

DES LASERS POUR DÉTECTER LES ONDES GRAVITATIONNELLES

Dans les années 2000, une première génération d'interféromètres géants a vu le jour (*LIGO* sur deux sites aux États-Unis, *Virgo* en Italie, *GEO600* en Allemagne et *TAMA300* au Japon). Ces instruments utilisent les propriétés ondulatoires de la lumière pour détecter les vibrations de l'espace-temps. S'ils n'ont pas enregistré d'ondes gravitationnelles, ils ont servi à améliorer les techniques aujourd'hui utilisées par *Advanced LIGO* (dont le détecteur de Livingston est schématiquement représenté ci-contre), *Advanced Virgo* et d'autres projets à venir.

L'ESPACE OSCILLE

Les ondes gravitationnelles (*en vert*) déforment l'espace sur leur passage. Elles le contractent et l'étirent alternativement. Pour détecter leur passage, une solution est de mesurer les variations de la distance qui sépare deux objets, des masses-test.

QUELLE EST LA FORME DE L'ONDE GRAVITATIONNELLE ?

Les ondes gravitationnelles émises par un système binaire de trous noirs ou d'étoiles à neutrons et d'une supernova ont des formes différentes. Leurs caractéristiques dépendent des propriétés de la source, telle la masse des objets qui la composent.

Le signal obtenu en septembre 2015 par *Advanced LIGO* correspond à la coalescence de deux trous noirs. Il se compose de trois parties liées au processus de coalescence. Dans un premier temps, les corps décrivent une spirale l'un autour de l'autre en se rapprochant. La fréquence et l'amplitude du signal augmentent progressivement et l'onde devient détectable juste avant la fusion (le *chirp* en anglais). Lors de la fusion, le signal est bref, irrégulier et d'amplitude importante. Puis l'horizon du trou noir né de la fusion vibre avant de se stabiliser. Cette désexcitation s'accompagne d'un signal dont l'amplitude et la fréquence diminuent régulièrement, le *ringdown* en anglais.

« Chirp »
(phase finale
de rotation
en spirale)

Fusion
(coalescence)

« Ringdown »
(désexcitation
du trou noir)

Miroir de fond
du bras sud
(masse-test)

LIGO
HANFORD

LIGO LIVINGSTON

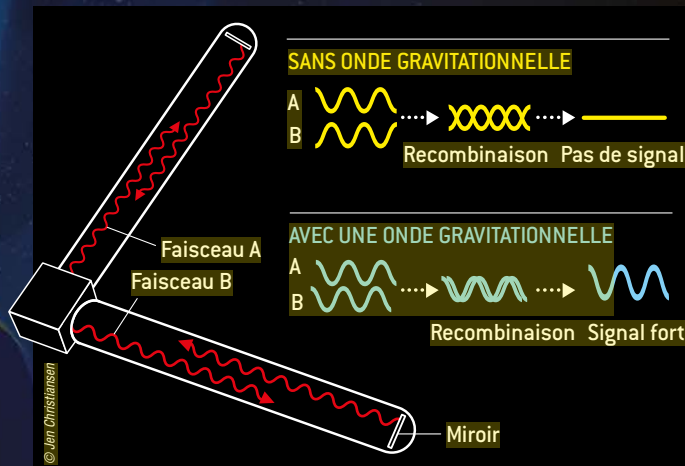
MESURER UNE VARIATION INFIME

Le passage d'une onde gravitationnelle à travers un interféromètre de *LIGO* – ici celui de Livingston – fait osciller la longueur des bras (en étirant l'un et contractant l'autre, puis en inversant les effets). Les miroirs aux extrémités des bras servent de masses-test. Grâce à un laser, on mesure la variation de distance entre ces masses-test. La longueur des bras (4 kilomètres) et la centaine d'allers et retours du laser dans les bras amplifient les variations de distance. Néanmoins, celles-ci restent de l'ordre de cent milliardièmes de la taille d'un atome.

