

Astrophysique

À l'écoute de l'Univers violent

P.14

Le jour où
l'espace-temps
a tremblé

P.16

Tous les détecteurs
en alerte

P.19

Le graviton,
grail ultime

La communauté scientifique est en émoi. Les ondes gravitationnelles, ces déformations de l'espace-temps prédites par Albert Einstein dans sa fameuse théorie de la relativité générale, existent donc bel et bien.

Celles qui ont fait tressaillir les détecteurs américains de l'expérience Ligo, le 14 septembre 2015, résultent de la fusion de deux gigantesques trous noirs, il y a 1,3 milliard d'années. Cette découverte ouvre la porte sur une nouvelle lecture de notre Univers, à travers l'étude des indices laissés par des phénomènes cosmiques jusque-là inobservables. Une aventure à laquelle le CEA participe déjà.

par Fabrice Demarthon

Le jour où l'espace-temps a tremblé

Einstein avait prédit leur existence il y a cent ans. Les ondes gravitationnelles détectées le 14 septembre dernier par l'expérience américaine Ligo ne viennent pas seulement valider cette théorie et confirmer l'existence des trous noirs ; elles ouvrent aussi la voie à une nouvelle astronomie, pour aller plus loin dans notre compréhension de l'univers et des objets qui le peuplent.

Espace-temps

Représentation mathématique qui associe l'espace et le temps. L'espace-temps a 4 dimensions : 3 dimensions spatiales et 1 dimension temporelle.

Trou noir

Objet céleste si dense que rien – ni matière ni onde électromagnétique – ne peut échapper à son attraction.

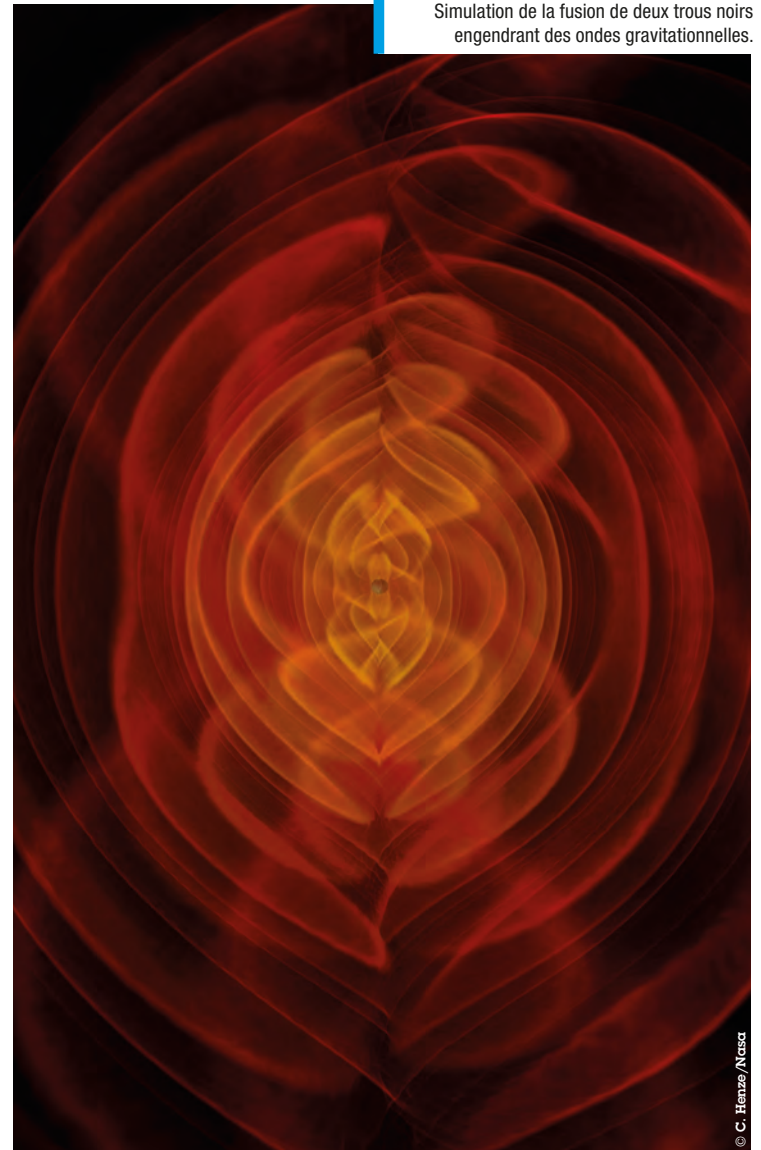
Note :

