

A la recherche des ondes gravitationnelles avec les télescopes géants Virgo et LIGO

Les ondes gravitationnelles, prédites par la théorie de la Relativité Générale élaborée par Albert Einstein en 1915, ont jusqu'ici résisté aux tentatives de détection expérimentales mises en œuvre depuis plusieurs dizaines d'années avec les télescopes ultra-sensibles Virgo, en Europe, et LIGO, aux États-Unis. Les améliorations actuellement mises en œuvre par ces collaborations internationales devraient permettre de détecter les premières ondes gravitationnelles d'ici 2020.

Mais que sont ces ondes ? D'où viennent-elles ? Et comment espère-t-on les détecter ?



Illustration 1: Photographie de l'interféromètre Virgo vu du ciel

Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?

Décrire la force de gravitation comme une conséquence de la déformation de l'espace-temps par la masse et l'énergie, c'est ce qu'Einstein fait lorsqu'il publie sa théorie de la Relativité Générale en 1915. Le temps et l'espace de l'ancienne théorie de Newton ne font alors plus qu'un, et cet espace-temps n'est plus plat mais courbé. Il est difficile de se représenter cette courbure parce que nous vivons à l'intérieur même de l'espace-temps et que notre intuition n'y est pas habituée. Et nous ne pouvons pas en sortir comme nous pouvons nous envoler à bord d'un vaisseau spatial pour voir la courbure de notre belle planète. La Relativité Générale considère d'ailleurs notre espace-temps comme intrinsèquement courbe, c'est à dire qu'il n'est pas plongé dans un espace de dimension supérieure. Malgré cela, nous avons des moyens de mesurer la courbure, par exemple en regardant la déviation des rayons lumineux provenant d'étoiles lointaines par un corps massif comme le soleil.

Peu après avoir développé les équations de la Relativité Générale, appelées aussi équations de champ d'Einstein, celui-ci a cherché les conditions dans lesquelles ces équations pouvaient se simplifier. Les équations d'Einstein décrivent la manière dont les masses et l'énergie courbent l'espace-temps, modifient sa géométrie, mais aussi comment cette courbure peut influencer le mouvement des masses et changer les distributions d'énergie ; pour les spécialistes, ce sont des équations dites différentielles non linéaires, que l'on ne peut résoudre complètement (sans utiliser de méthodes numériques sur ordinateur) que dans un nombre limité de cas. Lorsqu'on imagine un espace-temps plat, donc en éloignant toutes les masses et sources d'énergie, les équations d'Einstein sont automatiquement satisfaites. Si on ajoute à cet espace-temps plat une toute petite perturbation, que l'on ne considère que des courbures faibles, on peut espérer simplifier les équations en négligeant certains termes. C'est effectivement ce qui se produit, et l'équation que l'on obtient est simplement une équation d'onde. On ne l'a pas particulièrement cherchée, elle est là. Et on connaît ce genre d'équation depuis longtemps. Elle peut décrire par exemple les perturbations de la surface de l'eau lorsqu'on y jette une pierre. Dans notre cas, la perturbation qui se propage est une déformation de l'espace-temps !

De nouveau, il est difficile de s'imaginer ce que veut dire déformer un espace-temps. Pour nous aider, on peut faire une expérience "de pensée". Imaginons que, dans un espace vide et loin de toute masse ou distribution d'énergie, nous posions une masse que nous appellerons "masse-test". A priori, elle n'est soumise à aucune interaction. Lorsqu'une onde gravitationnelle passe, la masse-test va-t-elle flotter comme un canard en plastique sur l'eau ? Peut-être, mais elle ne pourra rien en dire, elle est en chute libre et toute masse en chute libre se trouve en apesanteur et ne ressent rien de particulier. On dit qu'elle suit sa ligne d'univers. Pour pouvoir dire quelque chose à propos des caractéristiques de l'espace-temps qu'elle parcourt, il lui faut une référence, une autre masse test. Posons donc deux masses test éloignées d'une longueur donnée dans l'espace plat. Nous supposons que les deux masses sont très petites et n'interagissent pas entre elles. En l'absence d'onde, ces deux masses vont donc rester immobiles, la distance entre elles restant constante. Si une onde gravitationnelle passe, la distance entre les deux masses test va varier alternativement au rythme du passage de l'onde. Nous n'en avons pas encore parlé, mais si chaque masse test possède un appareil de mesure capable de lui donner la distance qui la sépare de sa

