

LUMIÈRE, RELATIVITÉ, GRAVITATION & PARTICULES

ALAIN BOUQUET

La lumière est au cœur de toutes les questions que les physiciens se posent. Lumière, relativité, gravitation et particules jouent un étonnant ballet au cœur de la physique et probablement aussi au cœur de l'Univers. C'est par la lumière en effet que nous accédons à l'Univers, c'est par elle aussi que nous connaissons les lois qui le régissent de l'infiniment grand à l'infiniment petit, et c'est par elle encore que nous les comprenons (ou du moins que nous le croyons les comprendre, restons modestes).

Il faut bien réaliser que la quasi totalité des informations que nous recevons de l'Univers qui nous entoure, sur les objets qui le composent comme sur les forces qui les relient, nous vient de la lumière. Ce n'est qu'à l'échelle humaine que nos autres sens nous apportent quelque chose: l'ouïe, le toucher, l'odorat ou le goût ne nous sont que de peu d'utilité pour connaître les étoiles, pas plus que pour connaître les atomes. On peut aller sur la Lune, envoyer des sondes sur Mars ou Vénus, on peut analyser la composition des météorites et des rayons cosmiques, mais seule la lumière nous arrive de très loin. Il est d'ailleurs pas impossible que cette source quasi unique d'information ne nous donne qu'une image très biaisée du monde qui nous entoure.

Fort heureusement la lumière véhicule une information extrêmement riche: une image vaut bien mieux qu'un long récit, affirmait Napoléon, et l'image d'objets très lointains comme une galaxie ou très petits comme un virus voire une molécule nous renseigne déjà beaucoup sur leur nature. Mais on peut aller beaucoup plus loin en analysant la lumière reçue: la longueur d'onde de la lumière, son intensité, sa polarisation sont autant de signatures de l'objet qui l'a émise ainsi que des divers milieux qu'elle a traversé avant de nous parvenir. C'est ainsi que, contrairement aux affirmations hasardeuses d'Auguste Comte au siècle dernier,

nous connaissons bien la nature chimique des étoiles et leurs mouvements grâce à la spectroscopie.

1. Ondes, particules, champs

La théorie actuelle de la lumière, après beaucoup de tâtonnements et d'impasses, résulte de la fusion de l'électrodynamique de Maxwell, pour qui la lumière n'est qu'une forme particulière d'onde électromagnétique, et de la mécanique quantique de Planck et Einstein, pour qui la lumière est une collection de petits grains, les quanta, porteurs d'une énergie bien déterminée. L'électrodynamique quantique se présente aujourd'hui comme la plus précise de toutes les théories physiques, et sert donc de modèle de référence aux autres théories qui calquent les recettes qui en ont fait le succès.

Quelles recettes? C'est d'abord une "théorie de champ": pour décrire l'interaction électromagnétique entre deux particules chargées, on considère que chacune des particules crée autour d'elle un "champ électromagnétique", une région de l'espace dont les propriétés sont modifiées, auquel l'autre particule réagit. Dans cette image, il n'y a pas d'action directe de particule à particule, mais seulement action indirecte par l'intermédiaire du champ. Quand le champ est modifié localement, cette modification se propage de proche en proche, c'est une onde. Et quand Maxwell calcula la vitesse à laquelle se déplace cette onde, il obtint la vitesse de la lumière et en déduisit que la lumière était une onde électromagnétique. Le remplacement d'une interaction instantanée à distance par une interaction locale se propageant de proche en proche l'amena alors en conflit avec la physique de Newton et en particulier la gravitation: l'électrodynamique était "relativiste" avant Einstein. Mais d'autre part, l'analyse du rayonnement d'un corps noir conduisit Planck à supposer que la lumière ne pouvait être émise que par paquets d'énergie bien définie, les quanta, et Einstein reprit l'idée pour expliquer l'effet photoélectrique. Ces quanta

de lumière ou photons se comportent comme des particules de matière telles que l'électron, et il devint pensable d'imaginer que l'électron soit lui aussi un quantum d'un champ, le champ "électronique". Simple artifice de calcul au début, la notion de champ devient donc prépondérante quand les particules elles-mêmes en viennent à être considérées comme des excitations d'un champ, des quanta du champ. Il n'y a plus de particules soumises à des forces, mais seulement des champs en interaction.

