

JEAN-PHILIPPE UZAN

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE DE PARIS, UMR 7095 DU CNRS

Tout mouvement est relatif et sa description nécessite de définir un cadre de référence. Alors comment savoir si notre univers se déforme, comme la relativité générale et la cosmologie l'affirment ? Comment mettre en évidence la dilatation cosmique et les frissons des ondes gravitationnelles qui le parcourent ?

LE MOUVEMENT, RÉVÉLATEUR DE L'ESPACE ET DU TEMPS

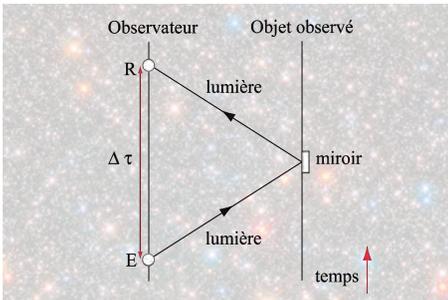
La description du mouvement et de ses causes a nécessité d'identifier les concepts de trajectoire, de vitesse et d'accélération, et de les mathématiser. La cinématique (description du mouvement) et la *dynamique* (étude de ses causes) sont les chapitres introductifs de la mécanique qui nous mènent de la relativité galiléenne à la relativité d'Einstein (voir le précédent article).

Dans un référentiel galiléen (ou *référentiel inertiel*), tout corps sur lequel n'agit aucune force est animé d'un mouvement rectiligne à vitesse constante. Les autres référentiels, accélérés ou en rotation, se distinguent par l'apparition de forces d'inertie, comme les forces centrifuge ou de Coriolis. On construit alors un référentiel galiléen par approximations successives : le laboratoire, le référentiel terrestre, le référentiel du système solaire... Cette étape visant à choisir un système de référence et justifier sa nature galiléenne est l'un des cauchemars de tout étudiant en physique. C'est ensuite Einstein qui comprend que l'invariance de la vitesse de la lumière implique l'abandon des notions newtoniennes d'espace et de temps absolus, à remplacer par un espace-temps à quatre dimensions. Ce dernier est pour autant tout aussi inaccessible que l'espace de Newton. Les référentiels inertiels restent au cœur de la cinématique, mais sont toujours des fantômes...

DES LOIS DE LA NATURE INDÉPENDANTES DU RÉFÉRENTIEL

En novembre 1915, après huit années de travail solitaire, Einstein expose sa théorie de la relativité générale. Elle trouve l'origine de la gravitation dans la géométrie de l'espace-temps. Le principe de relativité y est renforcé car les lois de la nature prennent alors la même forme dans tous les référentiels : ils sont tous «aussi bons les uns que les autres», ce qui permet de résoudre la question embarrassante des référentiels galiléens. En conséquence, les forces d'inerties, souvent appelées fictives, qui apparaissaient dans les référentiels non galiléens disparaissent de la description. Cela change radicalement la façon de penser le mouvement !

Déjà, le principe d'inertie est modifié : on ne peut pas s'abstraire à la gravitation. L'état de mouvement naturel est celui de la chute libre. Ensuite, les règles ne sont plus rigides car déformées par la géométrie de l'univers, qui n'a aucune raison de correspondre avec la géométrie euclidienne. Quant aux montres et horloges, les durées qu'elles mesurent dépendent de leur état de mouvement et du champ de gravitation dans lequel elles se trouvent. La seule chose à laquelle un observateur peut accéder est le temps mesuré à sa montre, ce que l'on appelle le *temps propre*.



La vitesse de la lumière étant finie, un observateur n'a accès qu'à des événements passés. On peut par exemple définir la distance d'un objet à partir du temps aller-retour mis par la lumière, $d = \Delta\tau / 2c$.

Il ne peut d'autre part mesurer que le temps écoulé entre deux événements, et non la distance d'un objet avec une règle, qu'il ne peut pas prouver être rigide.

© H. Lehning

L'UNIVERS QUI VOULAIT SE FAIRE PLUS GROS QUE L'UNIVERS

La théorie de la relativité offrait un cadre pour penser l'espace et le temps. Toute solution de cette théorie est un espace-temps avec sa géométrie. Dès 1917, Einstein tente de trouver «la» solution qui décrirait notre univers. Il en exhibe une dans laquelle l'espace est statique et immuable, un peu comme chez Newton, mais ayant la géométrie d'une sphère à trois dimensions...

Dans les années 1920, Alexandre Friedmann et Georges Lemaître démontrent indépendamment que, sous les mêmes hypothèses qu'Einstein, l'espace est génériquement en expansion et non statique. La relativité fournissait une prédiction inattendue sur la nature de l'espace aux échelles cosmiques. Comment la vérifier ?