voisine, elle observera une variation de cette distance. Mais pour réellement imaginer l'influence de l'onde, il faudrait déplacer les deux masses de façon à tester toutes les configurations géométriques possibles. Les variations de distance varient-elles plus dans telle direction que dans telle autre ? Quelle est l'influence de la direction de propagation de l'onde ? Pour répondre à ces questions, il suffit d'augmenter le nombre de masses. Disposons un ensemble de masses-test selon un cercle. On suppose toujours que ces masses n'interagissent pas entre elles. Lorsqu'une onde gravitationnelle passe à travers ce "cercle" et perpendiculairement à lui, les distances entre les masses changent. D'après les propriétés des ondes gravitationnelles prédites par la théorie, l'une des directions, par exemple haut-bas, sera contractée lorsque l'autre, par exemple droite-gauche, sera étendue. Comme il s'agit d'une onde, lors de l'alternance suivante, ce sera la direction haut-bas qui sera étendue et la direction droite-gauche qui sera contractée. Au passage de l'onde, on aura cette variation oscillante des longueurs qui modifiera alternativement l'apparence du cercle.

Les équations d'Einstein nous donnent également une indication sur la manière de générer des ondes gravitationnelles. Il faut que la façon dont la masse ou l'énergie sont distribuées et varient au cours du temps soit particulière. Imaginons par exemple une distribution de masse similaire à un ballon de rugby, ellipsoïdale. Faisons tourner cette distribution sur elle-même autour de l'axe principal du ballon, son plus grand axe. Si le ballon est bien symétrique, quel que soit l'endroit où l'on se place, on ne remarquera aucune modification du champ gravitationnel, c'est finalement assez intuitif. Pas de génération d'ondes gravitationnelles non plus. Si maintenant on fait tourner le même ballon autour d'un axe perpendiculaire au précédent, un observateur extérieur expérimentera une variation régulière de l'orientation du ballon par rapport à lui et donc une variation du champ gravitationnel. Là, on pourra observer des ondes gravitationnelles générées par le système. En poursuivant l'idée, l'une des configurations les plus simples qui génèrerait ces ondes serait un système de deux astres en orbite l'un autour de l'autre.

Pourquoi forcément parler d'objets astrophysiques ? Ne peut-on produire des ondes gravitationnelles à l'aide d'une barre qui tourne ? Sans doute, mais les calculs montrent que l'amplitude des ondes ainsi générées serait tellement faible qu'on ne pourrait pas espérer les détecter. L'amplitude des ondes gravitationnelles s'identifie à la variation relative de distance entre deux masses tests, soit le rapport entre la variation de distance et leur distance initiale. Si l'on se tourne vers des objets astrophysiques compacts tels des étoiles à neutrons ou des trous noirs, qu'on les mette en couple, en orbite l'un autour de l'autre et que le couple soit situé dans une galaxie voisine de la nôtre, qu'on calcule l'amplitude de l'onde que nous pourrions espérer observer sur Terre, on obtient des valeurs tellement petites qu'elles donnent le vertige ; dans notre cas, la variation relative de distance entre deux masses-test que nous observerions serait voisine de 10^{-22} . C'est un peu comme si on voulait mesurer une variation du diamètre de l'orbite de Jupiter (1,5 milliards de km) qui serait de la taille d'un atome (environ un dix millionième de millimètre). C'est à un défi presque cent fois plus difficile, c'est-à-dire une détection d'une onde d'amplitude inférieure à 10^{-23} , que se sont attaqués les physiciens des expériences de détection aujourd'hui en fonctionnement ou en phase de mise au point.