Laser

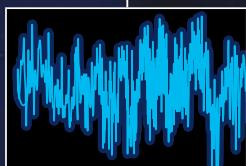
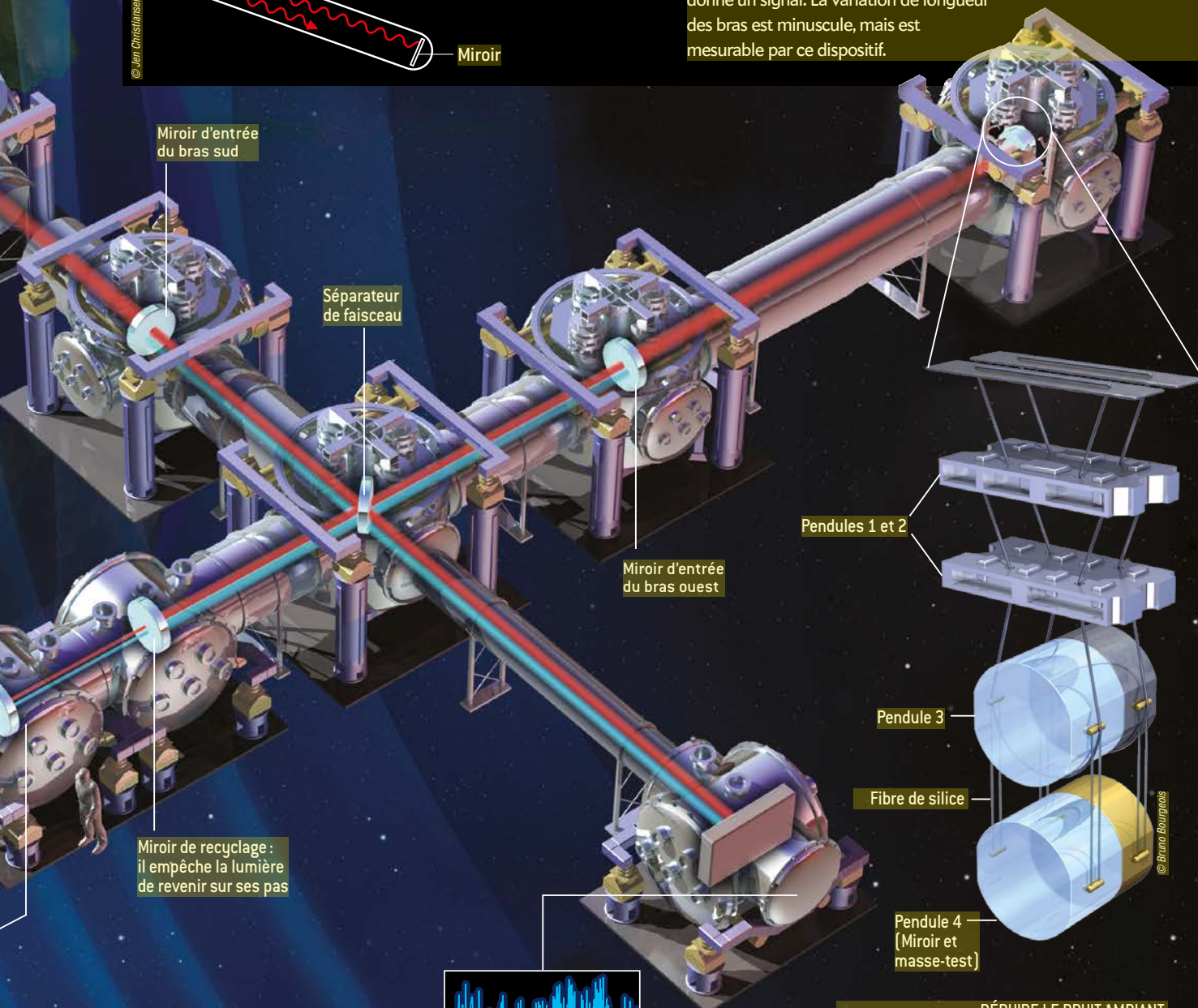
Modulateur
de fréquence :
il crée un faisceau
de référence

Résonateur :
il supprime
les instabilités
du laser



L'INTERFÉROMÉTRIE LASER

Le principe des interféromètres, tels *LIGO* et *Virgo*, est fondé sur la superposition de deux faisceaux laser. Un rayon laser est divisé en deux (A et B, ci-contre), dont l'un est déphasé par rapport à l'autre. Ces deux faisceaux sont envoyés dans des directions perpendiculaires, dans des bras longs de plusieurs kilomètres. Lorsque les faisceaux se recombinent (en jaune), les ondes déphasées se compensent : le faisceau résultant s'éteint et la photodiode n'enregistre aucun signal. Lorsqu'une onde gravitationnelle traverse le détecteur, elle modifie la longueur relative des bras (en bleu). La recombinaison des faisceaux donne un signal. La variation de longueur des bras est minuscule, mais est mesurable par ce dispositif.



La photodiode enregistre le motif d'interférence des deux faisceaux. Ces données contiennent du bruit et potentiellement un signal qu'il faut isoler.

RÉDUIRE LE BRUIT AMBIANT

Les interféromètres mesurent la distance avec une précision subatomique. Afin d'empêcher les phénomènes sismiques de perturber la mesure, les miroirs sont suspendus à des pendules. Dans la version *Advanced LIGO*, les miroirs sont plus gros qu'auparavant et suspendus à un quadruple pendule, au lieu d'un pendule simple. Ces miroirs oscillent, mais dans des gammes de fréquences qui n'empêchent pas la mesure de l'onde gravitationnelle provenant d'une coalescence de deux trous noirs, par exemple.



