

Einstein a cru un temps avoir prouvé que les ondes gravitationnelles n'existaient pas

Une onde gravitationnelle déforme l'espace-temps sur son passage. Elle étire et comprime l'espace dans des directions perpendiculaires à celle de sa propagation : c'est une onde transversale. Les effets de déformation sont matérialisés ici par huit petites boules initialement disposées en cercle (*plan bleu foncé*). L'onde qui arrive par la gauche sur le cercle le comprime (*plan vert*) suivant l'axe vertical. Puis le cercle retrouve sa forme initiale avant d'être comprimé selon l'axe horizontal.

qu'elle était au contraire déterminée par son contenu énergétique et que la gravitation était une manifestation de sa géométrie courbée, plutôt qu'une force comme les autres.

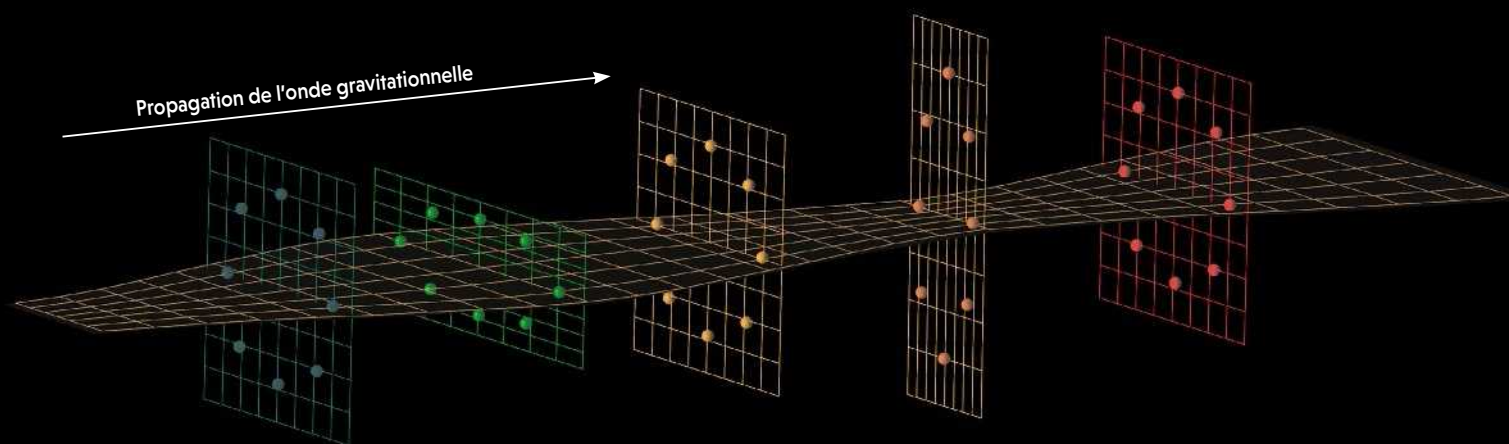
On illustre souvent ce principe par une figure où l'espace est représenté comme une surface déformée par une masse centrale, autour de laquelle un corps plus petit est en orbite. Dans cette interprétation du phénomène, aucune force n'agit sur le corps le plus léger : il obéit au principe d'inertie et va tout droit devant lui. L'espace étant courbe, sa trajectoire l'est aussi et il se retrouve à tourner autour de l'objet le plus massif. Cette schématisation, trompeuse par certains aspects, met néanmoins en avant le fait qu'en physique moderne, l'espace-temps n'est plus considéré comme une scène passive, où se déroulent les phénomènes, mais comme une sorte de continuum souple qui assure la relation entre les autres objets physiques.