1. Source : BBC, 11 février 2016.

Le 14 septembre 2015 est à marquer d'une pierre blanche dans l'histoire de la physique et de l'astronomie. Ce jour-là, pour la première fois, les détecteurs américains Ligo frémissent au passage d'une onde gravitationnelle, une infime fluctuation de l'**espace-temps** prédite il y a un siècle par Albert Einstein. L'événement, rendu public cinq mois plus tard, secoue la communauté scientifique ; le célèbre astrophysicien Stephen Hawking n'hésitant pas à le qualifier de « révolution pour l'astronomie »¹. Au CEA, les chercheurs qui étudient les phénomènes cosmiques les plus violents et la physique dite « des hautes énergies » ne sont pas moins enthousiastes : la détection des ondes gravitationnelles ouvre d'incroyables perspectives dans leurs domaines d'investigation.

Einstein avait raison... et tort

Pourquoi un tel engouement ? Parce qu'avant tout, l'observation des ondes gravitationnelles, très attendue, est une nouvelle preuve en faveur de la théorie de la relativité générale d'Einstein ; théorie sur



Simulation de la fusion de deux trous noirs engendrant des ondes gravitationnelles.

© C. Henze / NASA

laquelle ne repose rien moins que notre compréhension de l'Univers ! « C'est une très belle confirmation de la validité de la relativité générale dans des conditions que nous n'avions encore jamais explorées », indique Pierre Vanhove, membre de l'Institut de physique théorique du CEA (IPHT/CEA). Les conditions en question, ce sont des champs de gravitation immenses : l'onde a

été produite par le mouvement d'attraction de deux **trous noirs** jusqu'à leur fusion pour n'en former qu'un. Parue en 1915, la théorie de la relativité générale décrit la gravitation comme une courbure de l'espace-temps. Ainsi, toute masse « creuse » la trame de l'espace-temps, un peu comme le fait une balle posée sur un drap tendu. Plus la masse est importante, plus la courbure s'intensifie et

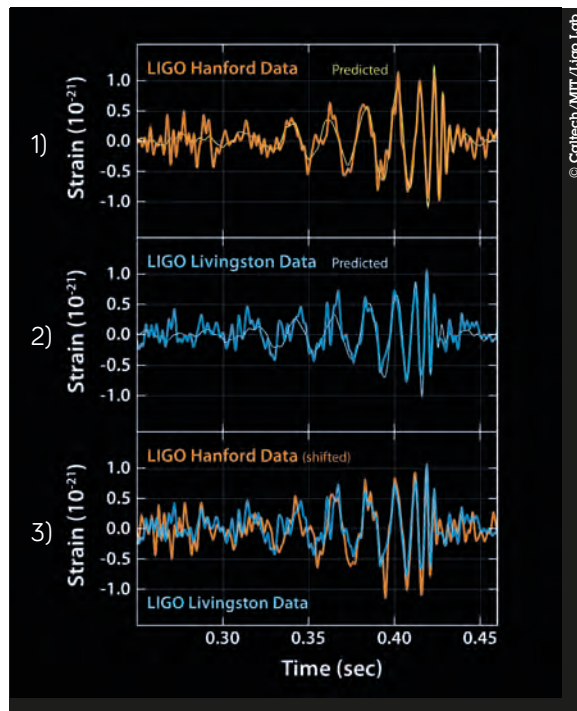
plus le « puits » de gravité est profond. De cette définition découle l'existence des trous noirs : lorsqu'une masse gigantesque est concentrée en un point, le puits de gravité est sans fond. Rien ne peut plus en sortir, pas même la lumière ! En 1916, Albert Einstein émet une autre hypothèse, conséquence de la première : lorsque des masses subissent une accélération, elles font vibrer l'espace-temps, produisant une onde comparable aux rides qui se propagent à la surface de l'eau lorsqu'une pierre la frappe. La fameuse onde gravitationnelle.

