

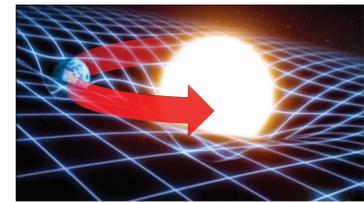
LES ONDES GRAVITATIONNELLES

QU'EST-CE QU'UNE ONDE GRAVITATIONNELLE ?

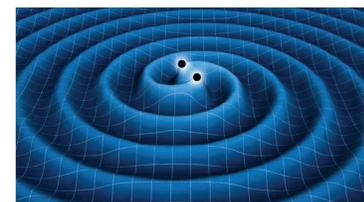
En relativité générale, théorie formulée par Einstein en 1915, la gravitation est une manifestation de la géométrie courbe de l'espace-temps. Ce dernier n'est ni absolu ni éternel, comme en physique newtonienne, mais il est au contraire dynamique et sa géométrie est sujette à des déformations.

De même qu'une pierre jetée dans un bassin induit des perturbations se propageant à la surface de l'eau sous forme de vaguelettes, les mouvements internes d'une source astrophysique produisent une onde d'espace-temps. Celle-ci, cependant, ne se déplace pas dans un milieu matériel. C'est la perturbation de la géométrie de l'espace-temps lui-même qui se propage, en emportant de l'énergie. Ces ondes, associées à la géométrie de l'espace-temps, et donc à la gravitation, sont qualifiées de « gravitationnelles ».

Les ondes gravitationnelles se manifestent physiquement par une variation des distances relatives entre les objets matériels. Soient par exemple trois points disposés en équerre (voir schéma ci-contre). En l'absence d'onde, OA et OB sont supposés de même longueur : $OA/OB = 1$. Lors du passage d'une onde gravitationnelle, le rapport OA/OB se met à osciller autour de 1. Malheureusement, les amplitudes des oscillations produites par les ondes gravitationnelles les plus intenses traversant la Terre sont extrêmement faibles. Pour OA égal à la distance Terre-Lune, elles seraient comparables à la taille d'un atome. Pour rendre leur mesure accessible, il faut prendre OA le plus grand possible.

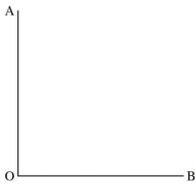


Évocation artistique de l'interprétation einsteinienne du mouvement de la Terre autour du Soleil comme dû à la courbure de l'espace-temps (source: Shutterstock)



Vue d'artiste d'une onde gravitationnelle produite par un système de deux trous noirs (source: K. Thorne & T. Cornish)

LA DÉTECTION DES ONDES GRAVITATIONNELLES



L'interféromètre VIRGO, à Cascina, près de Pise (source: ASPERA/CNRS /INOPIs)

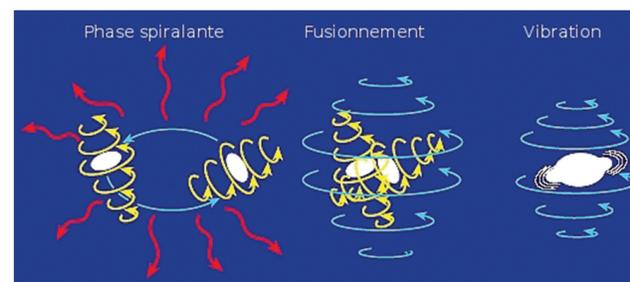
Grâce à un appareil optique très sensible aux variations de longueur, l'**interféromètre de Michelson**, on est capable de mesurer très précisément la distance relative de deux masses placées en A et B pouvant se déplacer quasiment librement. Il existe deux grands observatoires d'ondes gravitationnelles qui fonctionnent sur ce principe et pourraient permettre, après construction de leur version avancée, une première détection directe à l'horizon 2017: l'observatoire d'origine franco-italienne, **VIRGO**, et son équivalent américain, **LIGO**. En outre, un projet d'interféromètre spatial, **eLISA**, a récemment été proposé à l'Agence Spatiale Européenne. Plusieurs membres de l'IAP font partie d'un consortium français, **LISA France**, associé à cette mission. Pour VIRGO, la distance OA vaut 3km, pour eLISA, elle en vaut 1 million!

