
Bulletin de l'Union des Physiciens

Association des professeurs de Physique et de Chimie

L'énergie après Einstein

Pour comprendre «eu égale emme cé-deux»

par Jean-Marc LÉVY-LEBLOND

Laboratoire de Physique Théorique et
Centre de Recherches en Histoire des Idées
Université de Nice - 06000 Nice

Cet article reprend la conférence donnée par J.-M. LÉVY-LEBLOND en ouverture des «Entretiens de la Villette» 1994 consacrée à l'ÉNERGIE. Nous remercions les organisateurs des entretiens de la Villette de nous avoir autorisés à reproduire le texte de cette conférence que l'on trouvera par ailleurs dans les Actes qui ont été publiés à cette occasion.

Faire comprendre en moins d'une heure ce que veut dire $E = Mc^2$, n'est pas chose facile. Aussi, vais-je plutôt essayer de vous expliquer ce que cette formule ne veut *pas* dire. Comme la plupart des énoncés centraux de la science contemporaine, elle a fait l'objet de tant d'exégèses, commentaires et dissertations diverses, qu'elle en est comme recouverte de nombreuses interprétations, souvent fallacieuses (figure 1). Il faut donc se livrer à tout un travail de décapage avant que de pouvoir s'attaquer à la formule elle-même, et c'est essentiellement à ce décapage que je voudrais procéder ici. D'ailleurs, $E = Mc^2$, comme toute autre formule, n'a aucun sens pris isolément ; elle appartient à

un ensemble de relations structurelles entre divers concepts physiques, et ne prend sa pleine signification qu'au sein de la théorie à laquelle elle appartient - à savoir, la théorie de la relativité einsteinienne.

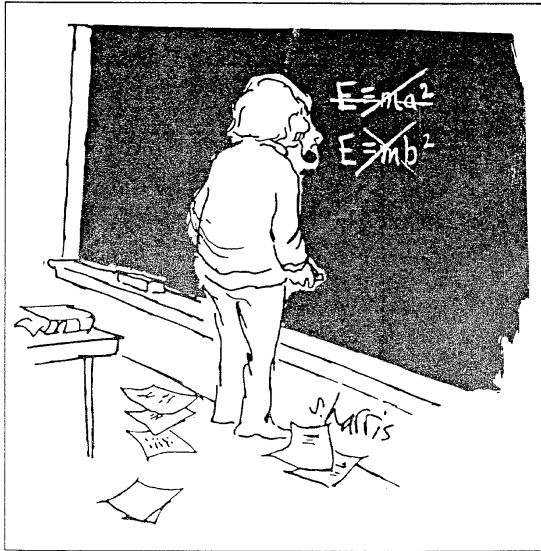


Figure 1

Reste que, contrairement à beaucoup d'autres aspects de la physique contemporaine, cette formule se prête à une certaine mythification, voire même parfois mystification, parce qu'elle est, ou qu'elle semble, très simple. Comment imaginer une formule plus élémentaire que celle qui lie trois grandeurs E , m , c , avec au surplus le seul petit nombre 2 (mais voir figure 2) ? De fait, les autres formules, même de base, relevant de la théorie de la relativité, telles les transformations de Lorentz, s'avèrent plus compliquées, à l'œil du profane en tout cas, et exhibent d'assez laides « racines de un moins vé-deux sur cé-deux » ($\sqrt{1 - v^2/c^2}$) en grand nombre. La formule $E = Mc^2$ affiche une trompeuse simplicité qui évidemment a joué pour beaucoup dans l'engouement dont elle a été l'objet, et l'a rendue souvent aussi fumeuse que fameuse. La difficulté en l'occurrence est la suivante : les grandeurs qu'elle fait intervenir (E , M , c) sont des grandeurs aux noms anciens et communs - l'énergie, la masse, la vitesse. Or, précisément, toute la révolution théorique menée par Einstein montre que ces concepts doivent être pris en un sens différent de leur sens initial.