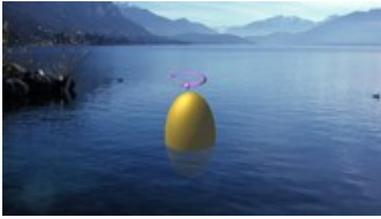


Illustration 2: Illustration de l'émission, ou non, d'ondes gravitationnelles par une masse asymétrique en rotation.

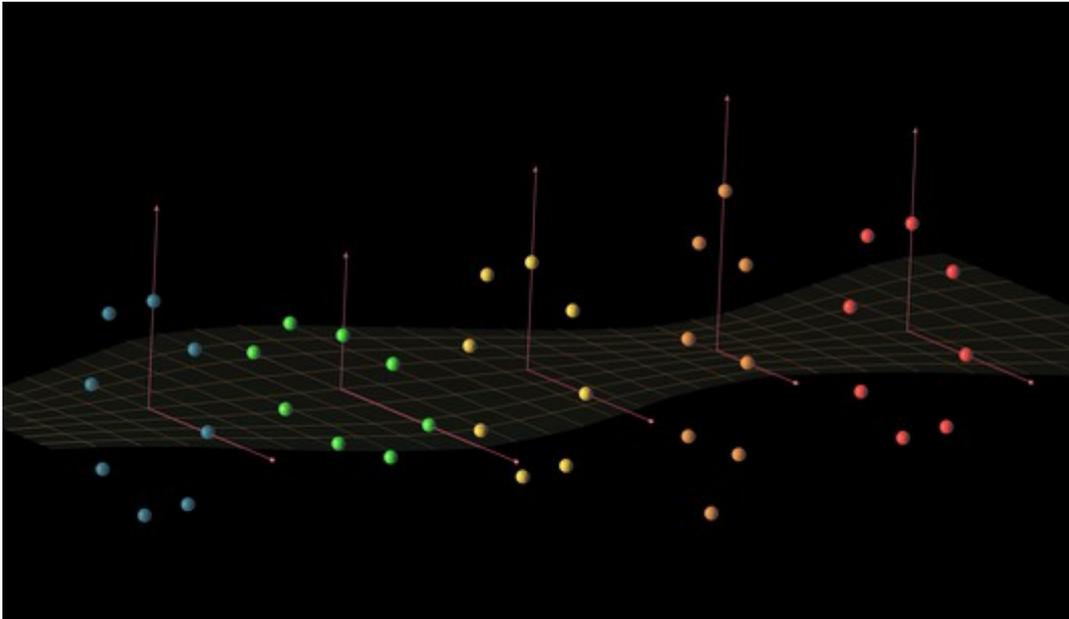


Illustration 3: illustration de l'effet (très exagéré) du passage d'une onde gravitationnelle sur cinq groupes de masses test. Ces masses n'interagissent pas entre elles, sont initialement réparties sur des cercles parallèles centrés sur le même axe. Les cercles sont séparés d'un quart de la longueur d'onde de l'onde gravitationnelle. Le plan quadrillé et les axes guident l'œil pour percevoir la modification des distances.

Quelles sont les sources astrophysiques attendues ?

Les performances des détecteurs Virgo et LIGO permettront, d'ici 2020, de détecter des variations relatives de distance inférieures à 10^{-23} . Malgré ces performances impressionnantes, seul un petit nombre de sources seront observables : il faut que des phénomènes astrophysiques extrêmement violents aient lieu relativement près de la Terre. Parmi les phénomènes les plus violents, les collisions de trous noirs ou d'étoiles à neutrons pourront être observées dans des millions de galaxies autour de nous. Mais, générant des ondes gravitationnelles de moindre amplitude, les explosions d'étoiles et les étoiles à neutrons en rotation ne pourront être détectées que si elles se trouvent à proximité, à l'intérieur même de la Voie Lactée. Décrivons maintenant un peu plus en détails quelles ondes gravitationnelles sont émises par ces objets.