Les éléments de réponse sont fournis par Lemaître en 1927. D'une part, la longueur d'onde de toute lumière se dilate de façon identique à l'univers. Ainsi, une galaxie rayonnant à une longueur d'onde de 350 nm (violet/ultra-violet) est observée à 700 nm (rouge/infrarouge) si l'univers s'est dilaté d'un facteur 2 entre l'instant de l'émission de la lumière et sa réception aujourd'hui. Ce décalage spectral vers le rouge est observable. D'autre part, si l'univers se dilate, les galaxies doivent s'éloigner les unes des autres, et ceci d'autant plus vite que les galaxies sont distantes. Lemaître proposait ainsi une méthode pour tester la dilatation de l'univers, en mesurant simultanément la distance et le décalage vers le rouge de galaxies lointaines. Cette loi reliant vitesses et distances des galaxies fut établie observationnellement par Edwin Hubble en 1929. L'univers se dilate donc ! Le taux d'expansion, qui change au cours du temps, est aujourd'hui tel qu'une galaxie située à 3,26 millions d'années-lumière s'éloigne de nous à une vitesse de 70 km/s.

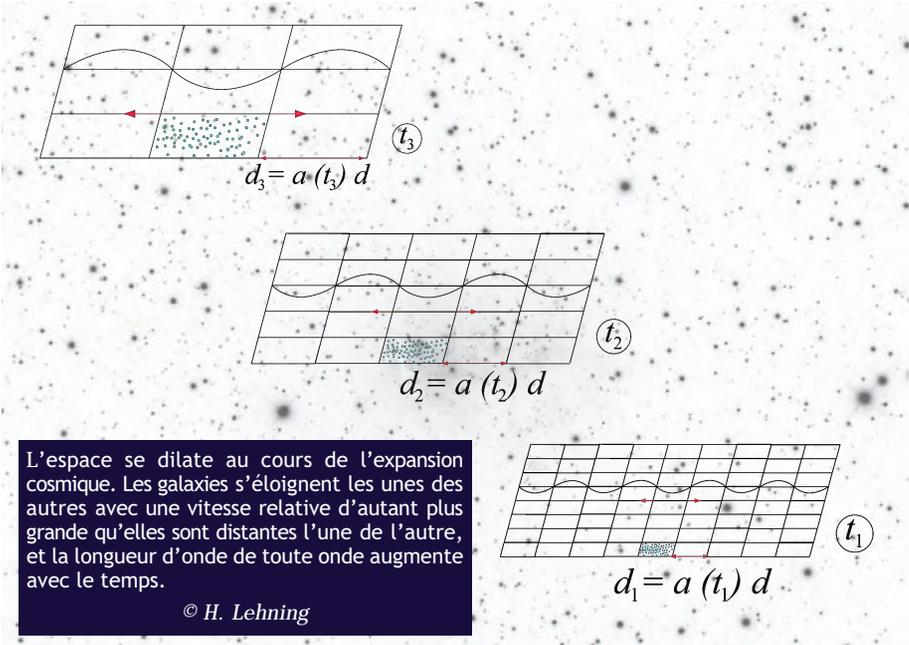
La mise en évidence de cette déformation de l'espace au cours du temps nécessite de faire des observations non locales et de les relier en comprenant la façon dont la lumière se propage et dont ses propriétés sont affectées par l'expansion cosmique.

DES VAGUES DE GÉOMÉTRIE

Autre prédiction de la relativité : il doit exister des ondes de géométrie qui se propagent à la vitesse de la lumière. Elles déforment les objets en modifiant la géométrie au cours de leur propagation.

Évaluons l'amplitude de cette déformation de l'espace-temps. Plus un corps est massif, plus il le courbe. Cette courbure modifie les mouvements de tous les autres corps. C'est la gravitation. Cependant, l'espace-temps est très rigide. Notre soleil ne le courbe que de quelques dix-millièmes de pourcent

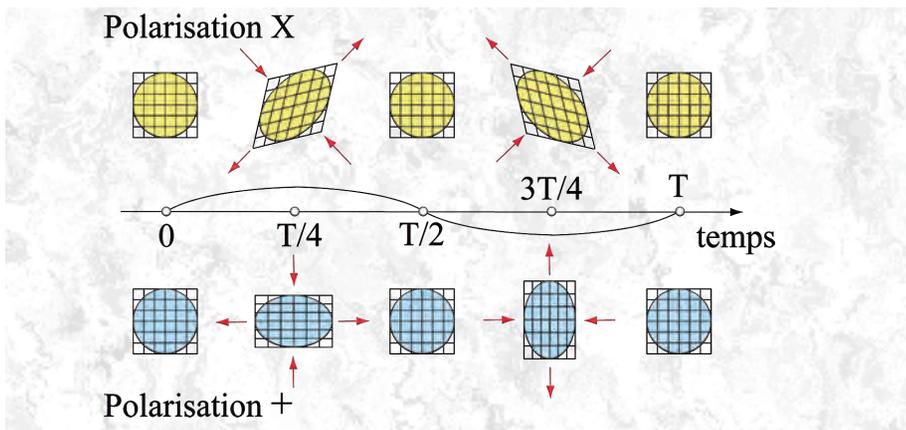
à sa surface ! Seuls des astres très massifs et des phénomènes astrophysiques violents peuvent émettre des ondes gravitationnelles détectables.