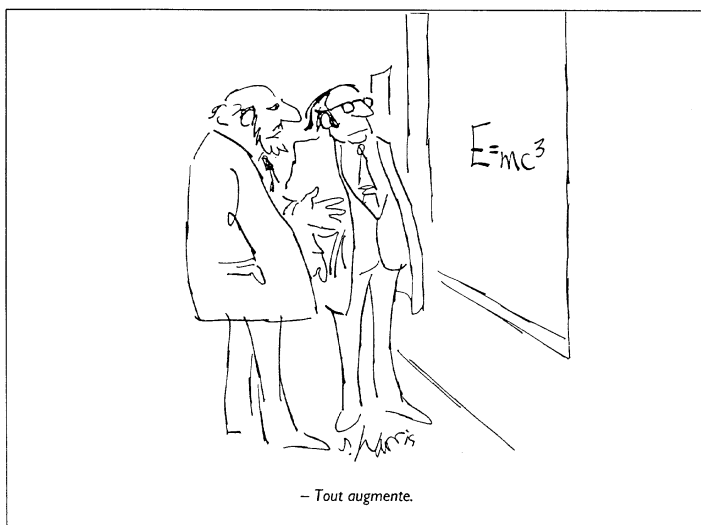


Figure 2

Dès qu'Einstein eut écrit $E = Mc^2$, les mots *énergie*, *masse* et *vitesse* changèrent de sens - en tout cas dans un certain contexte théorique. C'est là un problème épistémologique classique, que nous rencontrons dans presque toutes les disciplines de la physique, celui de la continuité, ou plutôt de la discontinuité sémantique au travers d'une révolution scientifique. Quand des idées radicalement nouvelles apparaissent, elles ne peuvent naître que sur le terreau ancien. Il est donc parfaitement naturel qu'elles soient formulées avec des mots anciens. Une fois ces idées nouvelles acceptées, on ne peut pas pour autant transformer toute la terminologie, puisque ce serait faire fi des subtiles liaisons entre l'ancien et le nouveau, et personne ne s'y reconnaîtrait.

Encore faudrait-il ne pas en être dupe et savoir que, après 1905, les mots *énergie*, *masse* et même le mot *vitesse* ont subi une profonde mutation - pour les physiciens, s'entend. Il y a là un paradoxe constitutif de la physique : elle avance des concepts non seulement nouveaux, mais relativement abstraits, éloignés de l'expérience courante, alors que nous ne disposons pour en parler que de la langue commune et de termes scientifiques empruntés aux époques passées de la science. Mais il faut en même temps affronter un autre paradoxe, spécifique, lui, de la physique contemporaine, son retard sur elle-même. Si l'on considère l'histoire de cette science au XIX^e siècle, on constate

que la communauté scientifique a en permanence accompli un effort considérable pour réinterpréter, voire renommer, ses concepts. Le travail de recherche théorique, la création scientifique proprement dite, s'est accompagné de façon à peu près systématique d'un travail de refonte épistémologique. Les physiciens pensaient en même temps qu'ils calculaient, ou en tout cas, très vite après. Je crains bien qu'il n'en soit plus de même, plus suffisamment en tout cas, depuis quelques décennies. Ainsi, la physique contemporaine est marquée simultanément par une très grande avancée sur le plan de son expression formalisée et de ses capacités expérimentales, et par un certain nombre de retards conceptuels et intellectuels dont je n'ai malheureusement pas le temps de débattre aujourd'hui.

Attaquons-nous donc enfin à la formule $E = Mc^2$. Avant d'en arriver à Einstein, essayons de nous rappeler ce que l'on savait avant lui. L'énergie, d'abord, dans ce que j'appellerai désormais la théorie classique, avant 1905, possède une caractéristique conceptuelle tout à fait fondamentale : on ne mesure que des différences d'énergie. On peut, en comparant deux états d'un même système, savoir quelle est la quantité d'énergie perdue ou gagnée, la différence entre l'énergie initiale et l'énergie finale, mais il n'y a pas de zéro d'énergie, et pas d'échelle absolue sur laquelle on pourrait la compter. En théorie classique, on ne peut pas parler de l'énergie absolue d'un corps, de l'énergie totale qu'il contiendrait. Or, c'est un trait assez général de la physique moderne que d'avoir introduit pour un certain nombre de grandeur des échelles absolues, là où l'on n'avait que des échelles relatives. On connaît, bien sûr, le cas de la température, où la fin du XIX^e siècle a vu s'imposer l'idée d'un «zéro absolu». On verra qu'on a un peu la même situation ici, dans le cas de l'énergie.