Toutefois, la déformation de l'espace-temps – qui s'avère très « rigide » – est infime : mille voire dix mille fois plus petite que la taille d'un proton (10^{-18} à 10^{-19} mètres). Des ondes gravitationnelles suffisamment intenses pour être détectées sur Terre doivent donc provenir d'événements cataclysmiques, mettant en jeu de très grandes masses subissant de fortes accélérations. Même Einstein a douté qu'il puisse être un jour possible de les observer, allant même jusqu'à réfuter leur existence quelques années après les avoir prédites ! Einstein avait donc raison et tort à la fois.

Installés aux États-Unis, les deux détecteurs de l'expérience Ligo ont réagi au passage d'une onde gravitationnelle ayant pris sa source à 1,3 milliard d'années-lumière de la Terre, quelque part au-dessus de l'hémisphère sud. Deux trous noirs, l'un d'environ 36 masses solaires, l'autre d'environ 29 masses solaires, ont fusionné dans une danse spirale. Le cataclysme, qui n'a duré que deux dixièmes de seconde, a donné naissance à un trou noir d'environ 62 masses solaires et a libéré une onde gravitationnelle d'une énergie équivalente à 3 masses solaires (selon la célèbre formule d'Einstein, $E=mc^2$). « Le signal reçu est de très bonne qualité et correspond en tout point à ce que l'on peut attendre théoriquement d'une telle collision », explique Jean-Marc Bonnet-Bidaud, astrophysicien de l'institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu/CEA).

Vers une nouvelle astronomie

La confirmation de la théorie d'Einstein n'est évidemment pas la seule conséquence de cet incroyable exploit technique. Elle est aussi la preuve de l'existence des trous noirs. « C'est la découverte dans la découverte, s'enthousiasme Jérôme Rodriguez, autre chercheur de l'Irfu/CEA. Même s'ils font partie du bestiaire cosmique depuis un moment, les trous noirs sont des objets avant tout mathématiques dont la réalité est parfois remise en question. Jusqu'à maintenant, nous n'avions que des preuves indirectes de leur existence. » Non seulement l'observation des ondes gravitationnelles démontre la réalité des trous noirs mais elle révèle aussi qu'ils peuvent former des duos, à l'instar des systèmes binaires d'étoiles. Une sacrée surprise pour ceux qui les étudient. L'événement donne enfin un coup d'accélérateur énorme à l'astronomie dite gravitationnelle, à savoir l'étude de l'univers à travers l'analyse de ce type d'ondes. Et les découvertes pourraient être nombreuses tant ces ondes peuvent voyager, quasi librement, sur des distances infinies alors que la lumière rencontre de nombreux obstacles sur son parcours². Jusqu'à maintenant, ce champ de recherche se cantonnait à la théorie,



Signaux des ondes gravitationnelles, détectés par chacun des instruments de Ligo et corrélés aux équations de la théorie générale (1 et 2) ; et leur superposition montrant que l'expérience a détecté le même événement (3).

peuplant l'univers, même si ceux-ci n'émettent pas ou très peu de lumière. » Des objets comme les trous noirs, donc, mais aussi les étoiles à neutrons, issues de l'effondrement du cœur d'étoiles massives, ou encore les cordes cosmiques,

Masse solaire

Unité de mesure de la masse des objets peuplant l'univers. Elle correspond à la masse du Soleil.

Le signal reçu est de très bonne qualité et correspond en tout point à ce que l'on peut attendre théoriquement d'une telle collision entre deux trous noirs.

Jean-Marc Bonnet-Bidaud, de l'Irfu/CEA

à la mise au point de détecteurs et à la simulation numérique. Dorénavant, il va pouvoir se déployer à partir de résultats expérimentaux. « Les ondes gravitationnelles sont porteuses d'informations précieuses sur les événements qui les ont produites, précise Pierre Vanhove. Elles peuvent donc nous renseigner sur certains objets

déformations de l'espace-temps qui formeraient des lacets dans l'univers et que les théories physiques les plus modernes pensent être capables de produire des ondes gravitationnelles. On aurait donc pu penser que l'observation de ces ondes le 14 septembre 2015 était un aboutissement. Il s'agit au contraire du début de l'aventure. ♦

Note :

2. La lumière se propage également sur des distances infinies mais est déviée par les corps célestes ce qui rend difficile la localisation de sa source.