Les systèmes doubles d'astres compacts, étoiles à neutrons ou trous noirs, sont les sources d'ondes gravitationnelles les plus prometteuses pour les premières détections. Les deux étoiles tournent l'une autour de l'autre, perturbant l'espace-temps et générant ainsi des ondes gravitationnelles. Ces ondes emportent une fraction de l'énergie du système ce qui provoque un rapprochement des deux astres et une rotation de l'un autour de l'autre encore plus rapide. Le système perd alors encore plus d'énergie et les étoiles se rapprochent encore petit à petit, jusqu'à ce que les deux objets

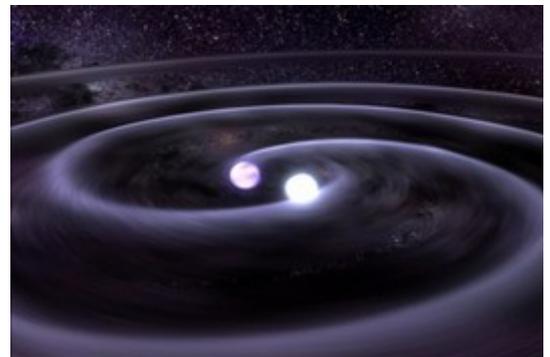


Illustration 4: Vue d'artiste montrant l'émission d'ondes gravitationnelles par un système double d'étoiles à neutrons

soient si proches qu'ils entrent en collision et fusionnent en formant un trou noir. Les détecteurs terrestres tels que Virgo sont sensibles à des ondes gravitationnelles de fréquence entre dix hertz et quelques kilohertz : ils ne peuvent détecter que les derniers instants de la vie de ces systèmes compacts, lorsque les deux astres tournent des dizaines ou des centaines de fois par seconde l'un autour de l'autre et finissent par fusionner. Nous savons que de tels systèmes existent, mais ils n'ont pour le moment été observés que dans le domaine électromagnétique. En particulier, le pulsar binaire PSR1913+16, observé depuis 1976 [Découverte], a fourni la première preuve expérimentale indirecte de l'existence des ondes gravitationnelles. Ce système est formé de deux étoiles à neutrons et l'évolution de ses paramètres orbitaux, suivi pendant plus de 30 ans, a mis en évidence une diminution de la période orbitale, remarquablement en accord avec la perte d'énergie par émission d'ondes gravitationnelles prédite par la Relativité Générale [Preuve]. Virgo pourrait observer les ondes gravitationnelles émises par ce système lors des dernières secondes de sa vie... mais ceci n'aura lieu que dans quelques centaines de millions d'années ! Heureusement, d'autres systèmes de ce type existent, et à un stade plus avancé de leur évolution. La forme des ondes gravitationnelles émises juste avant la collision est très bien modélisée : leur amplitude et leur fréquence augmentent au cours du temps (comme un "gazouillis"), d'une façon dépendant des paramètres intrinsèques du système double. Pour les adeptes, un jeu en ligne (Black Hole Hunter) permet d'essayer "d'entendre" de tels signaux, durant quelques secondes, cachés dans le signal bruité mesuré par un télescope [BlackHoleHunter]. Ces modèles d'ondes précis permettent de rechercher ces ondes efficacement dans les mesures

des détecteurs. Cependant, dans le volume d'univers observé par Virgo jusqu'en 2011, englobant près d'un millier de galaxies, on estime que très peu de ces systèmes fusionnent chaque année : on s'attendait à en détecter quelques uns par siècle. Les télescopes en cours de construction tels qu'Advanced Virgo pouvant voir dix fois plus loin, ils devraient atteindre quelques détections par an d'ici 2020.