Maintenant, qu'est-ce que la *masse* dans la théorie classique ? Depuis Newton, on appelle masse d'un objet une mesure de la quantité de matière qu'il contient. C'est donc une idée statique. Mais cette grandeur a une autre fonction : elle mesure aussi la résistance à la modification du mouvement, autrement dit l'*inertie*, qui est une idée dynamique, liée au mouvement. C'est a priori un rôle différent. Il n'y a pas de relation évidente, sinon qualitative, entre la quantité de matière d'un corps et ce que l'on pourrait appeler son coefficient d'inertie. On sent intuitivement que les deux concepts sont liés : plus un corps est lourd, donc massif, plus il va être difficile de le mettre en mouvement ou de le freiner. Toutefois, il se pourrait que la relation entre la quantité de matière statique, la masse, et le coefficient d'inertie dynamique, ne

soit pas une pure et simple identification. Dans la théorie newtonienne certes, il y a identification, mais c'est justement ce qu'Einstein va mettre en cause. Il va montrer que la réfection de la théorie de l'espace-temps à laquelle il procède, la modification de notre conception de la géométrie spatio-temporelle, a une double conséquence sur le concept même d'énergie.

D'une part, il existe désormais un zéro absolu d'énergie. L'énergie interne d'un corps (indépendamment de l'énergie cinétique qu'il peut acquérir si on le met en mouvement), son contenu énergétique total, est fixée de façon absolue ; c'est une quantité proportionnelle à la masse du corps. La masse est désormais une mesure non seulement de la quantité de matière au sens classique, mais aussi du contenu énergétique intrinsèque de cette matière. C'est la première signification de la formule $E = Mc^2$: un corps contient une énergie interne proportionnelle à sa masse. Naturellement, si l'on met en mouvement ce corps, il va acquérir aussi de l'énergie cinétique. Dans la théorie einsteinienne, elle n'aura pas exactement la même forme en fonction de la vitesse, que dans la théorie newtonienne, mais peu importe ici.

D'autre part, l'inertie n'est plus identique à la masse. La résistance à la modification de l'état de mouvement d'un corps n'est plus constante, elle dépend de sa vitesse. Toute la théorie einsteinienne est liée de façon indissoluble à l'idée qu'il existe une vitesse limite, le c de la fameuse formule. Il faut pour qu'il soit, de fait, impossible d'accélérer un corps jusqu'à la vitesse limite c - et encore plus impossible de la dépasser - que ce corps oppose une résistance de plus en plus grande à la transformation de son état de mouvement, qu'il résiste de plus en plus à la tentative de l'accélérer, au fur et à mesure que son énergie augmente avec sa vitesse. Plus il va vite, plus il est difficile de le faire aller un peu plus vite. Sa résistance à l'acquisition d'une quantité donnée de vitesse sera de plus en plus grande, son inertie de plus en plus forte.

Techniquement, cela se traduit par le fait que dans la théorie einsteinienne, l'inertie ne s'identifie plus à la masse, mais à l'énergie. Et c'est la deuxième signification de la formule $E = Mc^2$, qui n'est que rarement explicitée. Il conviendrait de spécifier cette grandeur *inertie*, et de la repérer, par exemple en la notant I . L'on devrait alors écrire en fait **deux** formules en lieu et place de la traditionnelle $E = Mc^2$:

1) Une première, énonçant que le contenu énergétique interne d'un corps est lié à sa masse, qu'il est donné par cette masse multipliée par

une certaine constante, qui se trouve être le carré de la vitesse limite. Mais il faut insister sur le fait qu'il s'agit bien de l'énergie interne du corps, ou, ce qui revient au même, de son énergie lorsqu'il est au repos, et n'a pas d'énergie cinétique. Cette énergie interne, on peut la noter spécifiquement E_0 , l'indice précisant bien qu'il s'agit de l'énergie à vitesse nulle. On écrira alors : $E_0 = Mc^2$.