La seconde recette qui assure le succès de l'électrodynamique quantique, c'est que ce champ est un "champ de jauge". Ce jargon signifie seulement que l'objet mathématique qui décrit le champ électromagnétique, le "potentiel" du champ, n'est défini qu'à une constante arbitraire près dont le choix, ou choix de jauge, ne change rien aux équations de Maxwell. On s'est rendu compte plus tard que cette indifférence au choix de jauge traduisait une symétrie interne des particules sources, les électrons par exemple, appelée alors symétrie de jauge. Il apparaît que l'existence de cette symétrie des électrons (et des autres particules de matière) est en quelque sorte responsable de l'existence même du champ électromagnétique et des interactions entre particules. Par ailleurs, elle assure la cohérence mathématique de la théorie: sans elle, nombre de calculs donneraient des résultats aberrants, par exemple des masses ou des charges infinies aux particules soumises à cette interaction. Les interactions nucléaires sont restées incompréhensibles jusqu'à ce que l'on parvienne à les reformuler dans le cadre des théories de jauge. Bonus de l'opération: si toutes les interactions sont la conséquence de symétries internes des particules (ou des champs) de matière, il est possible que ces symétries ne soient que des aspects particuliers d'une symétrie plus grande, plus générale, et que les différentes interactions ne soient que des aspects particuliers d'une interaction unifiée. Cette approche a connu un considérable succès depuis une vingtaine d'années, et c'est ainsi que la théorie de

la lumière est le modèle sur lequel ont été bâties toutes les théories modernes des particules et des forces.

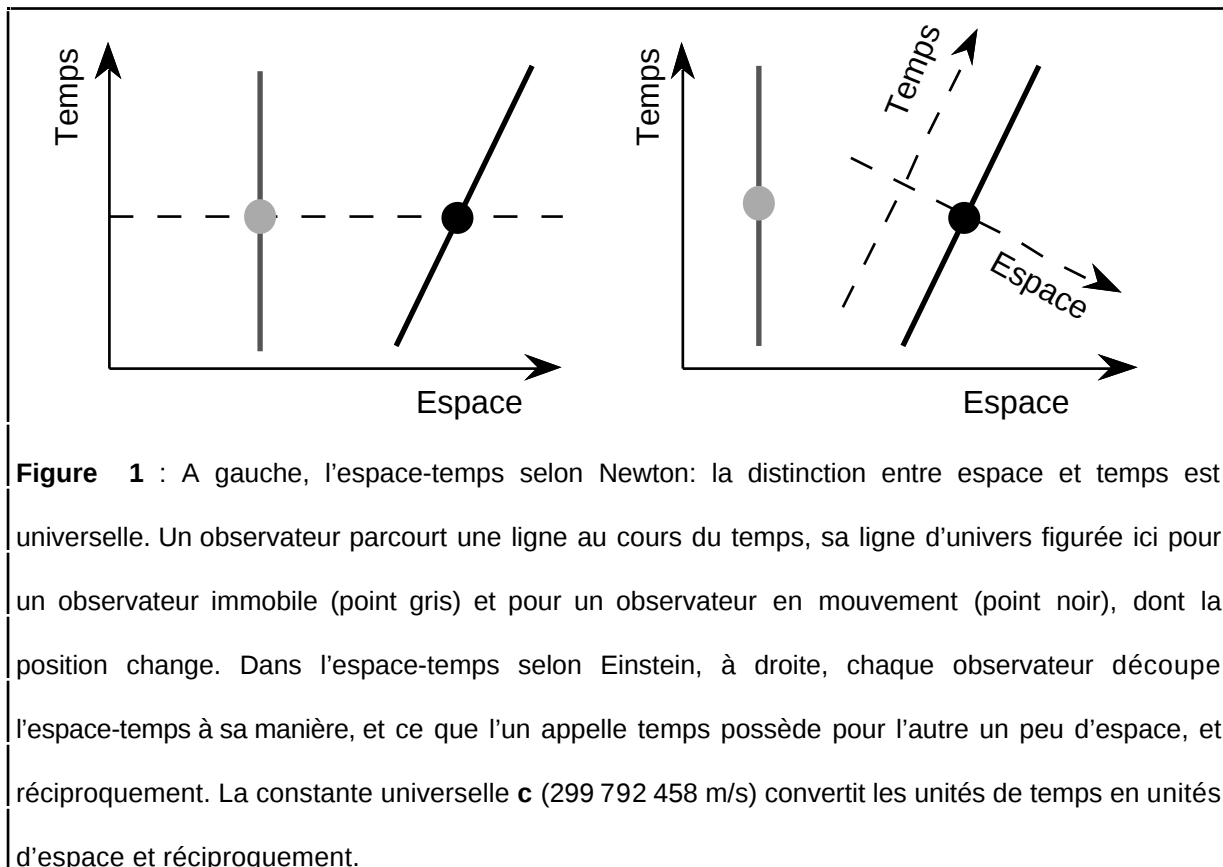
2. La lumière de la relativité restreinte