De telles ondes ont justement été détectées pour la première fois le 14 septembre 2015. Aujourd'hui, cinq évènements ont été observés, ce qui marque le début d'une nouvelle ère de l'astronomie. La détection de 2015 correspond au rayonnement gravitationnel d'un système constitué de deux trous noirs de vingt-neuf et trente-six masses solaires, qui ont fusionné pour former un trou noir de soixante-deux masses solaires. Mais... $29 + 36$ n'est pas égal à 62 ! C'est que, dans ce processus de fusion, l'équivalent de trois soleils a été transformé en onde gravitationnelle rayonnée dans tout l'espace.

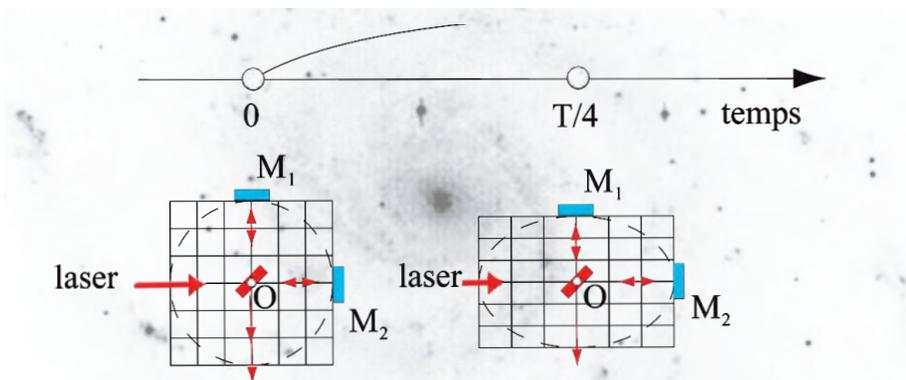
Voilà ce qu'il a fallu pour créer une onde gravitationnelle qui, après un milliard trois cent millions d'années-lumière de voyage, a déformé notre espace-temps d'environ un cent-millionième de la taille d'un atome.

Comment détecter une telle onde ? La petitesse de l'effet n'est qu'une première difficulté. En effet, d'après le principe d'équivalence, un observateur en chute libre ne peut pas savoir s'il est dans un champ de gravitation. Cette dernière n'a cependant pas disparu et seules les forces de marées, responsables de la déformation des objets, ne peuvent être annulées.



Déformation d'un anneau de matière au passage d'une onde gravitationnelle sinusoïdale en fonction du temps pendant une période. L'onde se propage perpendiculairement au plan de l'anneau et déforme l'espace : les points de l'anneau restent immobiles par rapport à la grille de coordonnées.
 © H. Lehning

Considérons un anneau de particules en chute libre perpendiculaire à la direction de la propagation de l'onde gravitationnelle. L'espace-temps se déforme périodiquement, si bien que l'anneau oscille mais la grille de coordonnées est aussi altérée : quiconque essaie de mesurer la déformation avec une règle ne détectera rien, la règle est elle aussi déformée. Les détecteurs d'ondes gravitationnelles sont des interféromètres.



Le passage d'une onde gravitationnelle dans une direction perpendiculaire à l'interféromètre modifie périodiquement la longueur de ses bras OM_1 et OM_2 , ce qui induit un changement de la différence de marche et donc de la figure d'interférence.
 © H. Lehning

C'est un peu comme si l'on avait placé deux miroirs sur l'anneau, ce qui permet de mettre en évidence une différence entre les longueurs de deux diamètres perpendiculaires, différence qui influe sur la figure d'interférence.

Le passage d'une onde gravitationnelle dans une direction perpendiculaire à l'interféromètre modifie périodiquement la longueur de ses bras OM_1 et OM_2 , ce qui induit un changement de la différence de marche et donc de la figure d'interférence. La relativité repose sur un espace quadri-dimensionnel, dont les équations permettent de déterminer la géométrie. Les déformations de l'espace en fonction du temps sous-entendent que l'on a effectué une foliation de l'espace-temps en espace à différents instants afin de pouvoir parler de son évolution.

Ces deux descriptions sont en fait complémentaires ! Un même espace-temps peut avoir des descriptions « intérieures » différentes suivant le choix d'une classe d'observateurs définissant une foliation particulière : on connaît des espaces-temps qui peuvent apparaître statiques pour un observateur et en expansion pour un autre. La relativité nous oblige à systématiquement expliciter qui observe, et comment. C'est le prix à payer pour abandonner toute référence à un espace absolu et à un référentiel privilégié.

J.P. U.

Pour en savoir (un peu) plus :

Les ondes gravitationnelles. Nathalie Deruelle et Jean-Pierre Lasota, Odile Jacob, 2018.

Théories de la relativité. Nathalie Deruelle et Jean-Philippe Uzan, Belin, 2015.

Maths Lumière Express. Collectif, Comité international des jeux mathématiques, 2015.

Big bang. Jean-Philippe Uzan, Flammarion, 2018.
