



Lumière sur l'espace-temps

Jean-Philippe Uzan

CNRS/Institut d'Astrophysique de Paris
et Institut Henri Poincaré

La compréhension de la nature physique de la lumière est intimement liée au progrès de nos représentations de l'espace et du temps. L'étude de vitesse de la lumière a ouvert le chemin de la relativité restreinte et sa propagation révèle la géométrie de l'espace-temps, propriété centrale de la relativité générale dont nous célébrerons le centenaire en novembre 2015.

La vitesse de la lumière : la relativité de M. Jourdain

On enseigne que dans le vide la lumière se propage à une vitesse c de 299 792 458 m/s, considérée comme une constante fondamentale. Une telle affirmation devrait pourtant vous surprendre.

En effet, la physique classique, celle qui est enseignée au lycée, repose sur le principe de relativité galiléenne, c'est-à-dire sur le fait que pour deux observateurs mûs d'une vitesse relative rectiligne et uniforme, les lois de la mécanique prennent la même forme. Ainsi, le passage du référentiel absolu de l'espace de Newton à un référentiel en mouvement rectiligne uniforme, aussi appelé *référentiel inertiel* ou *galiléen*, laisse les lois de la nature invariantes. En réalisant que «*le mouvement est comme rien*», Galilée affirme que l'on ne peut pas mettre en évidence notre mouvement par rapport à l'espace absolu.

Assigner une valeur à la vitesse de la lumière semble alors en contradiction avec cette cinématique galiléenne, car pour un observateur en mouvement avec une vitesse V , la lumière devrait se propager à la vitesse $c+V$!

Attribuer une valeur numérique à la vitesse de la lumière et affirmer que c'est une constante de la nature, c'est donc déjà faire de la relativité restreinte. Pour le comprendre, revenons brièvement sur l'histoire de la vitesse de la lumière.

Petite histoire de la vitesse de la lumière

On a longtemps admis que la lumière se propageait instantanément et Galilée fut le premier à douter de cette croyance. Ses expériences restaient cependant compatibles avec une propagation instantanée.

Ce n'est qu'en 1676 qu'Olaus Rømer prouva que ce n'était pas le cas. Il remarqua que les éclipses du satellite de Jupiter Io survenaient avec un décalage par rapport aux éphémérides de Jean-Dominique Cassini : elles étaient en retard quand la distance Terre-Jupiter augmentait, et en avance quand elle diminuait. Il réalisa que ces décalages s'expliquaient si l'on admettait que la lumière mettait un certain temps pour nous parvenir (voir figure 1). On pouvait enfin parler de la vitesse de la lumière ! En 1728, James Bradley, en interprétant l'aberration stellaire de l'étoile γ du Dragon, estima sa valeur à environ dix mille fois la vitesse orbitale de la Terre, encore très mal connue.

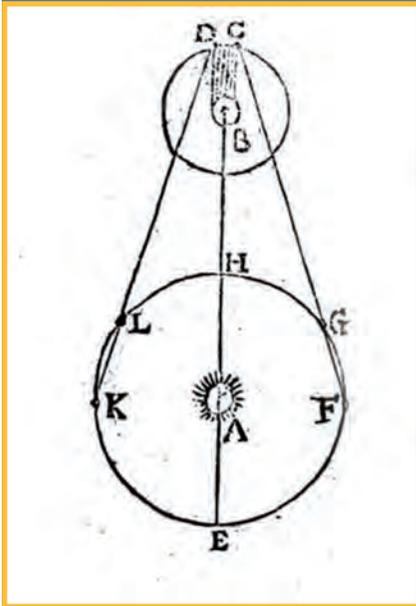


Figure 1: Le Soleil est en A, Jupiter en B, et Io en C ou D suivant qu'il entre ou sort de l'ombre de Jupiter. E, F, G, H, K représentent différentes positions de la Terre.

Supposons que l'on observe Io en D alors que la Terre se trouve en L. Pendant que Io effectue une révolution complète autour de Jupiter pour revenir en D, la Terre se déplace de L en K. La lumière provenant de Io et de Jupiter doit ainsi parcourir une distance supplémentaire. Si la lumière se déplace à une vitesse finie, elle prend donc plus de temps pour parvenir à la Terre. On observe donc Io sortir de l'ombre de Jupiter avec un retard correspondant au temps que la lumière met pour parcourir la distance entre L et K.

