativiste W garde la même valeur dans tous les systèmes inertiels. |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | L'énergie relativiste W d'un objet de masse nulle (photon) est nulle. |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | L'invariance de la masse signifie que cette masse ne varie jamais. |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | La masse peut être modifiée au cours d'une collision inélastique. |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | La masse varie toujours au cours d'une collision inélastique. |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | La masse peut varier au cours d'une collision élastique. |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | Un invariant est une grandeur qui ne varie pas sous l'action de forces extérieures. |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | Un invariant est une grandeur qui conserve la même valeur dans différents systèmes de référence. |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | La masse d'un système formé de n particules libres de se mouvoir est égale à la somme des masses de ces n particules. |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | La masse d'un système a une signification expérimentale précise. |

Lors de l'explosion d'une bombe à hydrogène de 20 mégatonnes, 0.93 [kg] de matière se transforme en énergie :

- | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | La masse de la bombe est la même avant et après l'explosion. |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | La masse de la bombe a diminué de 0.93 [kg] après l'explosion. |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | La somme des masses des constituants de la bombe ne change pas |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | La somme des masses des constituants de la bombe diminue de 0.93 [kg]. |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | Si on pouvait recueillir, refroidir et peser les produits d'une explosion nucléaire, leur masse serait inférieure à celle de la bombe |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | La relation d'Einstein $E = mc^2$ signifie que masse et énergie sont une seule et même chose. |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | L'équation $E = mc^2$ établit l'équivalence de la masse et de l'énergie. |
| <input type="checkbox"/> Vrai | <input type="checkbox"/> Faux | La masse et l'énergie sont deux grandeurs qui mesurent en fait la même chose. |

■ Pour en savoir plus

- Jean-Marc LEVY-LEBLOND, article « masse », CD *Encyclopaedia Universalis*, version 9, 2004.
- E. F. TAYLOR et J. A. WHEELER, *A la découverte de l'espace-temps*, Dunod, Paris 1970.