

d'observation sur chaque site, fortement sollicités par ailleurs), et, surtout, météorologique puisque étaient indispensables des conditions clémentes en la matière simultanément sur chaque site. Certes chaque installation astronomique avait été choisie entre autres pour sa situation avantageuse, mais bénéficier d'une fenêtre météo favorable partout en même temps résulte d'une coïncidence plutôt heureuse... qui du reste ne fut pas complètement répétée lors de la campagne d'observation de l'année suivante.

Au final, les chiffres relatifs à la prise de données donnent un peu le vertige : chaque nuit, pendant plusieurs heures, chaque site enregistra des données à raison de plusieurs gigaoctets par seconde, chaque bit enregistré devant, pour pouvoir être traité ultérieurement, être accompagné de l'heure précise d'enregistrement calée sur des horloges atomiques. En tout, 4 pétaoctets de données (soit 4 millions de gigaoctets) furent précieusement sauvegardées, puis rapatriées au même endroit. La campagne d'observation de 2017 s'intéressa à deux cibles : Sgr A*, dans notre Galaxie et le trou noir géant de la galaxie M87, une des plus grosses galaxies de l'univers local. Situé à 50 millions d'années-lumière du Soleil, soit 2000 fois plus loin que Sgr A*, il est aussi 1 500 fois plus massif, donc 1 500 fois plus gros.

De ces deux trous noirs, seul celui de M87 donna des résultats exploitables, car ceux de Sgr A* étaient brouillés par la variabilité de l'aspect du disque, fruit de celle du flux de matière sur le trou noir. Ces écarts dépendent de la masse du trou noir. Étant 1 500 fois moins massif, Sgr A* est une source qui peut varier sur des échelles de temps de quelques minutes, contre plusieurs jours au pire pour le trou noir de M87 (désormais baptisé M87*).

UN AN DE TRAITEMENT

Au bout de près d'un an de traitement, les données rendirent leur verdict : la silhouette du trou noir se découpe effectivement sur le fond lumineux du disque d'accrétion, légèrement plus brillant d'un côté que de l'autre, comme on s'y attendait, puisque la lumière émise par la partie du disque qui s'approche de nous sera plus intense que celle du côté opposé. En fait, la mesure de ce contraste renseigne sur l'inclinaison sous laquelle est vu ce disque, à savoir une vingtaine de degrés.

Alors bien sûr, puisqu'on se trouve à la limite de résolution des instruments, l'image peut paraître un peu floue pour qui a en tête les images du télescope spatial *Hubble*, mais c'est aussi ce qui fait sa beauté. Elle est belle non pas malgré le fait qu'elle soit floue, mais précisément parce qu'elle est floue, signe des efforts extraordinaires qui ont été consentis pour atteindre un objectif jugé inaccessible il y a seulement quelques décennies.

L'exploit désormais accompli, que peut-on espérer de plus dans le futur ? Tout d'abord étoffer le réseau d'observation, en ajoutant d'autres antennes comme celles du plateau de Bure, en France, et une autre au Groenland,

Les futures campagnes d'observation de M87* devraient permettre de passer de la première image... au premier film

afin d'obtenir une image moins bruitée. Des observations à des longueurs d'onde encore plus basse, en l'occurrence 0,8 millimètre, sont aussi possibles, mais sans garantie de succès, car l'atmosphère terrestre est de moins en moins transparente à mesure que l'on s'enfonce dans le domaine submillimétrique.

DE L'IMAGE AU FILM

Une autre piste concerne la dimension temporelle. Pour l'heure, la physique des disques d'accrétion n'est qu'imparfaitement connue, et si la variabilité du disque est un fait établi, nous l'avons vu, on ne sait pas encore à quelle échelle de temps elle se produit. Les campagnes d'observation futures de M87* devraient permettre d'en savoir plus et de passer de la première image... au premier film.