2) Une seconde formule, évidemment liée à la précédente, mais liant l'énergie E (totale, ici énergie cinétique comprise) et l'inertie I . Cette formule s'écrit : $E = Ic^2$. Bien entendu, pour une vitesse nulle (corps au repos), cette seconde formule se réduit à la première, puisque l'inertie, à faible vitesse, est donnée par la masse, comme l'indique déjà la théorie classique. De façon plus précise, la théorie indique la relation suivante entre masse, inertie et vitesse : $I = M/\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Comme on s'y attend, l'inertie croît indéfiniment quand la vitesse v tend vers la vitesse limite c .

La théorie einsteinienne modifie donc notre conception même de l'énergie, puisque désormais ce mot désigne à la fois la grandeur conservée au cours des transformations d'un système isolé, dont l'énergie potentielle et l'énergie cinétique sont deux formes spécifiques, **et** le coefficient d'inertie du système. Il faut insister sur la subtilité du rapport entre la notion classique et la nouvelle. Plus généralement, les relations entre deux théories dont l'une (ici, la mécanique de Newton) est une approximation de l'autre (ici, la mécanique d'Einstein), posent d'intéressantes questions épistémologiques. Pour les faibles vitesses, les petites énergies, la théorie einsteinienne se confond en effet avec la théorie newtonienne. A notre échelle, pour des vitesses de quelques dizaines de kilomètres par heure, et même par seconde, nous pouvons continuer à utiliser la bonne vieille théorie classique. La SNCF n'a pas besoin de recourir à la relativité einsteinienne pour établir les horaires des trains - même ceux des TGV. La théorie classique est simplement une approximation, aux faibles vitesses, de la théorie moderne einsteinienne. Mais cette approximation est **singulière**, et c'est un point qui est rarement indiqué avec suffisamment de force : on ne passe pas continûment et sans rupture d'un cadre conceptuel à l'autre. Formellement, on peut, bien entendu, prendre les équations einsteiniennes, y identifier tous les termes qui contiennent le coefficient c , et jouer à le faire tendre vers l'infini, c'est-à-dire considérer la limite où toutes les vitesses v sont négligeables devant c . On constatera ainsi que les équations einsteiniennes finissent par tendre vers les équations newtoniennes, comme il se doit. Mais cette manipulation mathématique

formelle des équations fait l'impasse sur la transformation conceptuelle des grandeurs qu'elles mettent en jeu. Il y a bien modification continue d'une théorie en une autre, mais aussi discontinuité de leurs significations conceptuelles. Sans une conscience aiguë de ce problème, on risque de commettre beaucoup d'impairs dans la compréhension de la physique contemporaine.

Reste dans la formule $E = Mc^2$ une grandeur à discuter. Qu'est-ce que c ? La «vitesse de la lumière», dit-on... Mais pourquoi la lumière ? Que vient-elle faire quand on applique la formule à la physique nucléaire, par exemple ? Dans ce domaine, la masse, donc l'énergie, change par le jeu des forces nucléaires spécifiques à l'intérieur du noyau atomique, forces qui n'ont strictement rien à voir, pour autant que nous le sachions aujourd'hui, avec les interactions électromagnétiques dont la lumière (plus généralement, le champ électromagnétique) est l'agent. De fait, la lumière n'a rien à faire dans la plupart des situations physiques (sauf celles concernant l'électromagnétisme) où l'on emploie la formule $E = Mc^2$. Dans cette formule, c n'est **pas** la vitesse de la lumière, et devrait plutôt être appelée «vitesse limite», ou, mieux, «constante d'Einstein». En fait, il existe dans la structure de l'espace temps einsteinien une constante structurelle, c , qui a les dimensions d'une vitesse, se mesure en unités d'espace divisés par un temps et qui régit en quelque sorte, le rapport entre l'espace et le temps. Cette constante d'Einstein en tant que telle n'est pas fondamentalement différente de bien d'autres constantes de la physique, connues (comme la constante de Joule) ou cachées, comme l'exemple suivant le montre. Il s'agit d'une métaphore, qui, même si elle peut sembler naïve, est parfaitement valide. Dans l'aviation, on ne mesure pas les distances verticales et les distances horizontales avec la même unité. On mesure les verticales en pieds, les horizontales en milles. Pour faire des conversions, on utilise une «constante universelle» qui permet d'exprimer le rapport des hauteurs verticales aux distances horizontales (en pieds/milles). La constante c dans la plupart des formules einsteiniennes est un coefficient de même nature, dont la signification est géométrique, ou plutôt **chronométrique**, qui permet de transformer des secondes en mètres, ou mieux, des années (temps) en années-lumière (distances). Exactement comme la «constante aéronautique» permet de transformer des milles en pieds.