La durée séparant deux émergences de Io est d'environ 42,5 heures. La vitesse de la

lumière étant très grande, il était impossible de détecter cet effet d'une émergence à la suivante. Mais l'effet se cumule sur toute la période pendant laquelle la Terre se rapproche (ou s'éloigne) de Jupiter. Sur une période de deux mois, le retard doit atteindre dix minutes, ce qui fut confirmé le 9 novembre 1676 par Jean Picard. Ainsi, on pouvait estimer à vingt-deux minutes le temps pour que la lumière traverse l'orbite terrestre.

Rømer, Journal des Sçavans, tome XX, pp. 133-134, 1676.

Mesurer la vitesse de la lumière, c'était donc mesurer la vitesse orbitale de la Terre et ainsi déterminer la taille du système solaire avec précision. Les travaux d'Hippolyte Fizeau en 1849 puis de Léon Foucault en 1862 montrèrent que cette vitesse c vaut environ 300 000 km/s. Mais pouvait-on parler de c comme d'une constante alors que d'après la théorie optique de Newton elle devait se comporter comme la vitesse balistique de tout autre corps, et en particulier dépendre des vitesses de la source et du récepteur ?

Au début du XIX^e siècle, les études de la lumière sont intenses. Sur le plan théorique James Clerk Maxwell, fort de sa théorie de l'électromagnétisme publiée en 1873, démontre l'existence d'ondes d'une nature nouvelle. Ces ondes électromagnétiques représentent la propagation d'une perturbation des champs électrique et magnétique, dont la vitesse peut être calculée en fonction de deux constantes fondamentales, la permittivité et la perméabilité du vide. Gustav Kirchhoff note alors la coïncidence entre cette vitesse et la vitesse de la lumière. Maxwell franchit le pas pour affirmer que la lumière est une onde électromagnétique. Le statut de la vitesse de la lumière change radicalement : elle est la vitesse de propagation de toute onde électromagnétique dans le vide.

Mais, comme nous l'avons souligné, l'invariance galiléenne nécessitait de singulariser un référentiel privilégié et matérialisé, pensait-on, par un éther afin de pouvoir parler d'une vitesse de la lumière. Cependant, on démontra expérimentalement, en particulier grâce aux travaux d'Albert Michelson, que la vitesse de la lumière est la même dans tous les référentiels galiléens. Comment réconcilier lumière et cinématique ?

La vitesse de la lumière au cœur de la relativité restreinte

Cette contradiction sera levée en 1905 par Albert Einstein dans sa théorie de la relativité restreinte. Einstein y réaffirme le principe de relativité et postule la constance de la vitesse de la lumière dans tout référentiel galiléen.

Ce second postulat semble incompatible avec la loi de composition classique des vitesses. La loi de composition, notons-la \oplus , ne peut donc plus être donnée par une simple addition vectorielle comme en physique galiléenne car elle doit avoir un *élément absorbant*, c'est-à-dire tel que $v \oplus c = c$ pour toute vitesse v .

On peut montrer que la loi $u \oplus v = \frac{u+v}{1 + \frac{uv}{c^2}}$ satisfait à ce critère.

Elle possède un élément neutre, $v \oplus 0 = v$, un élément absorbant c , est associative $(u \oplus (v \oplus w)) = (u \oplus v) \oplus w$, et se réduit à la loi galiléenne à petites vitesses, $u \oplus v \simeq u + v$ si $uv \ll c^2$.

L'invariance de la vitesse de la lumière impose donc une nouvelle cinématique et l'utilisation de nouvelles transformations de coordonnées, dites de *Lorentz*, pour passer d'un référentiel inertiel à un autre. Einstein comprend que ces lois de transformation impliquent un abandon des notions newtoniennes d'espace et de temps absolus. Les lois de l'électromagnétisme de Maxwell sont invariantes sous ces transformations de Lorentz. Elles portaient ainsi en germe la relativité restreinte. C'est la contradiction théorique interne entre cette invariance et celle des lois newtoniennes extrapolées pour les grandes vitesses qui a révélé la nécessité de la cinématique relativiste. Et c'est en sacrifiant les transformations de Galilée qu'Einstein a pu étendre le principe de relativité de Galilée.

Le fait que la lumière ait la même vitesse dans tout référentiel inertiel implique que deux événements qui paraissent simultanés à un observateur sont différés dans le temps pour un autre observateur. La simultanéité est à Einstein ce que l'immobilité était à Galilée : relative à l'observateur. Dans cette vision, distances et durées ne sont plus identiques pour tous les observateurs et il faut revoir la formalisation de l'espace et du temps. Hermann Minkowski proposa en 1908 de les fusionner en une nouvelle entité physique, l'espace-temps à quatre dimensions, ensemble de tous les événements. Dans cette description, deux observateurs inertiels ont un espace et un temps différents mais partagent le même espace-temps. *L'espace-temps de Minkowski* devient le cadre absolu dans lequel se déroulent les événements physiques. La vitesse de la lumière acquiert alors une place essentielle en physique puisque c'est la seule dont la valeur est identique dans tous les référentiels inertiels. Elle joue ainsi le rôle d'une vitesse limite qui fonde la notion de causalité, justifiant son rôle de constante fondamentale.