Tous les détecteurs en alerte

Les ondes gravitationnelles décelables sur Terre résultent de phénomènes cosmiques dégageant une énergie colossale, et qui peuvent parfois s'accompagner de brefs éclairs lumineux. Les astrophysiciens espèrent les détecter à l'aide de télescopes opérant dans l'espace ou depuis le sol. Encore faut-il les braquer dans la bonne direction et au bon moment !

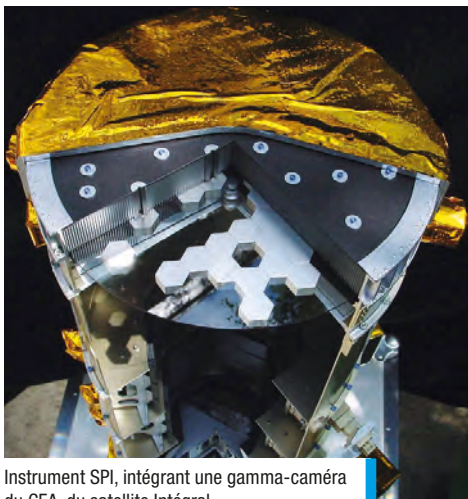
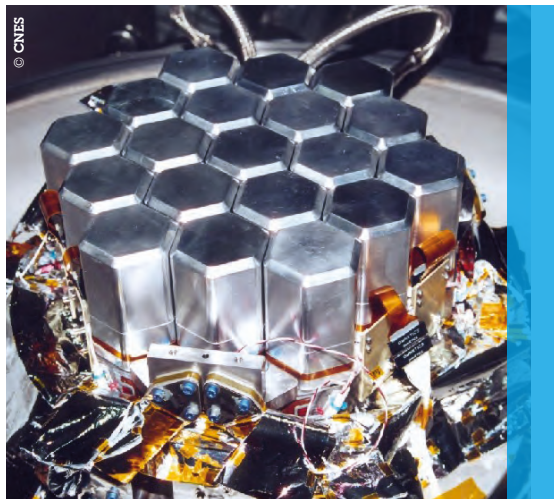
Note :
1. Virgo est l'équivalent européen de Ligo. Le détecteur est situé près de Pise, en Italie. Il était en remise à niveau lorsque Ligo a capté l'onde gravitationnelle le 14 septembre 2015.

Pour être décelées sur Terre, les ondes gravitationnelles doivent être produites par des événements cosmiques spectaculaires, tels que la fusion de deux objets compacts et massifs, trous noirs, étoiles à neutrons, explosion d'étoiles massives... Et certains de ces cataclysmes émettent aussi des quantités phénoménales de lumière, parfois comme de brefs éclairs. Cette opportunité, les astrophysiciens ne veulent pas la laisser passer. Aussi la traque des ondes gravitationnelles s'accompagne-t-elle de la recherche d'ondes électromagnétiques comme les rayons gamma, les rayons X, voire la lumière visible. Dans le jargon, on parle de « contrepartie lumineuse » et, en la matière, les chercheurs et ingénieurs du CEA font montre d'une véritable expertise.

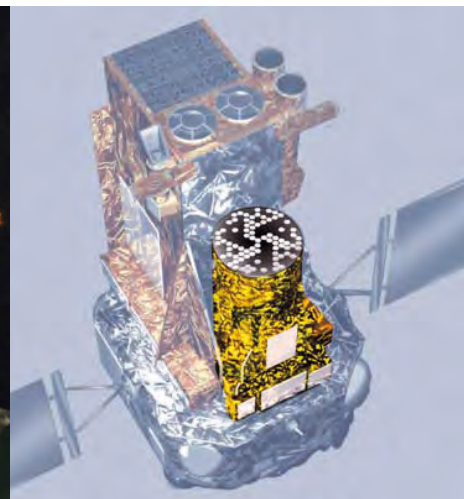
Expertise astronomique intégrale

En bonne place dans leur arsenal de détection figure le satellite Integral, destiné à l'étude des phénomènes énergétiques de l'univers et à la recherche