Par ailleurs, la théorie de la relativité générale décrit les propriétés de ces ondes et comment elles évoluent dans le cas d'une coalescence de deux trous noirs : en particulier, la fréquence et l'amplitude augmentent lors du rapprochement en spirale des deux corps, jusqu'à devenir détectables juste avant la fusion. Pendant la fusion, le signal est très bref, irrégulier avec une amplitude élevée. Puis, lors de la désexcitation (*ringdown* en anglais) du trou noir final – dont la surface (l'horizon) vibre avant de se stabiliser –, le signal perd en amplitude et la fréquence diminue (voir la figure pages 30 et 31).

L'analyse du signal obtenu par *Advanced LIGO* révèle certaines caractéristiques de la source de l'onde gravitationnelle. GW150914 a été produit par la fusion de deux trous noirs de 29 et 36 masses solaires. Et la coalescence a produit un trou noir de 62 masses solaires. L'énergie équivalente à trois fois la masse du Soleil s'est donc convertie en ondes gravitationnelles. Cette énergie, selon la formule d'Einstein qui relie l'énergie à la masse ($E = mc^2$), est colossale. La puissance émise au plus fort de la coalescence est comparable à dix fois la puissance

DEUX DÉTECTEURS JUMEAUX
séparés de 3 000 kilomètres
composent l'expérience
américaine *Advanced LIGO*.
L'un est situé à Hanford, dans
l'État de Washington (*en haut*)
et l'autre est à Livingston,
en Louisiane (*en bas*).

lumineuse émise par l'ensemble des étoiles et galaxies de l'Univers observable ! Tout aussi spectaculaire, juste avant la fusion, les deux trous noirs étaient distants de quelques centaines de kilomètres et effectuaient 75 orbites par seconde (la fréquence des ondes gravitationnelles associées est de l'ordre de 150 hertz), décrites à des vitesses de l'ordre de la moitié de celle de la lumière.

Dix fois la puissance de toutes les étoiles

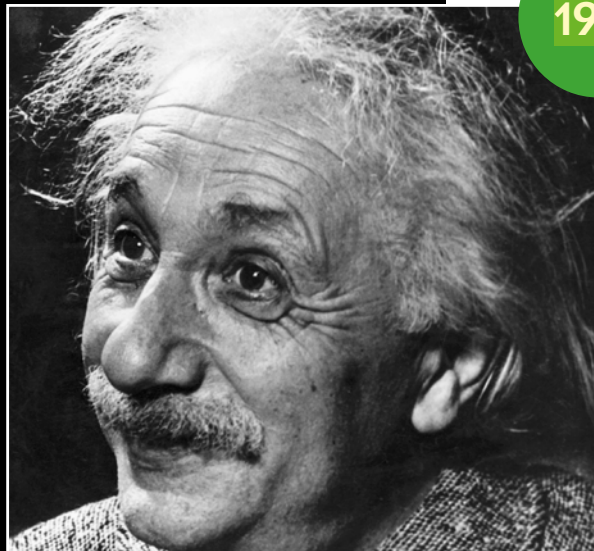
Les signaux enregistrés par les deux détecteurs d'*Advanced LIGO* livrent d'autres informations. Le système binaire était situé à environ 1,3 milliard d'années-lumière. Enfin, le retard de 7 millisecondes entre le signal enregistré à Livingston et celui capté à Hanford et la distance qui sépare ces sites ont permis d'estimer, par triangulation, que la source était située dans une région de la voûte céleste de l'hémisphère Sud (voir la figure b page 29).

La découverte par *LIGO* et *Virgo* d'une onde gravitationnelle démontre l'efficacité des interféromètres géants. Ces détecteurs utilisent une source laser divisée en deux faisceaux, lesquels font de multiples allers et retours dans deux tunnels perpendiculaires, longs de 3 kilomètres pour *Virgo* et de 4 kilomètres pour *LIGO* (voir la figure pages 30 et 31). À la fin de leur parcours, les faisceaux se rejoignent à l'intersection des deux tunnels, où ils interfèrent de façon destructive (voir la figure page 31). Le capteur placé en aval de ce point reçoit alors un signal nul. Lorsqu'une onde gravitationnelle traverse le dispositif, elle contracte et étire alternativement la longueur des tunnels. L'interférence entre les deux faisceaux n'annule plus exactement le signal.

