

- 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.

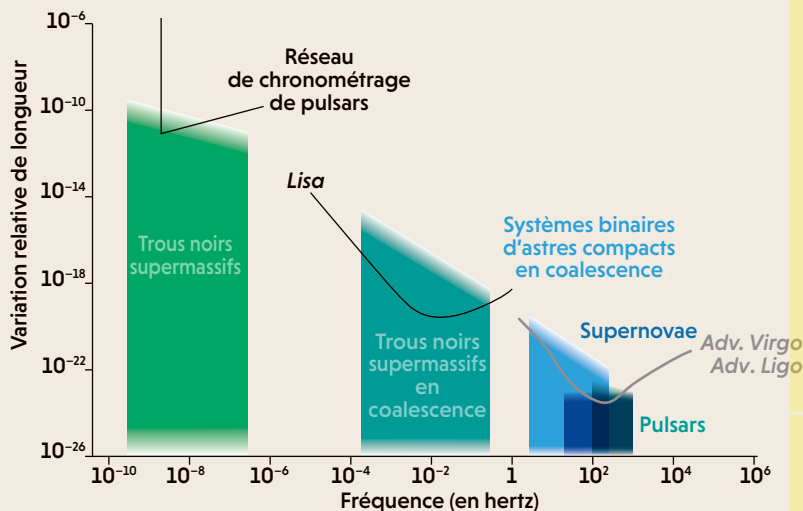
DES SOURCES VARIÉES

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

UNE DÉTECTION HISTORIQUE

Jeudi 11 février 2016. Les équipes des collaborations *Ligo* et *Virgo* organisent une conférence de presse. L'euphorie règne et les sourires rayonnent. C'est qu'elles viennent d'annoncer avoir détecté des ondes gravitationnelles, le 14 septembre 2015 à 11 h 51 (heure de Paris). C'est la première détection directe de ce type. L'événement observé par *Ligo* et noté GW150914 est un système binaire de deux trous noirs de 29 et 36 masses solaires, distant de 1,3 milliard d'années-lumière. Les deux détecteurs de *Ligo* ont enregistré le même signal avec seulement 7 millisecondes d'écart, le temps que l'onde se propage d'un détecteur à l'autre. Cette coïncidence ainsi que la forme du signal sont des indices convaincants que *Ligo* a enregistré une onde gravitationnelle. Les ondes gravitationnelles émises par les trous noirs constituent un signal très particulier : la fréquence et l'amplitude du signal

augmentent à mesure que les astres s'approchent de plus en plus vite en spirale l'un de l'autre. Les deux astres finissent par fusionner en formant un trou noir dont l'« horizon des événements », sa frontière en quelque sorte, est très déformée. Il se stabilise en une fraction de seconde et devient un trou noir en rotation sur lui-même, de forme plus régulière. C'est cette coalescence qui a produit des ondes gravitationnelles suffisamment intenses pour être détectées. L'analyse du signal enregistré indique que la masse du trou noir résultant est 62 fois celle du Soleil. Ainsi, pas moins de 3 masses solaires ont été converties ($E = mc^2$, rappelons-le) en ondes gravitationnelles en moins d'une seconde ! Et juste avant la fusion des deux astres, ces derniers tournaient l'un autour de l'autre à une cadence de 75 tours par seconde, à une vitesse voisine de la moitié de celle de la lumière...

Sean Bailly

solaires est d'environ 10^{46} watts, une valeur à comparer à la puissance lumineuse du Soleil, 10^{26} watts. Mais toutes les sources notables d'ondes gravitationnelles, aussi puissantes soient-elles, sont lointaines. En conséquence, les signaux percevables sur Terre sont extraordinairement faibles.

L'existence des ondes gravitationnelles a pour la première fois été prouvée de façon observationnelle par un biais indirect grâce à l'étude du pulsar binaire PSR B1513-16, découvert en 1974 par les Américains Joseph Taylor et Russell Hulse (ce qui leur valut le prix Nobel de physique en 1993). La diminution progressive de la période de révolution du système est liée à une perte d'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles. Les calculs, notamment des physiciens français Thibault Damour et Nathalie Deruelle, ont confirmé l'accord entre la relativité générale et les observations.

Il restait ensuite à détecter directement les ondes gravitationnelles, un défi relevé par les

expériences *Ligo*, sur deux sites éloignés aux États-Unis, et *Virgo*, au sud de Pise, en Italie, capables de mesurer des variations relatives de distance similaires à la taille d'un atome comparée au diamètre du Système solaire.

Ces détecteurs reposent sur le principe de l'interférométrie. Les masses-test sont des miroirs suspendus aux extrémités de deux bras perpendiculaires où se propage un faisceau laser de grande puissance (jusqu'à 200 watts). La moindre variation de longueur des deux bras influe sur l'intensité de la lumière au point de rencontre des deux faisceaux laser.

DE LA SUPERPOSITION DES ONDES LASER

Plus les miroirs sont éloignés, plus la variation de distance induite par le passage d'une onde gravitationnelle est grande et donc « facile » à mesurer. Ainsi, pour l'expérience franco-italienne *Virgo*, les deux bras perpendiculaires mesurent trois kilomètres de long (voir l'encadré page suivante). Un laser infrarouge émet un faisceau qu'un miroir semi-transparent, la « séparatrice », scinde en deux. Chacun des deux faisceaux entre dans une cavité optique de trois kilomètres avant d'atteindre un miroir (la masse-test) qui le renvoie vers la séparatrice. La lumière fait un grand nombre d'allers et retours dans la cavité avant de sortir, ce qui augmente considérablement la longueur effective des bras du détecteur. Sur la séparatrice, les deux faisceaux se superposent et interfèrent, à cause du caractère ondulatoire de la lumière. Au départ, l'appareil est réglé de sorte que les deux faisceaux interfèrent de façon destructive : les crêtes de l'onde lumineuse d'un des faisceaux correspondent aux creux de l'autre, et inversement. Les deux ondes se compensent et le signal enregistré par le capteur est nul.

Lorsqu'une onde gravitationnelle passe, la longueur du trajet de chaque faisceau varie de façon infime. Cela modifie la position relative des crêtes et des creux des ondes laser. Leur superposition ne s'annule plus totalement et le capteur enregistre un signal. Les chercheurs en déduisent les variations de longueur des bras et concluent sur le passage éventuel d'une onde gravitationnelle. Avec les interféromètres actuels, les plus petites variations de longueur détectables sont de l'ordre de 10^{-20} mètre, un cent millième de la taille d'un proton ! Cependant, de nombreux phénomènes autres que les ondes gravitationnelles peuvent modifier la distance. Les physiciens doivent isoler le signal lié aux ondes gravitationnelles de ce « bruit ».

Les interféromètres fonctionnent indépendamment, mais aussi de concert. L'intérêt est de combiner leurs informations afin de