Les principales sources d'ondes gravitationnelles détectables sur Terre sont **les binaires spirales d'objets compacts**. Ces systèmes sont composés de deux étoiles à neutrons ou trous noirs qui tournent l'un autour de l'autre à grande vitesse de manière quasi-circulaire. En raison des pertes d'énergie par rayonnement gravitationnel, la distance entre les corps diminue tandis que la vitesse de rotation augmente pour atteindre 40% de celle de la lumière. Comme les forces gravitationnelles deviennent plus intenses, le rayonnement s'accroît, ce qui accélère le processus. Les deux compagnons finissent par entrer en collision et fusionner en un trou noir, qui émet lui-même des ondes de « vibration » amorties avant de se stabiliser. **La recherche menée à l'IAP porte principalement sur la phase spirale.**

Afin d'extraire correctement un signal du bruit des détecteurs, il est indispensable de connaître à l'avance sa forme avec une grande précision. Or, lorsqu'un système binaire est « visible » par les interféromètres, les forces gravitationnelles et les vitesses en jeu sont grandes. Il faut donc recourir à la relativité générale pour modéliser sa dynamique. Si seul le calcul numérique permet d'étudier la phase de fusionnement proprement dite, on peut en revanche déterminer la dynamique approchée de la phase spirale analytiquement, en s'appuyant sur le fait que vitesse relative des corps v reste faible devant celle de la lumière c . On représente le système par deux masses ponctuelles soumises aux seules forces gravitationnelles. Celles-ci sont données par leur expression newtonienne, si l'on néglige des termes proportionnels à $(v/c)^2$, que l'on peut ensuite calculer à partir de l'approximation précédente en négligeant un reste en $(v/c)^3$, et ainsi de suite. Quand on inclut les termes en $(v/c)^4$, le reste est proportionnel à $(v/c)^5$. Comme $v/c < 1$, il est d'autant plus petit que n est grand. La recherche menée à l'IAP dans ce domaine se concentre sur l'obtention des équations d'évolution et de la forme du signal gravitationnel avec une précision suffisante pour les diverses expériences de détection. Les corrections correspondant à $n = 7$, nécessaires à l'expérience VIRGO avancée, ont été en grande partie calculées, y compris certains effets de spins. La figure ci-contre représente une contribution particulière (mode quadrupolaire) à l'amplitude du signal prédit pour la phase spirale sans spins, raccordée à des modèles numériques pour les autres phases. Les résultats de l'IAP servent d'ailleurs aussi à améliorer et tester de telles simulations.

LES SOURCES

- Voici une liste d'événements astrophysiques détectables isolément par VIRGO avancé :
- fusionnement de deux étoiles à neutrons: environ 20 événements par an; une détection peut fournir des informations sur la masse, le moment propre de rotation – ou « spin » – et la composition des compagnons; elle peut aussi aider à identifier ces systèmes comme émetteurs possibles de sursauts courts de rayonnement gamma
 - fusionnement de deux trous noirs : environ 6 événements par an avec mesure de la masse et du spin des objets
 - fusionnement trou noir / étoile à neutrons : environ 16 événements par an
 - effondrement de cœur d'étoiles de masse comprise entre 8 et 40 masses solaires : environ un événement tous les 50 ans dans la galaxie; sa détection permettrait de contraindre les modèles d'explosion de supernovae
 - étoiles à neutrons asymétriques en rotation. **Une nouvelle fenêtre s'ouvre sur l'univers!**



(source: K. Thorne)

LES BINAIRES SPIRALANTES

CALCULS POST-NEWTONIENS DU SIGNAL

