

tion du monde. Pendant longtemps, les physiciens se sont demandés quelle était la vitesse de propagation de la lumière. Galilée, déjà, savait que le son se propage à une vitesse finie. Il avait mesuré cette vitesse, puis il avait tenté de mesurer la vitesse de la lumière en plaçant des assistants, de nuit, sur des collines distantes de quelques kilomètres : il ouvrait la porte d'une petite lanterne et mesurait le temps après lequel il voyait une autre lanterne s'ouvrir sur une colline voisine ; en divisant la distance entre les collines par la moitié du temps mesuré, il espérait déterminer la vitesse de la lumière. L'expérience n'a pas donné de mesure fiable, mais Olaf Römer, au XVII^e siècle, obtint une valeur de la vitesse de la lumière en utilisant des bases astronomiques. La première bonne mesure de la vitesse de la lumière fut toutefois l'œuvre des physiciens français Léon Foucault et Hippolyte Fizeau, au milieu du XIX^e siècle.

Ces derniers trouvèrent une valeur de la vitesse de la lumière égale à environ 300 000 kilomètres par seconde. Les physiciens ne furent pas surpris de cette valeur particulière, mais une caractéristique inattendue apparut quand on observa, vers la fin du XIX^e siècle, que cette vitesse de la lumière semblait intervenir aussi dans des phénomènes électriques ou magnétiques, qui paraissaient tout à fait indépendants des phénomènes optiques : quand on effectue des mesures de magnétostatique, avec des aimants qui ne bougent pas, et d'électrostatique, avec des charges électriques immobiles, une relation numérique simple entre les constantes électriques et magnétiques permet de retrouver une vitesse qui, numériquement... est voisine de celle de la lumière !

Est-ce une coïncidence ? Le physicien écossais James Clerk Maxwell montra que non, lorsqu'il intégra l'électricité et le magnétisme dans une théorie plus générale, l'électromagnétisme, prédisant du même coup l'existence d'ondes électromagnétiques, qui se propagent à la vitesse de la lumière. Ainsi la lumière est un phénomène électromagnétique, une forme d'ondes électromagnétiques parmi d'autres. On comprend alors que la vitesse de la lumière caractérise une immense classe de phénomènes. Au lieu de parler de vitesse de la lumière,

on devrait parler de vitesse électromagnétique.

L'inattendu, cette fois, était complet, car, avant son apparition, nul ne savait comment le problème serait résolu. En outre, le travail de Maxwell eut un fruit merveilleux : il introduisit en physique le concept, nouveau, de champ. Jusque vers 1860, la physique vivait sur l'acquis newtonien, lequel admettait que le monde était composé de corpuscules et de forces qui agissent entre eux. La théorie de l'électromagnétisme nous apprit à penser en termes d'entités globales, étendues, non localisées.

Cette découverte eut d'autres conséquences, notamment sur les théories cosmologiques. Avant la théorie électromagnétique, on croyait que la lumière se propageait dans un milieu étrange, que l'on avait nommé l'éther. Ce mot, tiré du grec, désignait n'importe quelle substance extrêmement volatile ; les pharmaciens et les chimistes avaient depuis longtemps nommé éther un corps effectif, volatil, et les physiciens employaient ce même mot pour désigner une substance hypothétique qui avait la propriété d'entrer dans tous les pores de la matière : puisque la lumière se propage dans le verre, si l'éther est

le support de la propagation des ondes lumineuses, tout comme l'eau est le support de la propagation des vagues, c'est que l'éther s'infiltrait dans le verre ; plus généralement, il était présent, pensait-on, dans tous les matériaux.

On avait inventé l'éther pour que les ondes électromagnétiques puissent se propager dans le vide, mais cet éther créa plus de difficultés qu'il n'en résolut : il devait être incroyablement plus ténu et plus fluide que tous les milieux matériels connus, mais, en même temps, il devait être incroyablement rigide. Pourquoi incroyablement rigide ? Parce que la vitesse de propagation d'une onde dépend de la rigidité du milieu : le son, par exemple, se propage beaucoup plus vite dans l'acier, rigide, que dans l'air, qui est mou. Cette relation entre rigidité et vitesse du son résulte du fait que, quand on fait bouger une molécule à une extrémité du milieu matériel de propagation, les interactions moléculaires propagent l'ébranlement de proche en proche, avant de mettre en mouvement des molécules de l'autre extrémité ; plus le milieu est dense, plus les interactions sont nombreuses, et plus l'ébranlement se propage rapidement. Par conséquent, si la lumière se propageait dans l'éther à une vitesse si élevée, c'était, semblait-il, que l'éther était incroyablement rigide.