Revenons à Einstein. La relativité restreinte est fille de la lumière: la théorie de Maxwell prévoyait que la lumière se déplaçait à la vitesse... de la lumière (qu'on note traditionnellement c). La Palisse n'aurait pas mieux dit, mais c'était quand même bouleversant car la lumière se déplace effectivement *toujours* à cette vitesse c , quelque soit le repère par rapport auquel on la mesure. Elle est invariable, indépendante de la vitesse de la source, du récepteur ou du milieu traversé.

La célèbre expérience de Michelson montrait en effet que la vitesse de la lumière était la même dans la direction du mouvement de la Terre et dans la direction opposée, et que la vitesse de la Terre n'y ajoutait ni n'en retranchait rien. Ce fut le point de départ des réflexions d'Einstein sur les notions de mouvement et de simultanéité qui aboutirent en 1905 à la théorie de la relativité restreinte. Dans les descriptions imagées que les manuels donnent de cette théorie, une grande place est d'ailleurs toujours accordée à des expériences de pensée parfois bizarres dans lesquelles des rayons lumineux et des miroirs jouent le rôle de mètres étalons et de chronomètres.

Ce n'est pas par hasard. En effet, il nous apparaît aujourd'hui que cette constante fondamentale c est une pierre angulaire de notre conception du monde. Elle représente en fait bien plus que la vitesse de la lumière, ou plutôt elle n'est la vitesse de la lumière que par accident, en plus. Cette constante symbolise d'abord et avant tout le lien indissoluble qui unit l'espace et le temps, elle est là pour affirmer qu'espace et temps ne sont que deux aspects superficiellement différents du même objet physique, l'espace-temps (Figure 1). Elle n'est pas autre chose

qu'un taux de change, un facteur de conversion analogue à ceux qui permettent de passer des mètres aux pieds ou des secondes aux heures. La constante c transforme des secondes en mètres, à tel point qu'elle sert aujourd'hui à *définir* le mètre comme unité de longueur à partir de la seconde (c'est la distance parcourue par la lumière en $1/299792458$ seconde).



Mais quel rapport y a-t-il alors entre cette constante fondamentale c qui fixe la structure de l'espace-temps, le cadre de tous les phénomènes physiques, et la vitesse de la lumière, qui n'est qu'un phénomène physique parmi beaucoup d'autres. Quel rôle joue donc la lumière? En fait aucun, sinon historique. C'est grâce à la lumière que l'expérience de Michelson a pu être possible et que l'on a pu découvrir l'identité profonde de nature entre espace et temps, mais rien n'obligeait la lumière à jouer ce rôle. On peut parfaitement concevoir un monde où la lumière n'aurait pas cette vitesse c , où elle se déplacerait beaucoup plus

lentement, quelques milliers de kilomètres par seconde disons (dans ce cas d'ailleurs, sa vitesse dépendrait de celle de sa source et de son récepteur). Cela ne changerait rien à la structure de l'espace-temps, il y aurait toujours un facteur c convertissant secondes en mètres, mais il n'aurait alors aucun lien avec la lumière.