Ceci explique en partie que le Bureau international des poids et mesures (BIPM) décide en 1983 de fixer par décret la valeur de c et de déduire la définition du mètre de celle de la seconde.

Lumière et géométrie

La théorie de l'électromagnétisme de Maxwell implique que la lumière se propage en ligne droite dans le vide.

Cette propriété, utilisée en optique depuis l'antiquité, reste vraie en relativité restreinte. Elle a d'ailleurs fortement influencé la définition de la notion mathématique de ligne droite. Dans *La Science et l'Hypothèse* (1902) Henri Poincaré affirme que «*ce que l'on appelle ligne droite en astronomie, c'est simplement la trajectoire de la lumière*», rappelant le lien millénaire entre lumière et géométrie. La géométrie euclidienne, celle que nous apprenons à l'école, est liée à notre perception et à la structure de notre regard. Elle s'est développée à partir de pratiques *vulgaires*, en particulier dans l'Égypte antique. Dans ses *Éléments*, Euclide définit la ligne droite comme «*celle qui est placée de manière égale par rapport aux points qui sont sur elle*», définition dans laquelle toute référence à l'optique a volontairement été éliminée, mais qui doit être comparée à celle de Platon, «*est droit, ce dont le centre fait écran aux deux extrémités*», qui renvoie explicitement à l'optique.

Pendant des siècles, la géométrie euclidienne était la seule géométrie connue et on considérait à juste titre qu'elle était LA géométrie de l'Univers. La physique se construisit entièrement sur cette hypothèse. On était convaincu que la géométrie euclidienne était l'idéalisation correcte des propriétés de notre espace. En novembre 1915, Einstein publie sa théorie de la relativité générale dans laquelle il propose que la gravitation *est* la manifestation de la géométrie de l'espace-temps. Cette géométrie est à déterminer expérimentalement !

Mais quelle est alors la trajectoire d'un rayon lumineux ? La théorie de l'électromagnétisme de Maxwell implique que la lumière emprunte le chemin le plus court entre deux événements. Le principe de Fermat énoncé au XVII^e siècle se généralisait. Dans une géométrie non-euclidienne, ce chemin ne correspond plus à une ligne droite mais à une courbe appelée *géodésique* qui dépend de la géométrie de l'espace-temps.

C'est une des prédictions et un des grands succès de la relativité générale. La matière courbe l'espace-temps et la propagation de la lumière permet d'en révéler la géométrie. Cela sera vérifié expérimentalement le 29 mai 1919 par les observations d'Arthur Eddington depuis l'île portugaise de Principe, au large des côtes d'Afrique occidentale (figure 2).

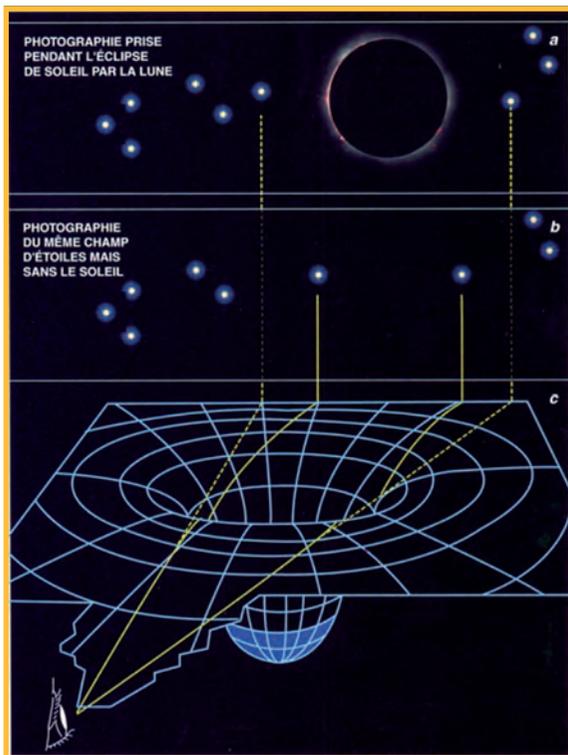


Figure 2 : Les rayons de lumière d'étoiles frôlant le Soleil sont observables au cours d'une éclipse.