Enfin, sur le très long terme, on peut imaginer agrandir encore la taille du réseau, en envoyant des radiotélescopes en orbite. C'est dans ce contexte que s'ébauche l'*Event Horizon Imager*, version spatiale de l'EHT. Avec seulement trois radiotélescopes orbitant autour de la Terre à des distances différentes, les instruments bougeront naturellement les uns par rapport aux autres par le jeu de la mécanique céleste. Et l'on espère une résolution de quelques microsecondes d'arc à peine, un chiffre qui fait rêver... à condition de résoudre un nombre considérable de nouveaux problèmes, à commencer par le volume de données à rapatrier depuis l'espace. Impossible ? L'histoire des trous noirs a déjà montré que l'impossible d'un jour ne le reste pas toujours. ■

BIBLIOGRAPHIE

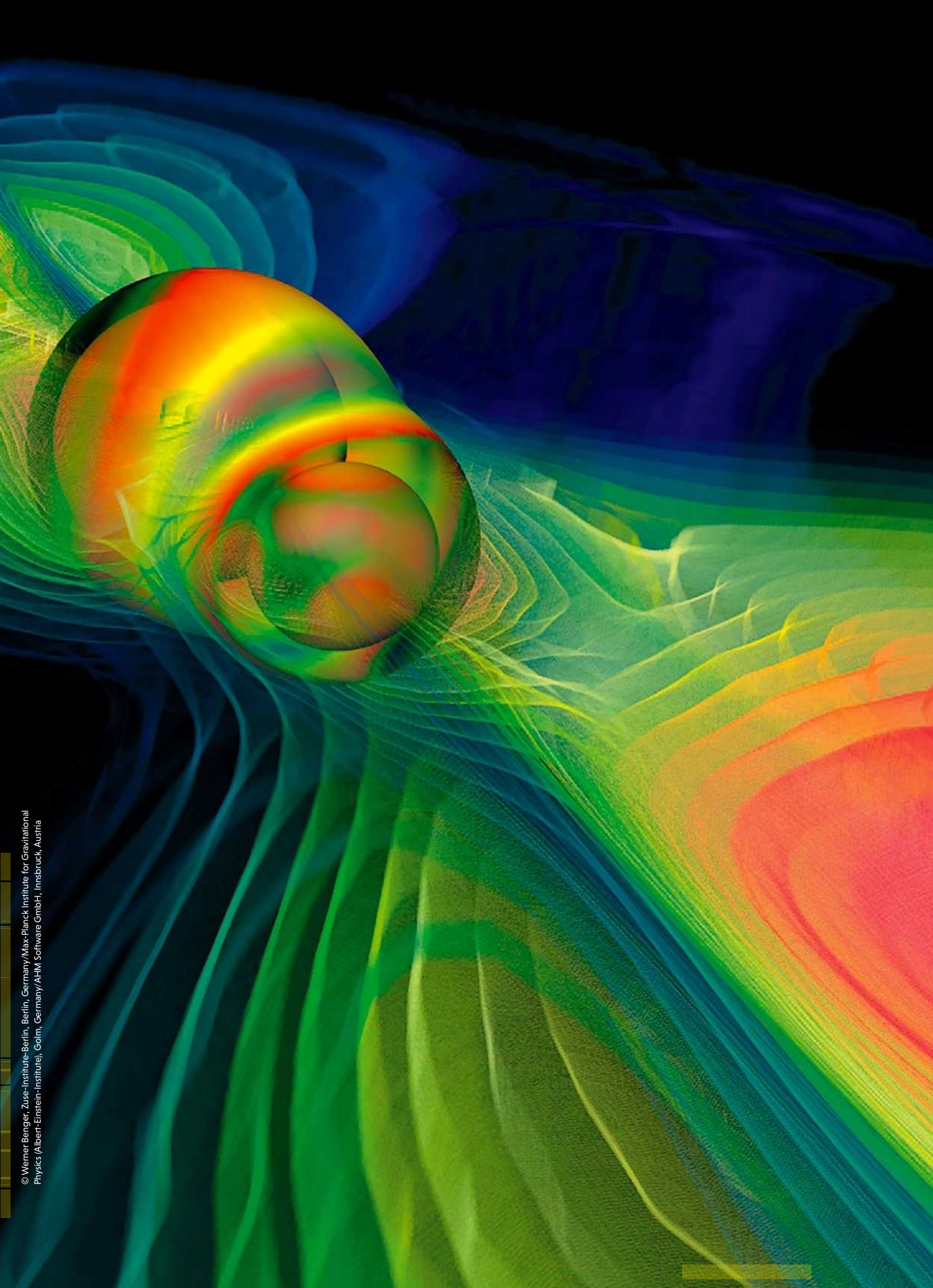
THE EHT COLLABORATION ET AL., First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole, *ApJL*, vol. 875, p. 1. 2019.