En laissant de côté le temps pour simplifier, on peut en quelque sorte visualiser l'espace comme un milieu élastique pouvant se déformer, vibrer et donc être parcouru par des vagues (voir la figure ci-dessous). Dès 1916, Einstein a tenté de vérifier que les équations de sa théorie admettaient une solution représentant la propagation d'ondes. L'élégance mathématique de la relativité générale va cependant de pair avec la complexité de ses équations. L'une des caractéristiques de ces dernières est d'être non linéaires : la réponse d'un système n'est pas directement proportionnelle au stimulus appliqué.

SIX TYPES D'ONDES

Einstein s'intéressa donc pour commencer au cas simplifié où les ondes correspondaient à une petite perturbation de la géométrie initialement « plate » de l'espace-temps. Comme il l'espérait, ses calculs ont fait apparaître plusieurs types de vibrations du champ gravitationnel, qui se propageaient toutes à la vitesse de la lumière. Mais rapidement, le doute surgit quant à la réalité physique de ces solutions.

L'une des sources du scepticisme était liée à la nature duale des ondes gravitationnelles : elles sont géométriques, des vagues de l'espace (-temps), mais elles sont aussi physiques, puisqu'elles caractérisent le champ gravitationnel. Ainsi, on doit pouvoir leur associer certaines grandeurs telles une vitesse, un flux énergétique... Or, parmi les six types d'ondes obtenues par Einstein – six polarisations selon la terminologie moderne –, seuls deux correspondaient à un transfert d'énergie et se propageaient à la vitesse de la lumière. Ces ondes avaient aussi la caractéristique d'être transversales, comme les ondes électromagnétiques, c'est-à-dire qu'elles n'ont un effet que dans le plan >



- orthogonal à leur direction de propagation (voir la figure page précédente). À l'inverse, les ondes sonores, longitudinales, compriment l'air dans la direction de leur propagation.

Les quatre autres polarisations obtenues ne transportaient pas d'énergie et se déplaçaient à des vitesses arbitraires. Il s'agissait en réalité d'artefacts mathématiques provenant d'un problème mal maîtrisé à l'époque, la question du choix du système de coordonnées. Notons toutefois que les physiciens travaillent aujourd'hui sur des théories alternatives de la gravitation dans certaines desquelles ces polarisations sont physiques. Leur observation serait révolutionnaire et nous permettrait de tester la physique au-delà de la relativité générale.

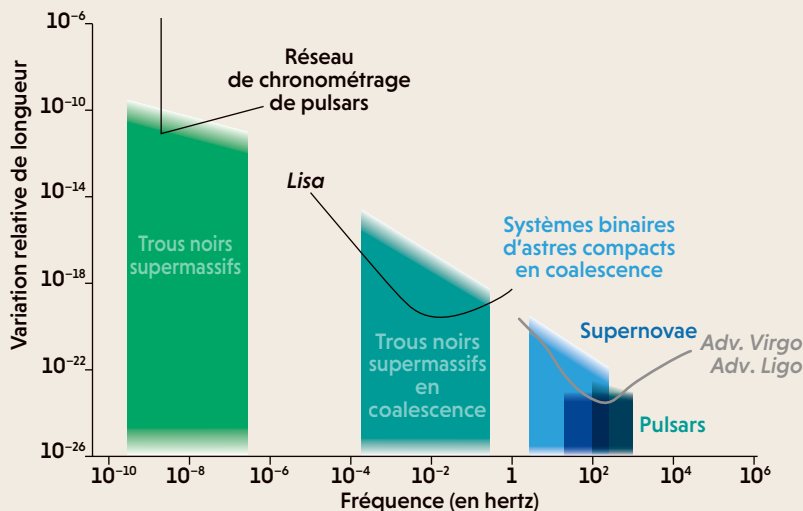
DES SOURCES VARIÉES

Un système n'émet d'ondes gravitationnelles que si la répartition de sa masse n'est pas trop symétrique et varie au cours du temps. Par ailleurs, l'amplitude des ondes émises est en général très faible. Elle peut devenir importante pour certains phénomènes astrophysiques (voir la figure) s'ils sont assez proches, tels une étoile qui explose en supernova, un pulsar ou une paire d'objets compacts (trous noirs et étoiles à neutrons) en rotation rapide proche de fusionner. L'amplitude des ondes prévue pour ces systèmes binaires les place dans la gamme accessible par *Advanced Ligo* et *Advanced Virgo*. L'amplitude n'est cependant pas le seul critère à considérer. En effet, chaque source d'ondes gravitationnelles émet à certaines fréquences. Pour des systèmes binaires de trous noirs supermassifs (de 10^6 à 10^8 masses solaires) proches de la coalescence,