des sources cosmiques des éléments chimiques. Lancé en 2002 par l'Agence spatiale européenne, il s'agit de l'observatoire de rayons gamma le plus puissant jamais conçu. Les deux gamma-caméras, dont l'une réalisée par le CEA, de l'un des deux télescopes d'Integral sont encore à ce jour les plus grandes et les plus sensibles qui existent : un atout formidable pour l'observation d'une éventuelle contrepartie lumineuse aux ondes gravitationnelles. Philippe Laurent, l'un des responsables scientifiques de la mission Integral à l'Irfu/CEA, fait partie du cercle des initiés qui reçoivent les alertes de l'expérience américaine Ligo : « *Un accord a été conclu entre la collaboration Ligo/Virgo¹ et plusieurs équipes pilotant des observatoires astronomiques – satellites et télescopes au sol – afin qu'elles soient prévenues très rapidement lorsqu'une onde gravitationnelle est captée et puissent observer la portion du ciel d'où elle provient.* » Pour cette première du 14 septembre 2015, l'alerte n'a toutefois été donnée que le lendemain. Prudents, les scientifiques de Ligo ont préféré attendre d'être sûrs de ce qu'ils avaient découvert avant de



Instrument SPI, intégrant une gamma-caméra du CEA, du satellite Integral.





Satellite Integral.

© Integral

Une nouvelle fenêtre sur l'Univers le plus violent vient de s'ouvrir. Imaginez tout ce que nous pourrions apprendre lorsque nous verrons aussi la contrepartie lumineuse des ondes gravitationnelles !

Fabian Schüssler de l'Irfu/CEA



prévenir leurs confrères. Dans ce cas, le retard n'est pas si grave puisque, théoriquement, la fusion de deux trous noirs (comme captée par Ligo) qui ne sont pas environnés de matière n'est pas censée émettre de lumière.

Les responsables d'Integral ont quand même épluché les données enregistrées ce jour-là. « Nous n'avions pas une localisation suffisamment précise² pour pointer Integral vers la source de l'onde mais nous disposons d'un système qui enregistre en permanence les flux de particules provenant de n'importe où dans le ciel », indique Philippe Laurent. Cet appareil, appelé système d'anticoïncidence, est le bouclier du spectromètre SPI qui est le deuxième télescope à bord du satellite. En enregistrant toutes les particules en provenance de l'espace, l'anticoïncidence permet aux scientifiques de séparer le **bruit de fond** des signaux qui les intéressent réellement. « Comme nous pouvions nous y attendre, nous n'avons rien décelé de particulier », relate l'astrophysicien. Mais l'équipe est prête : à la prochaine alerte, Integral pourra être repositionné en quelques heures pour capter un éventuel éclair de rayons gamma associé à une onde gravitationnelle.

Des observations sur tous les continents

L'observation de ces éclairs gamma, encore appelés sursauts gamma, est l'objectif d'une autre mission en cours de préparation au CEA : SVOM³. Ce mini-satellite franco-chinois doit être lancé en 2021. À son bord, quatre instruments : un télescope dans les domaines X « durs » (les rayons X les plus énergétiques) et gamma, déclencheur de l'alerte du sursaut (ECLAIRS) ; un ensemble de détecteurs gamma fonctionnant à plus haute énergie (GRM) ; un télescope X (MXT) ; et un télescope scrutant dans le visible et le proche infra-rouge (VT). Grâce à

eux, SVOM transmettra la position du sursaut gamma en temps quasi réel via des antennes réparties à la surface du globe. L'information sera alors relayée à des télescopes robotisés au sol fonctionnant dans le visible et le proche infra-rouge. Deux d'entre eux, l'un situé en Chine, l'autre au Mexique, prendront le relais afin d'affiner la position et d'évaluer la distance du sursaut. « Le calcul des coordonnées de la source par le microprocesseur embarqué à bord du satellite pourra prendre de 10 millisecondes à 20 secondes, explique Bertrand Cordier, chercheur Irfu/CEA et responsable

scientifique de la mission côté français. SVOM sera alors automatiquement réorienté pour que ses télescopes puissent observer rapidement une éventuelle contrepartie en rayons X ou en lumière visible du sursaut gamma. »