C'est en fait un accident de la nature qui fait que la lumière a la vitesse c . La relativité restreinte implique que tout objet massif, une particule élémentaire tel un électron de masse 10^{-30} kg aussi bien qu'une galaxie de masse 10^{40} kg, se déplace nécessairement à une vitesse strictement inférieure à c (la constante de structure) tandis que tout objet de masse nulle se déplace nécessairement à une vitesse égale à c . Or les particules de lumière, les photons, ont une masse nulle. Ergo, ils se déplacent à la vitesse c : la vitesse de la lumière est égale à la vitesse de la lumière. Mais cela est vrai de tout objet de masse nulle: un neutrino de masse nulle se déplace aussi à la vitesse c mais il n'a rien à voir avec la lumière.

Pourquoi le photon a-t-il une masse nulle? On n'est d'ailleurs pas certain que sa masse soit exactement nulle, l'expérience indique seulement qu'elle est inférieure à 5×10^{-63} kg (ce qui est quand même inférieur de 33 ordres de grandeurs à la masse de l'électron). La théorie des champs de jauge apporte un début de réponse: une symétrie de jauge parfaite implique que les quanta du champ associé à cette symétrie, par exemple le champ électromagnétique, ont une masse nulle. Cela ne fait que déplacer la question: pourquoi la symétrie de l'électromagnétisme est-elle parfaite? La question est légitime dans la mesure où l'on connaît des symétries de jauge imparfaites, brisées, telle celle qui est associée à la force nucléaire faible où les quanta du champ sont les bosons W et Z qui sont très lourds. Il n'y a pas encore vraiment de réponse, mais quoiqu'il en soit c'est grâce à cet accident, une symétrie de jauge parfaite, que le photon a une masse nulle et que la vitesse de la lumière est égale à c .

3. Relativité générale



Albert Einstein
(vu par David Levine)

La lumière joue un rôle moins central dans la relativité générale que dans la relativité restreinte, bien qu'elle permette d'en illustrer nombre de concepts fondamentaux. La relativité générale reprend la notion d'espace-temps de la relativité restreinte et la constante de structure c y apparaît donc automatiquement. La principale différence est que cet espace-temps n'est plus une structure rigide, mais qu'il peut avoir une structure déformée, courbée par la présence de matière ou plus généralement d'énergie. La

courbure de la géométrie peut être positive, négative ou nulle et cette courbure indique comment deux trajectoires s'écartent ou se rapprochent, telles les fourmis de la Figure 2, et inversement la courbure de ces trajectoires permet de déduire la courbure de la géométrie:

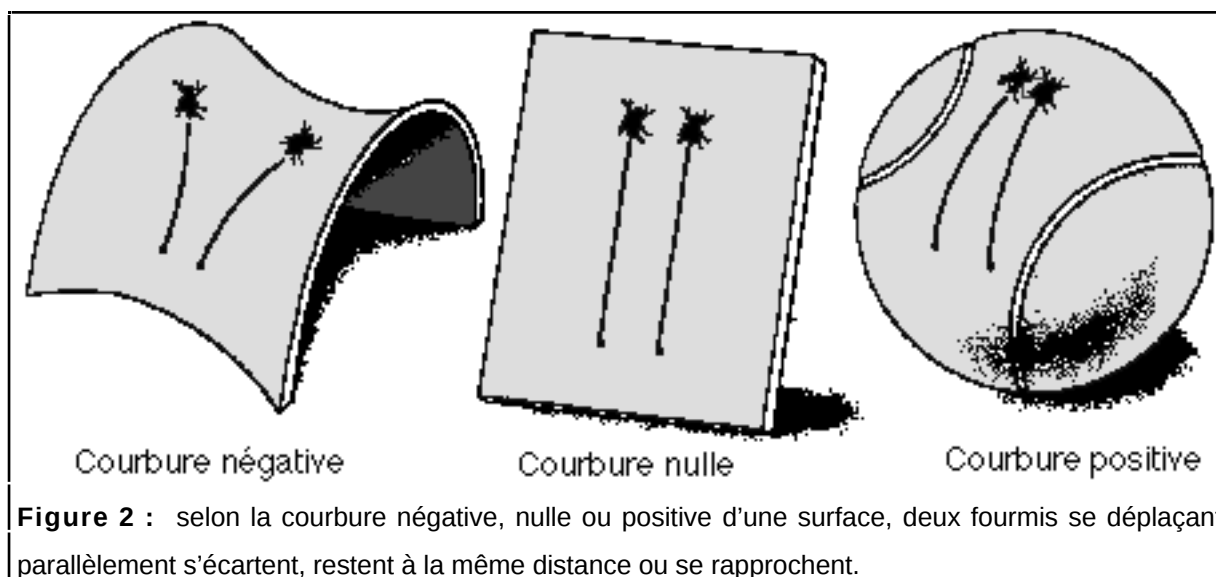


Figure 2 : selon la courbure négative, nulle ou positive d'une surface, deux fourmis se déplaçant parallèlement s'écartent, restent à la même distance ou se rapprochent.

La lumière permet donc de sonder la géométrie de l'espace-temps: les trajectoires des rayons lumineux dessinent littéralement la carte de l'espace-temps. Mais ils ne sont pas seuls à avoir ce privilège, n'importe quel objet suivra exactement les

mêmes trajectoires dans l'espace-temps. La lumière n'a que l'avantage d'aller très vite, et aussi d'être facilement émise et détectée, ce qui en fait une sonde particulièrement pratique. Si elle n'est pas cruciale dans l'architecture de la théorie de la relativité générale, elle est néanmoins un outil remarquable pour la mettre à l'épreuve. Tous les tests de la relativité générale ne reposent pas sur elle, le décalage du périhélie de Mercure par exemple n'y fait pas appel (sauf évidemment pour observer les positions de la planète!).