La ligne en trait plein représente la trajectoire de la lumière, et la ligne en pointillée donne la position de l'image apparente. La séparation angulaire entre les deux étoiles est plus grande au cours de l'éclipse car la lumière est déviée de 1,7 seconde d'arc du seul fait de la courbure de l'espace-temps engendrée par la masse du Soleil. C'est ce qu'Eddington réussit à mesurer en 1919.

Illustration J. Eisenstaedt, D'Einstein aux trous noirs, le renouveau relativiste. Pour la Science Dossier hors-série (janvier-avril 2003), n°24.

La déflexion de la lumière est devenue l'un des outils les plus précis pour cartographier la géométrie de l'espace-temps et en déduire la distribution de la matière de l'univers, en particulier de celle que nous ne pouvons pas détecter par sa propre lumière : la matière noire, mais aussi pour tester la relativité générale aux échelles cosmologiques.

La distribution de matière dans l'univers donne lieu à de nombreux effets (figure 3) comme les arcs gravitationnels dont le premier fut détecté par Bernard Fort, Yannick Mellier et Geneviève Soucaïl, chercheurs au laboratoire d'astrophysique de Toulouse, en 1987. Les grandes structures de l'univers n'induisent que des distorsions faibles de la forme des galaxies d'arrière-plan. Détectées pour la première fois en 2000 par Yannick Mellier et son équipe, ces distorsions sont aujourd'hui une méthode observationnelle prometteuse, qui sera utilisée par le satellite de l'ESA (Agence Spatiale Européenne) Euclid, dont le lancement est prévu en 2020.

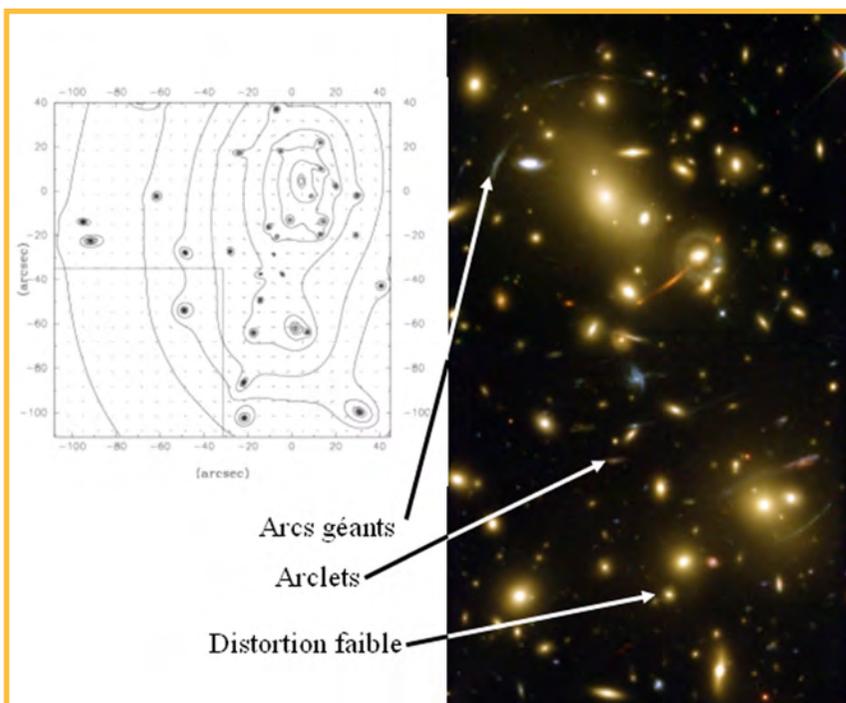


Figure 3

Effets de lentille gravitationnelle induits par un amas de galaxies. Suivant l'intensité du champ gravitationnel, la forme des galaxies d'arrière-plan peut être plus ou moins affectée, donnant ainsi naissance à des arcs géants ou à des distorsions faibles. Ces effets permettent de reconstruire la distribution de masse de l'amas de galaxies (carte de gauche).

Montage à partir de la photo d'Abell 2218 (NASA) de la reconstruction du potentiel gravitationnel par J.-P. Kneib et al., *Astrophys. J.* 471 (1996), 643.

J.-P. U.

Pour aller plus loin :

N. DERUELLE et J.-P. UZAN, *Théories de la relativité*, Belin (2014).

J. EISENSTAEDT, *La petite histoire de la ligne droite qui se mord la queue*, *Quadrature* 91 (2014).

B. LECLERCQ et J.-P. UZAN, *L'importance d'être une constante*, Dunod (2005).

J.-P. UZAN et R. LEHOUCQ, *Les constantes fondamentales*, Belin (2005).

Mission EUCLID : <http://sci.esa.int/euclid/>