cette fréquence est de l'ordre de 0,01 hertz. Cela correspond à des périodes d'environ une minute, difficiles à cerner pour des installations au sol exposées à de nombreuses sources naturelles de bruit. De telles ondes gravitationnelles sont la cible de futurs interféromètres spatiaux, tel le projet *Lisa*.

À plus basse fréquence, on trouve les émissions des systèmes binaires de trous noirs supermassifs hors coalescence, que l'on espère détecter en utilisant comme horloges de référence des pulsars dont les mesures seraient perturbées par le passage d'ondes.

À des fréquences encore plus basses, on prévoit des ondes gravitationnelles issues de l'Univers primordial. Elles auraient laissé une trace dans le rayonnement de fond diffus cosmologique sous la forme d'un mode de polarisation, mais leur amplitude n'est pas connue.



Les propriétés subtiles des coordonnées, combinées à la non-linéarité des équations, rendent la modélisation de la plupart des situations physiques difficile non seulement dans les calculs, mais aussi dans l'interprétation des résultats obtenus. Vers 1936, Einstein lui-même a cru un temps avoir prouvé, avec Nathan Rosen, son assistant à l'Institut des études avancées à Princeton, que les ondes gravitationnelles n'existaient pas. Une conclusion qui contredisait pourtant tous ses travaux précédents!

Dans la quête des ondes gravitationnelles, le physicien britannique Felix Pirani a franchi une étape cruciale en 1955. Il a montré qu'il était possible de détecter une onde gravitationnelle en mesurant les variations de la distance séparant au moins deux masses-test, autrement dit des corps si peu massifs que leur influence gravitationnelle est négligeable. En effet, même si elle est indétectable par une masse isolée, une onde se manifeste en contractant puis dilatant l'espace entre les deux masses-test.

Le rayonnement gravitationnel est donc détectable, mais que dire des mesures quantitatives? Pour concevoir un détecteur, il est nécessaire de déterminer l'ordre de grandeur de la puissance émise par une source, des variations de distance envisageables lors du passage d'une onde et de la fréquence du signal. À partir des premiers travaux d'Einstein, on peut montrer qu'un être humain rayonne une puissance de l'ordre de 10^{-50} watt en secouant les bras, et que la majorité des systèmes stellaires ne font guère mieux. Ces valeurs semblaient ainsi reléguer les ondes gravitationnelles au rayon des curiosités inobservables.

QUAND L'ESPOIR RENAÎT

L'espoir a été ravivé par plusieurs découvertes inattendues: celle des quasars en 1962 et celle des pulsars en 1967. Ces objets astrophysiques sont respectivement des trous noirs ou des étoiles à neutrons en rotation. Ils sont compacts, ce qui signifie que, par rapport à leur masse, ils ont une taille si petite que la relativité générale doit être prise en compte pour décrire leurs propriétés gravitationnelles. Les physiciens ont montré que si un système compact est animé de mouvements rapides (avec une vitesse proche de celle de la lumière), cohérents et pas trop symétriques, il constitue une bonne source d'ondes gravitationnelles (voir l'encadré ci-contre).

Bien qu'invisible pour les télescopes, la fusion – ou coalescence – de deux trous noirs, appartenant à un système binaire, est ainsi l'un des phénomènes les plus énergétiques qui soient. La puissance gravitationnelle émise par la fusion de deux trous noirs de masse