

L'ESSENTIEL

- En 1916, Albert Einstein a montré que l'espace-temps peut vibrer et, ainsi, être parcouru par des ondes gravitationnelles.
- Dans un premier temps, des observations ont prouvé, de façon indirecte, que ces ondes existaient.
- Ce phénomène n'a été que lentement accepté par les physiciens, en raison de difficultés conceptuelles.
- 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.

Le son émis par un instrument de musique est riche en informations. En l'écoutant, 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

Einstein a cru un temps avoir prouvé que les ondes gravitationnelles n'existaient pas

Une onde gravitationnelle déforme l'espace-temps sur son passage. Elle étire et comprime l'espace dans des directions perpendiculaires à celle de sa propagation : c'est une onde transversale. Les effets de déformation sont matérialisés ici par huit petites boules initialement disposées en cercle (*plan bleu foncé*). L'onde qui arrive par la gauche sur le cercle le comprime (*plan vert*) suivant l'axe vertical. Puis le cercle retrouve sa forme initiale avant d'être comprimé selon l'axe horizontal.

qu'elle était au contraire déterminée par son contenu énergétique et que la gravitation était une manifestation de sa géométrie courbée, plutôt qu'une force comme les autres.

On illustre souvent ce principe par une figure où l'espace est représenté comme une surface déformée par une masse centrale, autour de laquelle un corps plus petit est en orbite. Dans cette interprétation du phénomène, aucune force n'agit sur le corps le plus léger : il obéit au principe d'inertie et va tout droit devant lui. L'espace étant courbe, sa trajectoire l'est aussi et il se retrouve à tourner autour de l'objet le plus massif. Cette schématisation, trompeuse par certains aspects, met néanmoins en avant le fait qu'en physique moderne, l'espace-temps n'est plus considéré comme une scène passive, où se déroulent les phénomènes, mais comme une sorte de continuum souple qui assure la relation entre les autres objets physiques.

En laissant de côté le temps pour simplifier, on peut en quelque sorte visualiser l'espace comme un milieu élastique pouvant se déformer, vibrer et donc être parcouru par des vagues (*voir la figure ci-dessous*). Dès 1916, Einstein a tenté de vérifier que les équations de sa théorie admettaient une solution représentant la propagation d'ondes. L'élégance mathématique de la relativité générale va cependant de pair avec la complexité de ses équations. L'une des caractéristiques de ces dernières est d'être non linéaires : la réponse d'un système n'est pas directement proportionnelle au stimulus appliqué.

SIX TYPES D'ONDES

Einstein s'intéressa donc pour commencer au cas simplifié où les ondes correspondaient à une petite perturbation de la géométrie initialement «plate» de l'espace-temps. Comme il l'espérait, ses calculs ont fait apparaître plusieurs types de vibrations du champ gravitationnel, qui se propageaient toutes à la vitesse de la lumière. Mais rapidement, le doute surgit quant à la réalité physique de ces solutions.

L'une des sources du scepticisme était liée à la nature duale des ondes gravitationnelles : elles sont géométriques, des vagues de l'espace (-temps), mais elles sont aussi physiques, puisqu'elles caractérisent le champ gravitationnel. Ainsi, on doit pouvoir leur associer certaines grandeurs telles une vitesse, un flux énergétique... Or, parmi les six types d'ondes obtenues par Einstein – six polarisations selon la terminologie moderne –, seuls deux correspondaient à un transfert d'énergie et se propageaient à la vitesse de la lumière. Ces ondes avaient aussi la caractéristique d'être transversales, comme les ondes électromagnétiques, c'est-à-dire qu'elles n'ont un effet que dans le plan >