Quelles sont les sources d'ondes gravitationnelles plus proches de nous ? L'effondrement gravitationnel d'une étoile massive en fin de vie (supernova) en étoile à neutrons ou trou noir pourrait en faire partie, mais les modèles actuels indiquent que la puissance émise sous forme d'ondes gravitationnelles reste trop faible pour que les détecteurs puissent "entendre" ces explosions hors de notre galaxie. Le nombre de détections d'ondes gravitationnelles en provenance de supernovæ de la Voie Lactée est donc limité à quelques unes par siècle. La forme et l'amplitude de l'onde attendue sont peu prédictibles, mais on s'attend à ce qu'elle ne dure que quelques millisecondes avec une amplitude, au niveau de la Terre, inférieure à 10^{-22} . La détection d'une telle onde nous permettra d'obtenir de précieuses informations sur les phénomènes qui se passent au cœur même des explosions d'étoiles.



Illustration 5: Vue d'artiste d'une explosion d'étoile

Un deuxième type de sources proches d'ondes gravitationnelles sont les étoile à neutrons. Vestige d'étoile, une étoile à neutrons possède une masse de l'ordre de celle du Soleil, condensée dans une boule quasiment parfaite de 10 km de rayon seulement qui tourne sur elle-même jusqu'à 1000 fois par seconde. C'est ce type d'objets qui se cache derrière le nom de pulsars dans le cas où le signal électromagnétique périodique qu'ils émettent est observé depuis la Terre. Selon le principe évoqué précédemment avec l'image du ballon de rugby, cette étoile n'émettra des ondes gravitationnelles que si elle n'est pas parfaitement sphérique et qu'elle ne tourne pas autour de son axe principal. Même pour des étoiles à neutrons situées à une centaine de parsecs de la Terre, ces ondes ont une amplitude très faible lorsqu'elles arrivent sur notre planète, sûrement inférieure à 10^{-25} . Mais, grâce à leur caractère périodique et continu, le signal devrait cependant être détectable en analysant plusieurs mois de mesures. De tels signaux n'ayant pas encore été vus dans les mesures de Virgo en provenance de pulsars connus autour de la Terre, les scientifiques en ont conclu que l'écart à la rotondité de ces boules de 10 km de rayon est inférieur à 1 mm ! Leur détection donnera des informations supplémentaires sur leur structure interne.

Enfin, des phénomènes plus exotiques comme des transitions de phase de l'univers primordial ou des vibrations de cordes cosmiques pourraient générer des ondes gravitationnelles. Du fait du caractère aléatoire de ces ondes, il faut corrélérer les mesures d'au moins deux détecteurs pour espérer les mettre en évidence.

Comment observer les ondes gravitationnelles ?

Dans les prochaines années, les physiciens veulent détecter des ondes gravitationnelles générant, lors de leur passage sur Terre, des variations relatives de distance inférieures à 10^{-23} . Pour relever ce défi, les scientifiques ont construit des détecteurs qui mettent en application l'expérience de "pensée" discutée dans la première partie. Parmi eux, les détecteurs Virgo, en Italie, et LIGO aux États-Unis, ont déjà observé le ciel. Les masses-test sont des miroirs suspendus, et la mesure des variations de distance entre les miroirs est réalisée à l'aide d'un faisceau laser ultra-stable. Plus la distance entre les miroirs est grande, plus la variation de distance induite par une onde gravitationnelle est grande et donc « facile » à détecter : c'est pour cela que les miroirs sont séparés de plusieurs kilomètres. En pratique, le détecteur est un interféromètre de type Michelson, avec, pour Virgo, installé au sud de Pise en Italie, deux bras perpendiculaires de 3 km de long. Les faisceaux issus des deux bras interfèrent à la sortie de l'interféromètre. Le résultat de l'interférence entre les deux faisceaux dépend de la différence de longueur de chacun des bras. Lorsqu'une onde gravitationnelle passe, ces longueurs varient de façon infime l'une par rapport à l'autre et modifient donc le faisceau qui sort de l'interféromètre, en particulier sa puissance. Des photodiodes mesurent ces variations de puissance. Les chercheurs en déduisent les variations de longueurs des bras qui leur permettent de conclure sur le passage, ou non, d'une onde gravitationnelle. Avec les détecteurs en construction, les plus petites variations de longueur détectables seront de l'ordre de 10^{-20} m pour une distance initiale de 3 km entre deux miroirs !