On montre ensuite, dans le développement de la théorie, que cette constante, qui vaut environ trois cent mille kilomètres par seconde et qui a donc les dimensions d'une vitesse, acquiert un sens physique en

repérant une vitesse limite, indépassable. Les objets usuels, de vitesse variable, quelle que soit l'énergie qu'on leur communique, ne peuvent jamais atteindre la vitesse limite. Mais, et c'est l'une des singularités fort peut intuitives de la théorie einsteinienne, il existe des objets, sans analogue au niveau classique, de masse nulle (au sens einsteinien de la masse, bien sûr), qui, eux, se déplacent **toujours** à la vitesse limite, ni plus loin, ni moins. Il semble que la lumière est composée de tels objets, les photons, et se propage donc bien avec cette vitesse limite ; mais cette assertion est soumise à vérification expérimentale, et pourrait un jour ne se révéler qu'approximativement valide - autrement dit, la lumière n'irait plus à la «vitesse de la lumière»... Ainsi, appeler «vitesse de la lumière» la constante d'Einstein conduit à singulièrement rétrécir sa signification, au risque de sérieux malentendus. Il ne faut donc pas attribuer à cet agent physique particulier qu'est la lumière un rôle dans une situation physique beaucoup plus générale, où il n'a rien à faire, l'équivalence universelle entre masse et énergie.

Bien entendu, la très forte valeur numérique de la constante d'Einstein exprimée avec nos unités courantes (trois cent mille kilomètres par seconde) n'est pas sans importance quant au statut assez ésotérique encore de la relativité einsteinienne. Car le contenu empirique de la formule d'Einstein, comme de l'ensemble de sa théorie, aussi étrange qu'elle paraisse, est désormais parfaitement assuré. Il se vérifie quotidiennement dans les expériences des laboratoires de physique des particules, par exemple, ou dans les observations des grands observatoires astronomiques. Chaque fois qu'un corps change de masse, il change d'énergie interne, chaque fois qu'il change d'énergie totale, il change d'inertie. Mais pourquoi alors a-t-il fallu attendre 1905 pour s'en apercevoir ? Parce que le contenu énergétique d'un corps est gigantesque par rapport aux grandeurs de notre échelle courante. En fait, la constante c , exprimée avec nos unités quotidiennes, est tellement grande, 300 000 km/s, soit au carré $10^{17} \text{ m}^2/\text{s}^2$, que l'équivalence entre m et E est disproportionnée : une masse de un kilogramme équivaut à 10^{17} joules. Le contenu énergétique d'un morceau de matière ordinaire est tellement gigantesque que les modifications de son énergie cinétique, quand je l'accélère, ou quand j'en extrais un peu d'énergie potentielle, sont infimes par rapport à son énergie totale, et ne se manifestent pas de façon perceptible à notre échelle sur sa masse ou son inertie.

Dit d'une autre manière, ce zéro d'énergie que révèle la théorie de la relativité est tellement bas par rapport au niveau d'énergie où nous

opérons, il faut descendre tellement bas en énergie pour arriver à ce zéro, que nous ne l'avons pas perçu pendant très longtemps. La situation est tout à fait similaire, de ce point de vue, à celle du zéro absolu de température, sauf que l'échelle ici est beaucoup plus considérable.

Permettez-moi pour conclure d'insister sur la nécessité de la réflexion conceptuelle, aussi importante pour la science aujourd'hui que le développement technique. Faute de développer cette vision, nécessairement critique, nous risquerions de nous retrouver dans un monde de machines, aussi bien matérielles qu'intellectuelles, qui fonctionneraient assez bien, mais que nous ne comprendrions plus. C'est dire que le progrès de la science n'a rien d'assuré... (figure 3).