Le principe physique du dispositif est simple, mais la mise en œuvre est un défi pour les chercheurs et les ingénieurs. En effet, à l'arrivée d'une onde gravitationnelle suffisamment intense pour qu'on puisse espérer la détecter, la variation de longueur des bras de l'interféromètre est de l'ordre de 100 milliardièmes de la taille d'un atome ! Les interféromètres géants sont sensibles à un changement aussi faible, mais les physiciens doivent écarter de nombreuses sources de bruit qui imitent ou couvrent le signal (les mouvements sismiques de la Terre, l'agitation thermique des atomes à la surface des miroirs placés aux extrémités des bras de l'interféromètre, etc.).

CENT ANS À LA POURSUITE DES ONDES GRAVITATIONNELLES

- 1916** ■ Albert Einstein émet l'hypothèse des ondes gravitationnelles dans le cadre de la théorie de la relativité générale.



1916

- 1957** ■ Felix Pirani montre qu'il serait possible de détecter les vibrations de l'espace-temps grâce à deux masses-test.

- 1966** ■ Joseph Weber entame la construction de ses « barres », une première tentative de détection d'ondes gravitationnelles.

- 1972** ■ Rainer Weiss améliore le concept d'interféromètre géant pour détecter les vibrations de l'espace-temps.

- 1974** ■ Joseph Taylor et Russell Hulse montrent que le pulsar binaire PSR B1913+16 perd de l'énergie en accord avec l'hypothèse d'ondes gravitationnelles.

- 1994** ■ Début de la construction des détecteurs *Virgo* et *LIGO*.

- 2015** ■ Démarrage d'*Advanced LIGO* et première détection d'une onde gravitationnelle.

- 2016** ■ Démarrage prévu d'*Advanced Virgo*.

■ BIBLIOGRAPHIE

B. P. Abbott *et al.*, Observation of gravitational waves from a binary black hole merger, *Physical Review Letters*, vol. 116, 061102, 2016.

D. Buskulic et L. Villain, À l'écoute des ondes gravitationnelles, *Pour la Science*, n° 457, novembre 2015.

P. Binétruy, À la poursuite des ondes gravitationnelles, Dunod, 2015.

P. Grandclément, Trous noirs et ondes gravitationnelles, *Dossier Pour la Science*, n° 75, avril-juin 2012.

D. Kennefick, *Traveling at the Speed of Thought : Einstein and the Quest for Gravitational Waves*, Princeton University Press, 2007.

Après une première phase d'acquisition de données dans les années 2000, les équipes de *LIGO* et *Virgo* ont entrepris d'importantes modifications techniques pour augmenter la sensibilité de leurs détecteurs (et l'améliorer d'un facteur 10 pour certaines fréquences). *Advanced LIGO* a redémarré en septembre 2015 et *Advanced Virgo* devrait être opérationnel à l'automne 2016. L'amélioration de la sensibilité des instruments se poursuivra. Ces derniers seront rejoints par *KAGRA*, un détecteur en cours de construction au Japon. Et le financement pour un interféromètre *LIGO* installé en Inde vient d'être accepté.

Un réseau de détecteurs

La mise en réseau de tous ces détecteurs ouvre d'extraordinaires perspectives pour l'astronomie et l'étude de l'Univers. Jusqu'à présent, pour étudier l'espace, les astronomes n'utilisaient que la lumière, dont ils exploitaient toutes les longueurs d'onde du spectre (des ondes radio aux rayons gamma). Les ondes gravitationnelles promettent d'explorer des phénomènes inaccessibles à la lumière. Par exemple, une étoile massive en fin de vie qui s'effondre sur elle-même produit des ondes gravitationnelles, alors que le cœur de l'étoile est opaque pour la lumière. Les ondes gravitationnelles pourraient donc fournir des informations précieuses sur ce qui se passe au cœur d'une supernova. Il y a néanmoins une incertitude sur l'intensité du signal et le nombre de supernovæ que l'on pourra détecter ainsi.

Les détecteurs au sol ont une sensibilité optimale pour des ondes gravitationnelles de fréquences comprises entre 10 et quelques milliers de hertz, ce qui est idéal pour l'étude des coalescences de systèmes binaires de trous noirs ou d'étoiles à neutrons, ou pour les supernovæ.

Cependant, d'autres sources d'ondes gravitationnelles de fréquences plus basses (émises par des coalescences de trous noirs supermassifs entre autres) échappent à ces détecteurs. Des projets d'interféromètres spatiaux, non soumis aux vibrations sismiques, pourront les étudier, tels *eLISA*, prévu à l'horizon de 2030, et dont un prototype *LISA Pathfinder* a été mis en orbite en décembre 2015. La découverte des équipes de *LIGO* et *Virgo* n'est que la toute première étape d'une nouvelle ère de l'astronomie, qui sondera les objets les plus étonnants du cosmos et même de l'Univers primordial. ■