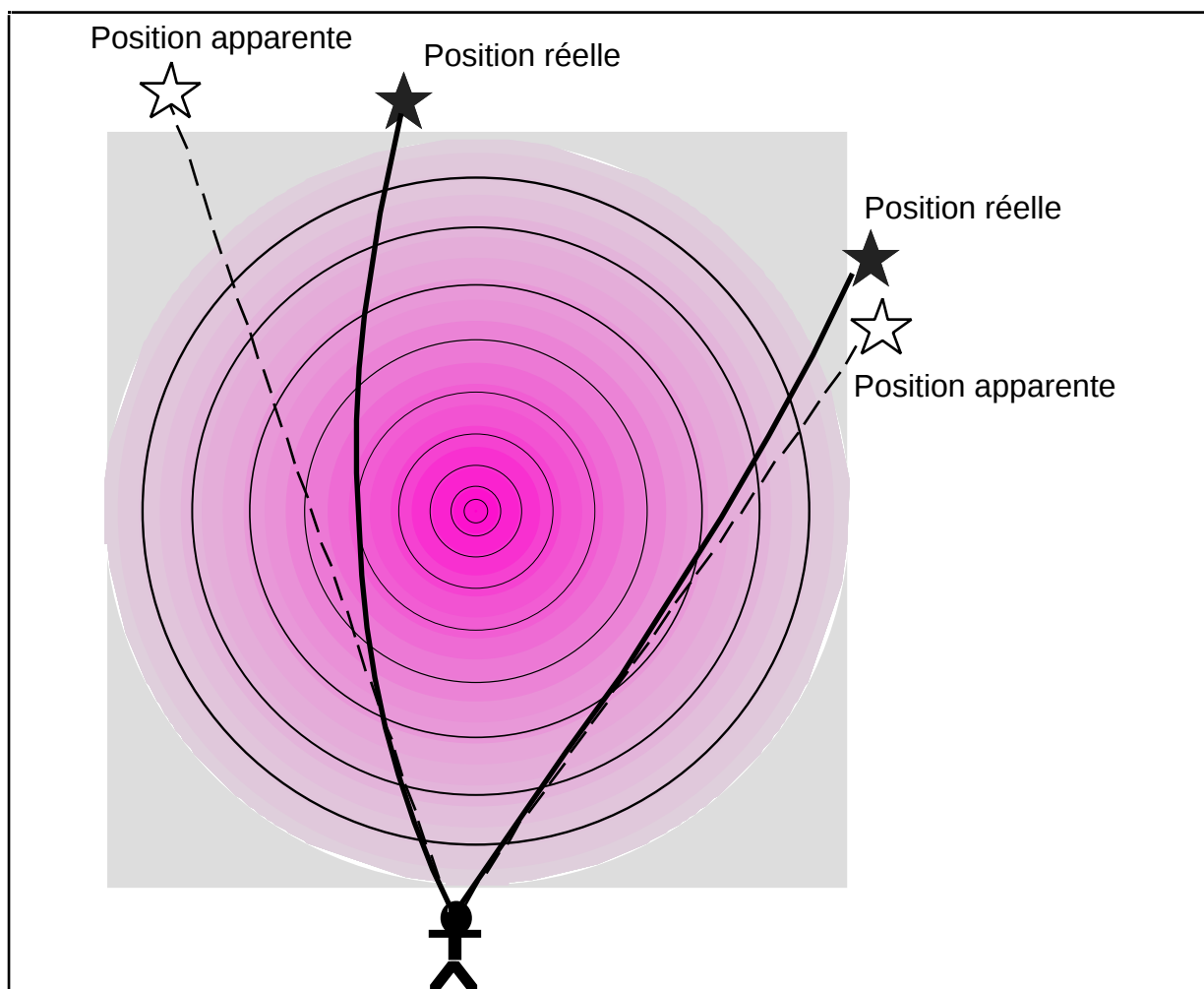


Figure 3 : La présence d'une masse déforme la géométrie à son voisinage, et les rayons lumineux répondent à cette déformation en se courbant d'autant plus qu'ils passent à proximité de cette masse. Par conséquent la position apparente des étoiles est modifiée quand le Soleil s'approche de la ligne de visée, et les étoiles semblent s'écarter légèrement de leur position normale en l'absence du Soleil.

Mais le premier succès historique de la relativité générale, l'observation par Arthur Eddington en 1919 du déplacement des positions apparentes des étoiles proches du Soleil, repose sur la courbure des rayons lumineux dans la géométrie non euclidienne de l'espace-temps au voisinage de la masse du Soleil. La Figure 3 montre ce déplacement apparent, d'autant plus grand que la ligne de visée passe près du Soleil. Il a été grandement exagéré sur le dessin, car en réalité il n'est que de 1,75" (un deux millièmes de degré) et donc très difficile à mesurer. L'expérience d'Eddington est aujourd'hui répétée en utilisant des radiosources au lieu des étoiles car la précision angulaire des radiotélescopes est très supérieure à celle des télescopes optiques (de l'ordre du millième de seconde d'arc), et en plus ils ne sont pas éblouis par le Soleil et il n'est donc pas nécessaire d'attendre une éclipse de Soleil pour effectuer la mesure.

Cette déviation des rayons lumineux a d'autres conséquences: une source située derrière un objet massif peut ainsi voir ses rayons passer de part et d'autre de cet objet, et un observateur peut ainsi voir plusieurs images de la source. Cet effet de mirage gravitationnel, prévu par Einstein dès 1936, n'a été observé de façon certaine que dans les années 80. Nous connaissons aujourd'hui plusieurs cas de quasars dédoublés par une galaxie qui s'interpose sur la ligne de visée, ou de galaxies lointaines déformées en forme d'arc par un amas de galaxies plus proche. Ces arcs lumineux ont d'ailleurs un immense intérêt pour les astrophysiciens, car la déformation de la galaxie-source permet de calculer la distribution de matière dans l'amas de galaxies qui en est responsable: on se rend ainsi compte qu'il y a dix fois plus de matière présente au total dans cet amas qu'on en trouve dans les galaxies elles-mêmes. Autrement dit, il y a beaucoup de matière non lumineuse (matière noire) entre les galaxies, et cette matière noire intéresse au plus haut point physiciens, astrophysiciens et cosmologistes. Prédissant dix fois plus de matière qu'il en est observé, la relativité générale pourrait être remise en cause, mais ce

résultat est corroboré par des analyses indépendantes (sur l'émission en rayons X de ces amas ou sur les vitesses des galaxies de l'amas).

Revenons à la déformation de l'espace-temps au voisinage d'une masse importante comme le Soleil.