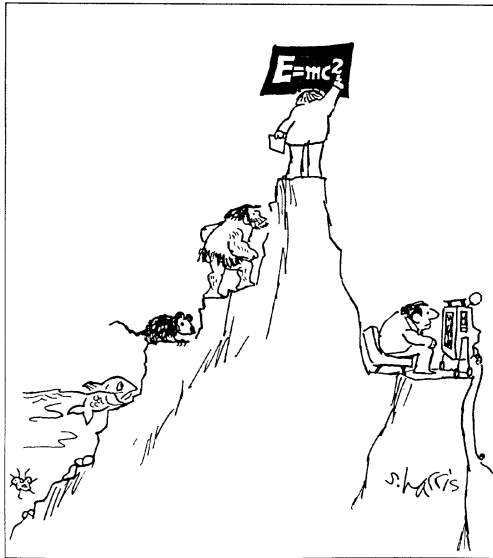


Figure 3

BIBLIOGRAPHIE (sélective)

- Jean-Marc LÉVY-LEBLOND - «Les Relativités», *Les Cahiers de Fontenay* n° 8 (septembre 1977).
- Jean-Marc LÉVY-LEBLOND - «La Relativité aujourd'hui», *La Recherche* n° 96, p. 23 (janvier 1979).
- *Encyclopaedia Universalis*, article «Masse» (JMLL).
- Collectif sous la direction d'Émile NOËL, *L'Espace et le temps aujourd'hui* («Points-Sciences», Seuil 1983).

QUESTIONS***Jean DESCHAMP, ingénieur retraité***

Je voudrais vous poser deux questions auxquelles j'ai réfléchi et qui me préoccupent. Premièrement, il est écrit par Georges Bruhat que le photon a une quantité de mouvement $h\nu/c$ et une masse $h\nu/c^2$. Est-ce qu'on peut l'admettre ou non ?

Ma deuxième question est relative au voyageur de Langevin. Qui n'a compris que superficiellement la théorie de la relativité restreinte peut dire, qu'après tout ce n'est jamais qu'une illusion d'optique. Que pensez-vous de l'exemple du voyageur de Langevin qui revient, et se trouve situé, s'il n'est pas mort, dans un temps qui n'est plus du tout celui qu'il a connu ?

Jean-Marc LÉVY-LEBLOND

Je réponds à la première question d'abord parce qu'elle est centrale. On retrouve dans beaucoup de manuels anciens, et Bruhat ne fait pas exception, cette situation à laquelle j'ai fait allusion : une formulation théorique conséquente, mais décrite avec des mots et un langage qui ne sont plus adaptés. Aujourd'hui, je crois que nous utiliserions un langage un peu différent. Tout le monde est d'accord sur la quantité de mouvement d'un photon, c'est effectivement $h\nu/c$, c'est l'alliance de la théorie quantique et la théorie de la relativité qui nous le dit. Par contre, nous ne considérons pas $h\nu/c^2$ comme sa masse, mais comme son inertie. Il s'agit bien d'introduire ce concept ès-qualité. Nous l'avons dit plus haut, le photon n'a pas de masse, parce que la masse c'est la quantité de matière que possède un corps quand je le pose, qu'il est immobile. Mais je ne peux pas poser le photon, il est continuellement en mouvement. Il échappe donc à cette caractérisation. Je ne peux parler

du contenu énergétique d'un corps immobile, ou de ce qu'on appelait autrefois sa «masse au repos», quand il n'a pas de repos !