A. BRODERICK ET A. LOEB, Portrait d'un trou noir, *Pour la Science*, n° 389, mars 2010.

À l'écoute des ondes gravitationnelles

Les ondes gravitationnelles prévues par la théorie d'Einstein ont été détectées directement pour la première fois fin 2015, à l'aide de grands interféromètres de plusieurs kilomètres de long. Ces instruments tendent à nouveau l'oreille pour détecter la moindre vibration de l'espace-temps.

Les systèmes binaires comprenant deux objets compacts tels des étoiles à neutrons ou des trous noirs sont des sources intenses d'ondes gravitationnelles, en particulier au moment de la coalescence – la fusion des deux corps –, comme cela est représenté sur cette simulation numérique.



L'ESSENTIEL

● En 1916, Albert Einstein a montré que l'espace-temps peut vibrer et, ainsi, être parcouru par des ondes gravitationnelles.

● Ce phénomène n'a été que lentement accepté par les physiciens, en raison de difficultés conceptuelles.

● Dans un premier temps, des observations ont prouvé, de façon indirecte, que ces ondes existaient.

● Par la suite, des ondes émises par des paires d'objets astrophysiques compacts (étoiles à neutrons ou trous noirs) ont été détectées grâce à des interféromètres géants.

LES AUTEURS



DAMIR BUSKULIC est professeur à l'université Savoie-Mont-Blanc et au Laboratoire d'Annecy de physique des particules, et membre de la collaboration *Virgo*.



LOÏC VILLAIN est maître de conférences à l'université de Tours, chercheur en physique théorique à l'institut Denis-Poisson.

L

e son émis par un instrument de musique est riche en informations. En l'écoulant, on peut déduire la nature de l'instrument (à vent ou à cordes), sa composition (cuivre ou bois)... Toutes ces informations nous parviennent sous la forme d'une onde acoustique, une perturbation de l'air qui se propage de proche en proche et à vitesse finie. Les physiciens s'inspirent de cette idée pour sonder l'Univers. Le milieu qui transporte les ondes n'est alors plus l'air mais l'espace-temps, et les ondes ne sont plus acoustiques, mais gravitationnelles.

En effet, l'une des hypothèses fondatrices de la relativité générale est que l'espace-temps fait preuve d'élasticité. Même vide de matière, il est le siège de vibrations, les ondes gravitationnelles. Ces dernières sont elles aussi riches en informations : d'une part, sur les événements qui les ont produites et, d'autre part, sur les propriétés de l'espace-temps dans lequel elles se propagent. En septembre 2015, leur détection directe a démontré l'existence de ces ondes qui se propagent depuis les confins de l'Univers. L'aboutissement d'une longue épopée.

Albert Einstein émet l'hypothèse des ondes gravitationnelles en 1916. Cette idée rencontre d'abord un certain scepticisme chez les physiciens. Néanmoins, avant même leur détection directe en 2015, la réalité des ondes gravitationnelles ne faisait plus de doute. Elles sont une prédiction de la relativité générale, une théorie confortée par de nombreuses observations et expériences. En outre, plusieurs observations astrophysiques fournissaient des preuves indirectes de leur existence et avaient permis de contraindre certaines de leurs caractéristiques, comme leur vitesse de propagation, celle de la lumière dans le vide.

UNE IDÉE ANCIENNE

L'idée que l'effet de la gravitation se transmet à une vitesse finie n'a pas toujours été une évidence. Elle a été avancée pour la première fois dès 1773 par Pierre-Simon de Laplace, en contradiction avec les principes de la théorie dominante de l'époque, la gravitation de Newton. Il a fallu ensuite attendre plus d'un siècle pour disposer d'une théorie relativiste et cohérente de la gravitation, en accord avec les données observationnelles.

On la doit à Albert Einstein. Il a publié en 1915 les équations de la relativité générale qui étend à tous les observateurs le principe de relativité (selon lequel les lois de la physique ne dépendent pas de l'observateur), tout en offrant une description des phénomènes gravitationnels compatible avec ce principe. L'ingrédient clé de cet exploit scientifique possible n'était rien de moins qu'un renoncement radical aux idées communes sur l'espace et le temps.

De fait, Einstein a supposé que l'espace-temps n'était pas absolu, en ce sens que sa géométrie n'était pas donnée *a priori*. Il a avancé