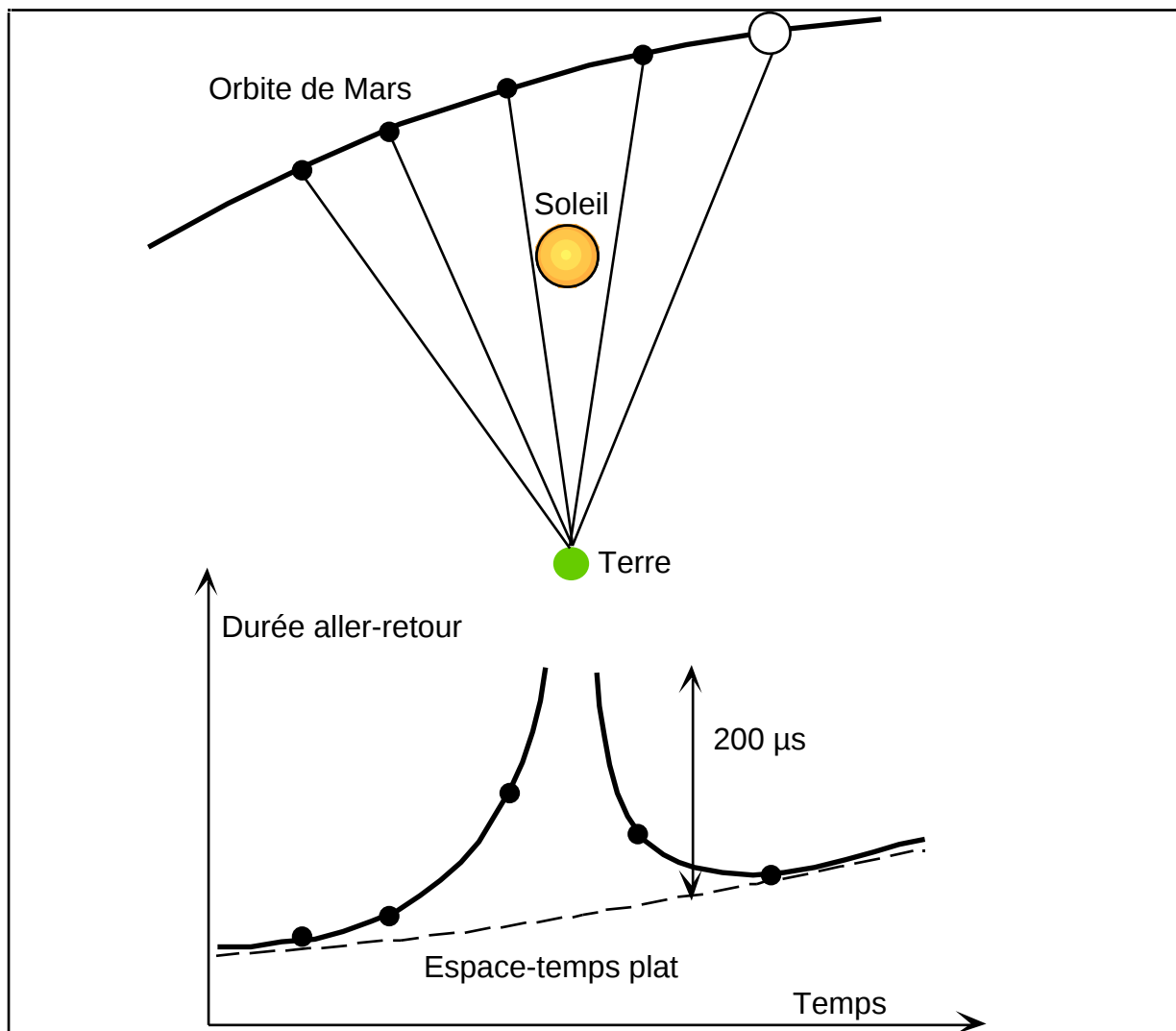


Figure 4 : La durée nécessaire à un signal radar pour faire l'aller-retour Terre-Mars augmente brutalement juste avant que Mars passe derrière le Soleil et diminue tout aussi brutalement quand la planète réapparaît (les points noirs correspondent aux résultats de mesure, la courbe continue à la prédiction de la relativité générale, et la courbe en pointillé au résultat attendu pour une géométrie euclidienne). Cela traduit la courbure prononcée de l'espace-temps au voisinage du Soleil.