Afin d'atteindre ce niveau, la longueur effective des bras est augmentée en introduisant des miroirs supplémentaires qui créent une cavité optique (Fabry-Perot) dans chaque bras. D'autres miroirs et cavités optiques permettent d'augmenter la puissance effective du faisceau laser et ainsi d'être plus sensible aux ondes gravitationnelles qu'un simple interféromètre de Michelson.

Bien sûr, de nombreux phénomènes vibratoires viennent perturber les mesures de distance dans l'interféromètre et doivent être combattus dans ces détecteurs ! Parmi eux, les vibrations sismiques : pour des miroirs posés sur le sol, ces vibrations induiraient des déplacements des milliards de fois plus importantes que les ondes gravitationnelles. Afin de les absorber, les miroirs sont suspendus à un système mécanique d'une dizaine de mètres de hauteur composé de sept amortisseurs. Les miroirs, une fois suspendus, se déplacent 100000 milliards de fois moins que le sol pour des fréquences de 10 Hz. Les vibrations sismiques de basse fréquence ne sont toutefois pas amorties et empêchent la recherche d'ondes gravitationnelles dont les fréquences seraient inférieures à 10 Hz. D'autres types de vibrations sont les vibrations thermiques. Du fait de la température des miroirs, les atomes de leur surface s'agitent en permanence et ceci, dans l'interféromètre, ressemble justement à une variation de longueur des bras qui, à des fréquences d'une centaine de hertz, ont une amplitude de 10^{-20} m : ce sont ces vibrations qui empêchent des détecter des ondes gravitationnelles d'amplitude inférieure à 10^{-23} ! La qualité des matériaux et la fabrication des miroirs et de leurs fils de suspension sont très finement étudiées afin de réduire au mieux ces vibrations thermiques. Enfin, du fait de la nature corpusculaire de la lumière, le nombre de photons récoltés par les photodiodes varie très légèrement au cours du temps, induisant de petites fluctuations de la puissance mesurée. Celles-ci aussi empêchent de détecter des ondes gravitationnelles d'amplitude très faible au dessus de quelques centaines de hertz. De

nombreux autres phénomènes viennent perturber la détection des ondes gravitationnelles, certains générant des bruits aléatoires en permanence, d'autres générant aléatoirement des bruits impulsifs pouvant ressembler à un signal d'onde gravitationnelle émis par des explosions ou fusions d'étoiles. L'atténuation de ces bruits constitue un des défis scientifiques et technologiques de ces expériences.