ÉLECTROMAGNÉTISME ET RELATIVITÉ

Pouvait-on mettre en évidence le mouvement de la Terre dans l'éther ? L'éther semblait traverser la Terre, comme tous les autres milieux matériels, mais la Terre en mouvement dans l'Univers transportait-elle son éther avec elle ? C'était improbable pour plusieurs raisons. D'abord l'éther semblait si fluide qu'il devait traverser la Terre sans être entraîné par elle. Deuxièmement, des mesures astronomiques montrèrent que la lumière émise par les étoiles permettait de mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport aux étoiles lointaines (phénomène d'aberration), ce qui prouvait que la lumière n'était pas entraînée par l'hypothétique éther.

La notion de champ débarrassa la physique de la notion d'éther : elle permit de concevoir la propagation d'une



1. Appareil utilisé par Léon Foucault pour mesurer la vitesse de la lumière.

Musée des arts et métiers - CNAM - Paris

onde sans milieu sous-jacent. Autrement dit, la notion d'onde, qui, jusque vers 1865, ne semblait correspondre qu'à la déformation d'un milieu, devint brusquement un être à part entière, qui n'avait plus besoin de substrat. L'onde, ou plutôt le champ, devient un objet physique.

Pouvait-on alors mesurer directement la vitesse de la lumière par rapport à la Terre? Dans un train, on peut mesurer la vitesse des sons émis à une extrémité du wagon : elle est différente de celle que l'on mesure à partir du repère immobile des rails : le son, qui se propage dans le couloir du wagon à 300 mètres par seconde, se propage à 300 mètres par seconde plus 10 ou 20 mètres par seconde (la vitesse du train) pour quelqu'un qui est immobile sur le quai d'une gare. Peut-on faire la même expérience avec la lumière? C'est la fameuse expérience du physicien américain Albert Michelson (1851-1931), qui donna un résultat négatif, au début du siècle. Le résultat était inattendu : la vitesse de la lumière ne s'additionnait pas avec celle de la Terre, comme on s'y attendait depuis Galilée.

Pourquoi la vitesse de la lumière refusait-elle obstinément de s'ajouter? Albert Einstein montra qu'elle est une limite absolue, valable pour tous les corps. On découvrit d'abord que la vitesse de la lumière est identique dans tous les repères : la lumière émise par un corps qui se déplacerait aux neuf dixièmes de la vitesse de la lumière serait, pour nous, toujours, de 300 000 kilomètres par seconde. À la fin du XIX^e siècle, la vitesse de la lumière apparut ainsi comme une limite.

Naturellement des physiciens proposèrent alors de procéder comme pour les températures, afin que la vitesse de la lumière, valeur inaccessible (sauf pour la lumière), soit considérée comme infinie : de même qu'il est de plus en plus difficile de s'approcher de la température du zéro absolu, il est de plus en plus difficile de s'approcher de la vitesse de la lumière. En revanche, une différence apparut, parce qu'il semble exister deux types d'objets matériels. Nous sommes habitués aux objets massifs, tels les atomes ou leurs particules : quand on les accélère, leur masse, c'est-à-dire leur quantité de matière, ne change pas, mais

leur inertie, c'est-à-dire la résistance à la transformation de l'état de mouvement, croît indéfiniment. D'autre part, les photons, ou «grains de lumière», ont toujours la vitesse de la lumière : comme les neutrinos, sans doute, ils ont une inertie nulle.

Ces considérations approfondissent la notion de vitesse. Dans un train, il existe plusieurs façons de mesurer la vitesse