Cette déformation modifie aussi le temps de trajet des rayons lumineux, et on s'en rend très bien compte quand on mesure par exemple la distance Terre-Mars par

écho radar. La durée mise par le signal pour faire l'aller-retour, de l'ordre de 20 minutes, augmente brutalement de quelques centaines de microsecondes quand Mars passe derrière le Soleil, juste avant de disparaître, et diminue à nouveau rapidement quand la planète réapparaît avant de retrouver des valeurs proches de ce que prévoirait un espace euclidien. Cet effet, identifié par Shapiro, correspond exactement aux prédictions de la relativité générale.

Une autre prédiction de la relativité générale, le ralentissement des horloges dans un champ de gravitation intense, est parfaitement mesurable en comparant les fréquences caractéristiques de la lumière émise par certains atomes en deux endroits où le champ est différent (expérience de Pound et Rebka). La lumière sert aussi à explorer une autre prédiction de la relativité générale, l'existence de trous noirs, régions de l'espace où la gravitation est si forte que la géométrie se referme et qu'aucune trajectoire n'en peut sortir, pas même celle des rayons lumineux. Aucune lumière n'en sort, mais la gravitation est si forte autour d'eux, à l'extérieur, que la matière y est déchiquetée, comprimée et chauffée à si haute température qu'elle émet de la lumière de haute fréquence, des rayons X. La présence de trous noirs est l'explication la plus simple que l'on ait trouvé pour certaines des sources intenses de rayons X dans l'Univers.

Enfin la lumière servira bientôt à examiner une autre prédiction, celle des ondes gravitationnelles. Einstein avait montré dès 1916 que la relativité générale possédait des solutions analogues aux ondes électromagnétiques, à la différence de la théorie de Newton où la gravitation ne se propage pas mais s'exerce instantanément à travers l'espace. Mais ces ondes sont très difficiles à émettre, elles ont une très faible intensité même quand elles sont émises par des événements aussi violents qu'une explosion de supernova, et elles sont de ce fait aussi très difficiles à détecter. La meilleure indication de leur existence vient du comportement du pulsar binaire découvert en 1976 par Hulse et Taylor et qui vient

de leur valoir le prix Nobel de physique. Ce pulsar émet des impulsions à un rythme extrêmement régulier, mais modulé parce qu'il est en orbite autour d'un compagnon et que ce rythme varie périodiquement selon qu'il s'éloigne ou se rapproche. Cette modulation permet de calculer la période orbitale avec une précision remarquable, et de constater que cette période diminue régulièrement de 75 microsecondes par an. Cette perte d'énergie orbitale correspond exactement à ce que prévoit la relativité générale pour l'émission d'ondes gravitationnelles par deux masses en rotation l'une autour de l'autre.

Préférez-vous une évidence plus directe, une détection sur Terre d'ondes gravitationnelles? Les projets franco-italien VIRGO et américain LIGO ont ce but: le passage d'une onde gravitationnelle se traduit par une variation de la distance entre deux points, la gravitation n'étant rien d'autre qu'une déformation de l'espace-temps. Mais la faible intensité de ces ondes se traduit par de faibles variations de distance, de l'ordre du milliardième de milliardième dans le meilleur des cas, ce qui correspond à mesurer la distance de la Terre à la Lune à l'épaisseur non d'un cheveu mais d'un atome près. Pour atteindre ces précisions, il n'y a que l'interférométrie: séparer un faisceau lumineux (un laser en l'occurrence) en deux faisceaux orthogonaux, leur faire parcourir une grande distance avant de les ramener au même point et de les faire interférer. Une modification de la distance parcourue par l'un ou l'autre des faisceaux d'une fraction de la longueur d'onde de la lumière décale de façon mesurable les franges d'interférence.

Ce survol du rôle de la lumière dans les interrogations des physiciens contemporains, si bref et si superficiel qu'il soit, nous montre que la lumière nous sert à la fois de modèle théorique, archétype de la théorie parfaite, et d'outil, instrument ou détecteur de phénomènes nouveaux.