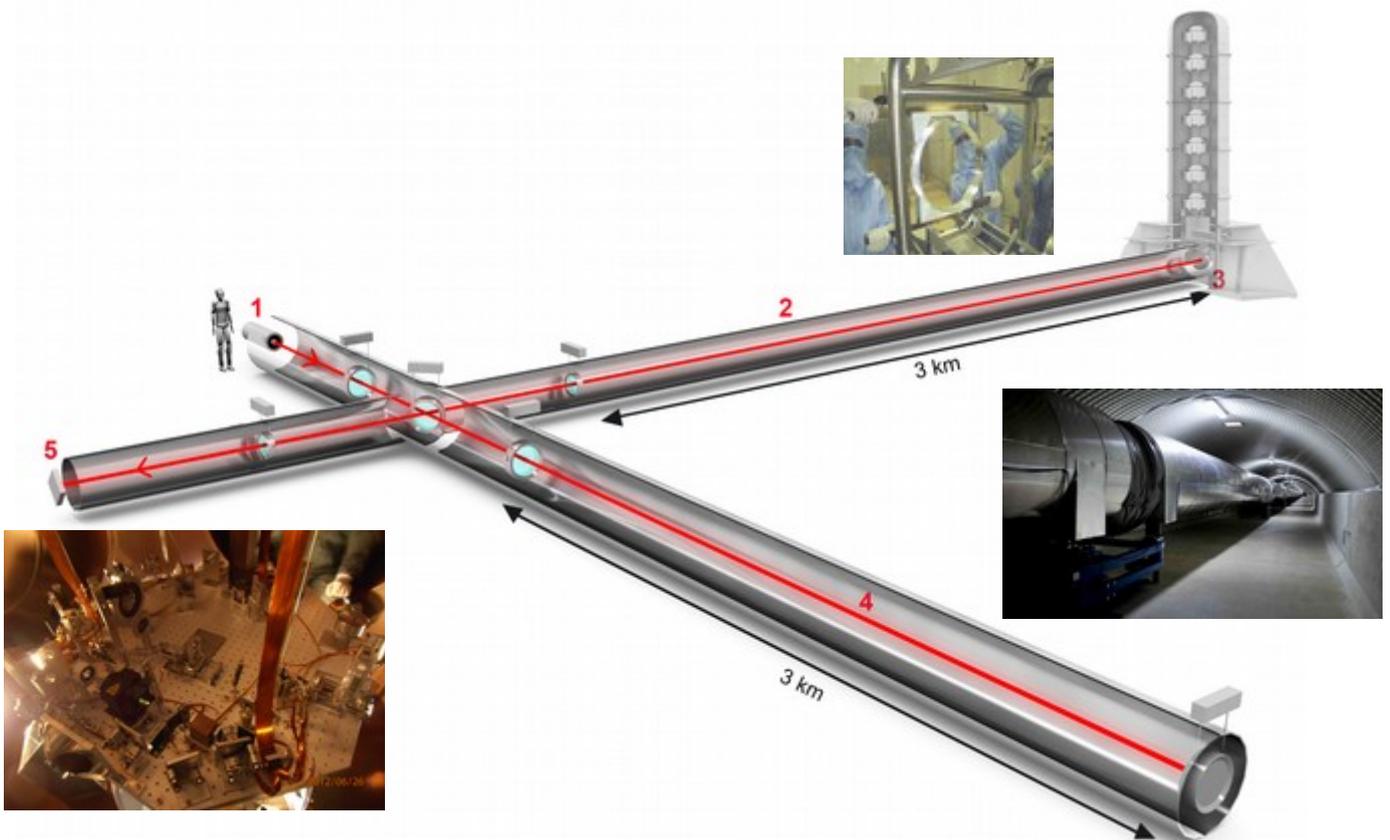


Illustration 6: Représentation d'un détecteur d'ondes gravitationnelles.

1 : le faisceau de lumière laser infra-rouge d'une puissance d'une centaine de watts est ultra-stable.

2 : la lumière laser se propage dans deux cavités Fabry-Perot de 3 km de long : elle fait des centaines d'allers-retours entre les miroirs, ce qui augmente la longueur effective des bras.

3 : les miroirs suspendus, placés sur le trajet de la lumière laser, sont des cylindres de 30 cm de diamètre polis quasi parfaitement à quelques couches atomiques près. Le système d'amortissement fait une dizaine de mètres de hauteur.

4 : le système de vide permet au faisceau de se propager sans obstacle sur 3 km. L'enceinte à vide est la plus grande d'Europe, avec un volume de 6800 m³. La pression y est de 10⁻⁹ mbar seulement, soit un millième de milliardième de la pression atmosphérique.

5 : les photodiodes mesurent la puissance du faisceau laser qui sort de l'interféromètre, c'est-à-dire le résultat de l'interférence entre les faisceaux provenant des deux bras.