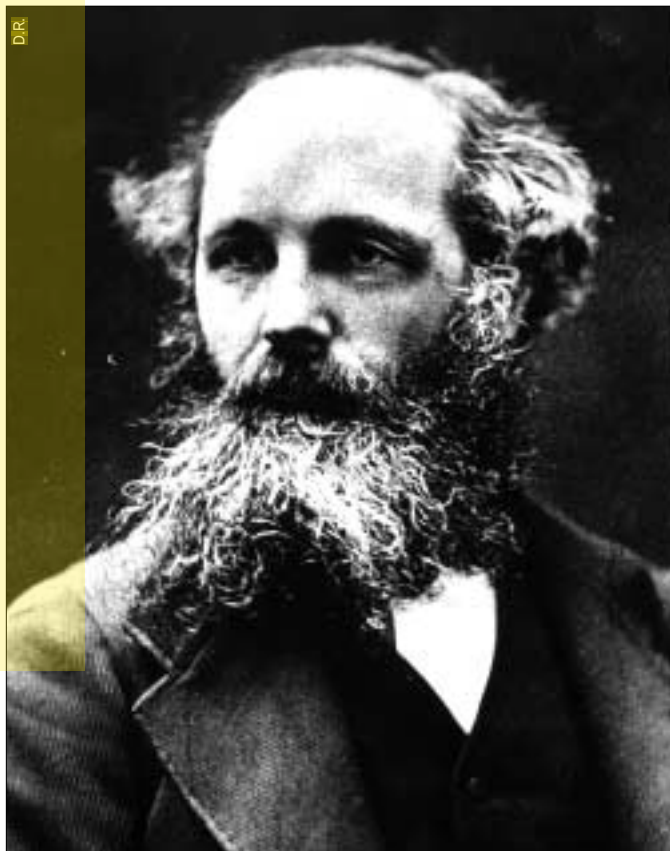
d'un système physique. Or l'accélération est le taux de variation de la vitesse avec le temps : ayant mesuré l'accélération, on peut l'«intégrer» en fonction du temps, afin de calculer la vitesse moyenne. Dans le cadre de la mécanique classique, galiléenne, ces deux mesures de vitesse donnent les mêmes résultats. La deuxième mesure, c'est-à-dire l'intégration de l'accélération dans le train, est une

mesure beaucoup plus naturelle, intrinsèque. Or cette mesure-là, curieusement, dans le cadre einsteinien, donne un nombre qui peut aller jusqu'à l'infini.

Pourquoi? Parce que la notion de vitesse galiléenne a plusieurs propriétés. C'est le rapport de l'espace parcouru au temps mis à le parcourir. C'est aussi une grandeur qui s'ajoute, mais dans le cadre einsteinien, cette seconde propriété correspond à une nouvelle grandeur. Les physiciens la nomment plutôt rapidité. Les deux grandeurs sont liées : connaissant l'une, on peut calculer l'autre et réciproquement, mais ce sont deux généralisations différentes de la notion initiale de la vitesse.

D'autres inattendus sont-ils... attendus? Toutes les constantes de la physique peuvent-elles être considérées comme infinies, par une méthode analogue à celle que nous avons déjà examinée deux fois? Ne généralisons pas, mais ne soyons pas non plus surpris ou choqués, si l'on découvre une nouvelle limite : pen-

sons par exemple à l'âge de l'Univers, que les astrophysiciens calculent égal à 15 milliards d'années environ. On peut montrer que cette valeur finie a, en réalité, un contenu infini. Ainsi, l'Univers peut être à la fois âgé de 15 milliards d'années et infiniment vieux...



2. Le physicien écossais James Clerk Maxwell (1831-1879) expliqua la relation inattendue entre l'électrostatique, où les charges électriques sont immobiles, la magnétostatique, où les aimants ne bougent pas, et la propagation de la lumière.

par rapport aux rails. La plus banale consiste à regarder par la fenêtre et à examiner les bornes kilométriques, ainsi que les horloges sur les quais des gares. En divisant la distance parcourue par le temps écoulé entre deux gares, on obtient la vitesse moyenne entre les deux gares. La vitesse ainsi mesurée est toujours inférieure à celle de la lumière, quelle que soit l'accélération du train. Imaginons maintenant que nous soyons enfermés dans un wagon, que quelqu'un ait baissé le rideau et que nous voulions connaître la vitesse du train. Dans le wagon, on ne ressent pas l'impression de vitesse, mais on sent l'impression d'accélération éventuelle : une valise peut tomber d'un filet quand le train accélère beaucoup, et un pendule s'incline. La mesure d'une accélération peut ainsi se faire de l'inté-

Jean-Marc LÉVY-LEBLOND est professeur de physique à l'Université de Nice. Il publie aux éditions Gallimard le livre *Aux contraires (L'exercice de la pensée et la pratique de la science)*.

Ce texte est une transcription partielle du débat enregistré avec Émile Noël au Palais de la Découverte. Ce débat sera diffusé sur France Culture le 6 novembre 1996.