Quand à la deuxième question, il ne s'agit pas ici de critiquer nos prédécesseurs qui ont fait, comme Bruhat, d'excellents livres, mais tout naturellement marqués par le contexte historique, épistémologique, intellectuel de leur époque. Beaucoup d'énoncés de cette époque, il y a quelques décennies, mettent l'accent sur les aspects les plus paradoxaux de la théorie einsteinienne, notamment sur le voyageur de Langevin, alors que les présentations modernes montrent bien qu'il s'agit d'un faux paradoxe. Encore faut-il l'énoncer avec les mots les plus adaptés et dissiper des ambiguïtés dues à de mauvaises formulations. La théorie du voyageur de Langevin est journallement vérifiée dans les laboratoires. Non pas bien, évidemment, avec un être humain, parce qu'il s'agirait de l'envoyer si loin et à des vitesses si élevées que nous n'en sommes pas capables aujourd'hui. Mais dans le monde microscopique, il y a des milliards de particules qui nous arrivent dans les rayons cosmiques ou qui tournent dans nos accélérateurs, et qui sont de vrais voyageurs de Langevin. De fait, on vérifie bien que leur durée de vie n'est pas la même que celle de leurs congénères au repos.

Olivier FAIVRE, de l'École supérieure de journalisme de Lille

Vous sembliez ne pas vouloir identifier la vitesse du photon à la vitesse limite. Le fait que le photon ait une masse nulle n'est-il pas une raison suffisante pour dire qu'il y a identification ? Sinon, quelle est la raison pour ne pas faire cette identification ?

Jean-Marc LÉVY-LEBLOND

Toute la question justement est de savoir si la masse du photon est vraiment nulle ! Si tel est le cas, la vitesse limite est bien identique à la vitesse de lumière. Mais, même dans ce cas, l'une des raisons pour lesquelles il convient de distinguer ces deux termes, c'est qu'il se peut que la vitesse limite ne soit pas **seulement** la vitesse des photons : les neutrinos, qui sont d'autres particules fondamentales, ont peut-être aussi une masse nulle et se déplacent alors aussi à la vitesse limite. Maintenant il s'agit de savoir si le photon a vraiment une masse nulle. Pour un physicien, il est absolument impossible d'affirmer qu'une grandeur, quelle qu'elle soit, a rigoureusement la valeur zéro, pas plus d'ailleurs que n'importe quelle autre valeur. Toute ce que je sais de la masse du photon, c'est ce que disent mes collègues expérimentateurs : «Elle est très faible ! Inférieure, selon nos mesures actuelles, à

10^{-50} kg». Mais si demain, on découvre que cette masse est non-nulle, alors, le photon ne va pas à la vitesse de la lumière... Certes, il irait presque toujours à une vitesse tellement proche de la vitesse limite que nous ne verrions que très difficilement la différence, mais conceptuellement, il pourrait exister des photons immobiles, et la différence est essentielle. Or, nous ne saurons évidemment jamais si la masse est rigoureusement nulle ; nous pourrions diminuer la borne supérieure, mais jamais l'annuler.

Acceptons donc l'idée que la masse du photon est nulle, et que les photons vont à la vitesse limite, mais n'oublions pas que ce n'est pas une nécessité. Cela est important pour la raison suivante. Supposez que demain un expérimentateur soit capable de vraiment mettre la main sur le photon, et de dire qu'il n'a pas une masse nulle. Qu'il a une masse de, mettons 10^{-60} kg. Sa masse n'est pas nulle, et du coup la lumière ne va plus à la «vitesse de la lumière». Vous pouvez imaginer les gros titres dans tous les journaux : «La théorie de la relativité s'effondre», «Einstein s'est trompé», etc.

Or cette éventuelle observation ne serait en rien contradictoire avec la théorie de la relativité ! Einstein a certes construit sa théorie en analysant des échanges de signaux lumineux propagés à la vitesse limite. Si on trouve que le photon a une masse non-nulle, ce sera que cette vitesse n'est pas la vitesse limite, et la démonstration initiale s'effondre donc. Mais ce n'est pas parce qu'une démonstration est erronée que son résultat est faux ! Quand vous avez une table à plusieurs pieds, vous pouvez en couper un, elle continue à tenir debout. Et heureusement, la théorie de la relativité a plusieurs pieds. Nous savons depuis une bonne cinquantaine d'années, bien que ce ne soit pas encore de notoriété suffisamment publique, y compris dans l'enseignement, que l'on peut complètement se passer de ce prétendu «second postulat» d'Einstein sur l'invariance de la vitesse de la lumière. S'il faut s'en débarrasser, cela ne posera aucun problème de le remplacer, et ne mettra pas en péril l'édifice de la théorie elle-même.

