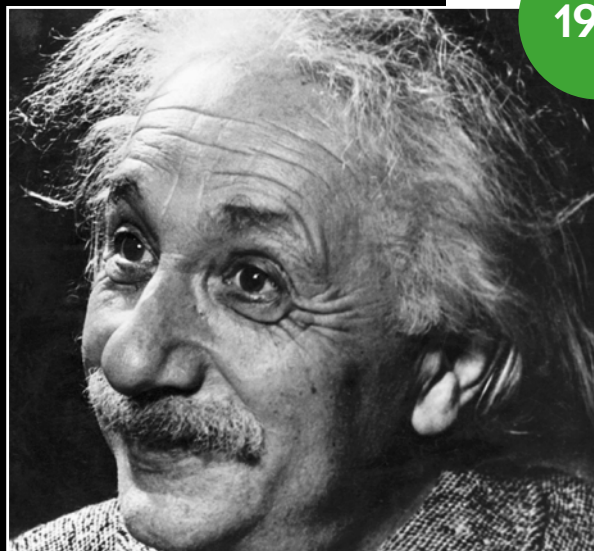


CENT ANS À LA POURSUITE DES ONDES GRAVITATIONNELLES

- 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. ■

« Avec les ondes gravitationnelles, nous verrons l'Univers comme nous ne l'avons jamais vu »

La détection d'ondes gravitationnelles par les deux interféromètres d'*Advanced LIGO* est un grand succès technique et scientifique : elle permettra d'étudier des objets cosmiques étonnants et inaccessibles aux télescopes.

Entretien avec **Benoît Mours**

En février 2016, les collaborations *LIGO* et *Virgo* ont annoncé la confirmation directe d'une prédiction d'Einstein datant de 1916 : l'existence des ondes gravitationnelles. Leur détection marque aussi le début d'une nouvelle ère pour l'astrophysique. Grâce à elles, les chercheurs pourront étudier des objets cosmiques jusque-là invisibles. Benoît Mours, responsable scientifique français de l'expérience franco-italienne *Virgo*, nous éclaire sur le défi que représente la détection et les nouvelles perspectives qu'elle offre à la science.

POUR LA SCIENCE

La détection d'ondes gravitationnelles, survenue le 14 septembre 2015, était une prouesse technique. Pourquoi ?

BENOÎT MOURS : Capturer le signal extrêmement ténu constitué par les ondes gravitationnelles, ces vibrations de l'espace-temps prédites par la théorie de la relativité générale, était un défi technique. Il a fallu plusieurs décennies de recherche et de développement pour améliorer nos instruments.

Donnons une idée de la faiblesse du signal. Une onde gravitationnelle contracte

et dilate alternativement l'espace, c'est-à-dire les distances, sur son passage. Sur le détecteur *Advanced LIGO*, la variation de distance a été de l'ordre de 10^{-18} mètre, soit 100 milliardièmes de la taille d'un atome. *Advanced LIGO* est assez sensible pour mesurer cette infime variation, mais il faut aussi tenir compte du bruit de fond qui risque de dissimuler un tel signal.

PLS

En quoi consiste ce bruit de fond ?

B. M. : Pour comprendre le bruit de fond, il faut d'abord expliquer comment le détecteur fonctionne. Ce dispositif, un interféromètre, utilise les propriétés ondulatoires de la lumière pour mesurer les variations de longueur : un rayon laser est scindé en deux faisceaux qui effectuent une centaine d'allers-retours dans deux tunnels perpendiculaires et longs de 4 kilomètres (les bras de l'interféromètre). Lorsque les faisceaux se rejoignent à l'intersection des bras, ils interfèrent. Si aucune onde gravitationnelle n'a perturbé le détecteur, les faisceaux, déphasés, s'annulent exactement : le signal est nul. Si une onde passe, la longueur des bras varie, un signal est enregistré. Mais le capteur



Benoît MOURS est directeur de recherche du CNRS au LAPP à Annecy, et responsable scientifique français de Virgo.

enregistre aussi du bruit qui peut, s'il est trop important, noyer le signal.

Le bruit de fond a plusieurs sources. Il peut être lié aux instruments, comme les fluctuations du nombre de photons observés dues à la nature quantique de la lumière, etc. Une autre part du bruit vient de l'environnement : on parle de bruit sismique. Il fait vibrer les différents éléments de l'interféromètre. Si l'on n'y prend pas garde, il est impossible d'espérer enregistrer une variation de l'ordre de cent milliardièmes de la taille d'un atome. C'est un défi extraordinaire.

PLS

D'où vient le bruit sismique ?

B. M. : Ce bruit correspond à des vibrations se propageant à la surface de la Terre. On pense tout de suite aux tremblements de terre, mais ces phénomènes sont ponctuels. Les plus problématiques pour nous – car ils sont permanents – sont d'une autre nature : les vagues des océans qui déferlent sur le rivage, le vent qui souffle sur les arbres et dont les racines transmettent les vibrations dans le sol, les activités humaines, etc.