Une fois les vibrations parasites réduites au mieux, un interféromètre pourra détecter une onde gravitationnelle. Mais, contrairement à un télescope, un interféromètre ne pointe pas car il peut capter des ondes provenant de n'importe quelle direction du ciel. Mais alors, comment peut-on savoir d'où vient l'onde qui a été détectée ? Pour répondre à cette question et obtenir une direction dans le ciel, on a besoin d'au moins trois détecteurs répartis à la surface de la Terre : lors de la détection d'onde gravitationnelle, la direction de la source de l'onde dans le ciel pourra être déterminée par triangulation. Un tel réseau de détecteurs est en fonctionnement depuis 2007 : les données de Virgo et des trois interféromètres de la collaboration LIGO, installés sur deux sites aux États-Unis, sont partagées et analysées en commun. Et ce partage a un deuxième avantage : les bruits impulsions ne peuvent plus se faire passer pour une onde gravitationnelle car ils ne sont pas vus par plusieurs détecteurs. Déterminer la direction de l'onde gravitationnelle est important afin de fournir l'information, en temps-réel, à des télescopes et satellites qui observent le ciel dans le domaine électromagnétique (de la radio aux rayons gamma, en passant par le domaine visible) pour qu'ils pointent dans cette direction et essaient d'observer des phénomènes en lien avec avec l'onde gravitationnelle détectée ; cette information est aussi partagée avec des détecteurs de neutrinos. Ces échanges permettront de mieux comprendre l'objet astrophysique et les phénomènes physiques à l'origine de cette onde.

Entre 2007 et 2011, les détecteurs Virgo et LIGO ont observé le ciel et recherché des ondes gravitationnelles qui produiraient des variations relatives de longueurs aussi petites que 10^{-22} sur Terre... mais ceci n'a pas encore été suffisant pour réaliser la première détection. La probabilité de détecter les événements astrophysiques rarissimes recherchés par Virgo augmente avec la possibilité d'observer des objets plus lointains. Depuis fin 2011, des améliorations majeures sont apportées à l'interféromètre pour construire Advanced Virgo qui doit redémarrer fin 2015. En alternant observations du ciel et phases de réglage du détecteur, Advanced Virgo doit être sensible d'ici 2020 à des variations relatives de longueur de 10^{-23} , c'est-à-dire être capable de voir dix fois plus loin que Virgo, ce qui revient à sonder un volume d'univers 1000 fois plus grand que Virgo. Il est prévu de détecter alors plusieurs collisions d'étoiles à neutrons par an. En parallèle, les détecteurs de la collaboration LIGO sont aussi en phase d'amélioration et de nouveaux détecteurs sont en construction, en particulier au Japon. D'ici 2020, les ondes gravitationnelles ne devraient pas pouvoir échapper à ce réseau mondial de détecteurs ! Et l'Univers nous réserve sans doute quelques surprises inattendues...

Références

[Découverte] Hulse R.A. et Taylor J.H., ApJ, vol 195, p. 51-53 (1975)

Discovery of a pulsar in a binary system.

[Preuve] Weisberg J.M., Nice D.J. et Taylor J.H., ApJ, vol 722, p. 1030-1034 (2010)

Timing measurements of the relativistic binary pulsar PSR B1913+16.

[Black Hole Hunter] <http://www.blackholehunter.org/>

[Virgo, site web] <https://wwwcascina.virgo.infn.it/>

[LAPP, site web] <http://lapp.in2p3.fr/>

Sources des figures

- photo Virgo :

EGO/Virgo

http://outreach.ego-gw.it/index.php?option=com_content&view=article&id=102&Itemid=94&lang=en

- illustration « ballon de rugby »:

CNRS/LAPP/Damir Buskulic

- illustration de l'effet du passage d'une onde gravitationnelle sur des masses libres :

CNRS/LAPP/Damir Buskulic (2014)

- système double d'étoile à neutrons:

NASA

<http://www.nasa.gov/topics/technology/features/atom-optics.html>

- supernova :

NASA

http://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/news/chandra_bright_supernova.html

- représentation d'un détecteur d'ondes gravitationnelles :

CNRS/LAPP/Julien Jupille (2012)

- photo d'un tube à vide de 3 km de Virgo:

EGO/Virgo

http://outreach.ego-gw.it/index.php?option=com_content&view=article&id=102&Itemid=94&lang=en

- photo d'un miroir de Virgo :

EGO/Virgo

http://www.ego-gw.it/virgodescription/francese/pag_7.html

- photo d'un banc optique de Virgo:

EGO/Virgo