Question

Comment peut-on comprendre qu'un photon ait une quantité de mouvement alors qu'il a une masse nulle ? Si l'on part de la définition de la quantité de mouvement $P = Mv$, comment comprendre que M étant nulle, P soit différent de zéro ?

Jean-Marc LÉVY-LEBLOND

Nous rencontrons une fois de plus cette situation où il faut prendre garde de ne pas extrapoler dans une théorie des concepts qui cessent justement d'y être valables. La formule $P = Mv$ est établie au sein de la théorie newtonienne, dans une conceptualisation où la masse, la vitesse et la quantité de mouvement ont une certaine signification. Quand on passe en théorie einsteinienne, ces trois concepts mutent. Ainsi, la bonne formule einsteinienne n'est **pas** $P = Mv$, tout au moins si l'on désigne bien par M ce que la physique moderne appelle *masse*, celle de l'objet au repos. La formulation correcte consiste à écrire $P = Iv$, I étant le coefficient d'inertie introduit plus haut, et qui généralise l'**une** des facettes newtoniennes de la notion de masse. Cette formule est d'ailleurs déjà correcte en théorie newtonienne, puisque le coefficient d'inertie y est identique à la masse. Quand Newton énonce que la force, ce n'est jamais que la dérivée par rapport au temps de la quantité de mouvement, cela signifie qu'il faut une force pour changer une quantité de mouvement, qui est, pour lui, proportionnelle à la masse. Par conséquent, plus la masse est grande, plus il va falloir une grande force. Donc, dans la formule de Newton, c'est fondamentalement la masse en tant qu'inertie qui intervient. C'est bien pour cela que lorsque l'on la généralise dans le cadre einsteinien, il faut faire intervenir explicitement le coefficient d'inertie.

Pour en revenir au photon, son inertie, en théorie einsteinienne, ne peut s'exprimer en fonction de sa masse parce qu'elle est nulle, ni en fonction de sa vitesse, parce qu'elle est invariante. De fait, la grandeur *quantité de mouvement* est, d'un certain point de vue, plus fondamentale que les grandeurs *masse* ou *vitesse*, puisque même des particules qui n'ont pas de masse, ou dont la vitesse ne peut changer, ont quand même une quantité de mouvement - comme elles ont d'ailleurs aussi une énergie. Les grandeurs *énergie* et *quantité de mouvement*, parce qu'elles sont liées à de grandes lois de transformation, sont en fait les grandeurs essentielles. Dans une présentation moderne, il convient ainsi de mettre au premier plan les grandeurs conservées, la quantité de mouvement, l'énergie, et de poser dans un second temps la question de savoir comment on les exprime en termes des masses et des vitesses.

* * *

Le leitmotiv de cet exposé a été la nécessité d'être suffisamment attentif dans le maniement des concepts pour ne pas poser, dans un nouveau cadre conceptuel, des questions qui n'avaient de sens que dans

l'ancien. On peut éclairer cette assertion par une analogie qui a eu son heure de vérité historique. Quand on a commencé à comprendre que la Terre était ronde, on s'est dit qu'il devait y avoir des gens de l'autre côté. Le problème fondamental devenait alors : s'il y a des gens aux Antipodes, comment font-ils pour ne pas tomber ? Ce problème est tout à fait du même ordre que de poser à la quantité de mouvement dans le cadre einsteinien une question qui n'est valable que dans le cadre newtonien. Si la Terre est ronde, cela veut dire que la notion même de chute, c'est-à-dire de haut et de bas, doit être modifiée en même temps que la forme de la Terre. On ne peut pas à la fois accepter que la Terre soit ronde, et continuer à penser qu'il existe un haut et un bas absolus. On est obligé de faire muter tout le système conceptuel, de façon à accepter l'idée que le haut et le bas, désormais, sont relatifs à l'endroit où l'on se trouve sur la Terre. C'est pourquoi les gens des Antipodes ne tombent pas !

En d'autres termes, une théorie est un tout organisé, un jeu de concepts articulés, et on ne peut considérer l'un d'entre eux sans prendre en compte la façon dont il s'articule avec les autres.