Autant dire qu'avec sa rapidité, SVOM pourra aussi réagir aux alertes envoyées par les équipes lancées dans la chasse aux ondes gravitationnelles. L'annonce de Ligo est d'ailleurs un fabuleux coup de pouce pour la mission, qui a connu une gestation chaotique. « La détection des ondes gravitationnelles par Ligo ♦♦♦

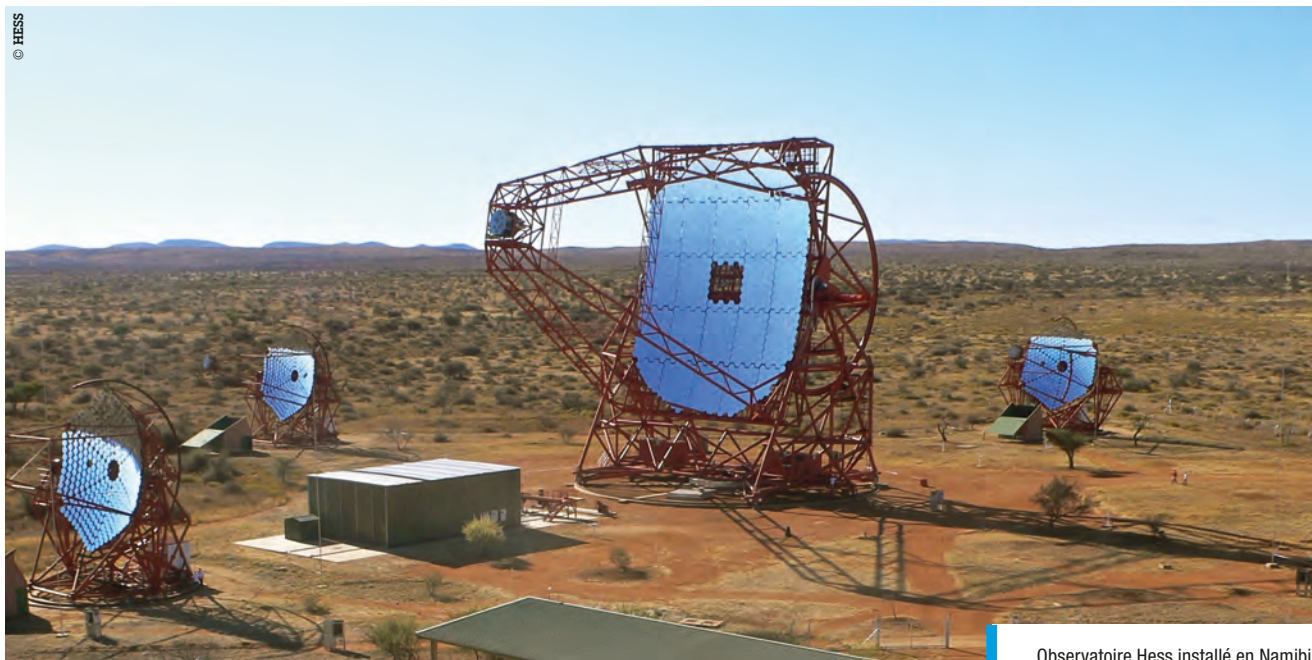
Bruit de fond

Ensemble des particules cosmiques pouvant parasiter la détection d'objets spécifiques.

Notes :

2. Plus le nombre de détecteurs répartis sur la Terre est important, plus la localisation de l'onde gravitationnelle est précise. Celle du 14 septembre 2015 n'a été repérée que par Ligo, rendant sa position difficile à évaluer.

3. Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor.



Observatoire Hess installé en Namibie.

Notes :

4. Observation des rayonnement gamma à très haute énergie pour sonder l'origine du rayonnement cosmique ou étudier les processus d'accélération, par exemple dans les noyaux actifs de galaxies.

5. Cherenkov Telescope Array (réseau de télescopes tcherenkov).

conforte nos objectifs scientifiques, indique Bertrand Cordier. *Jusqu'à présent, notre volonté d'assurer une surveillance du ciel 24 h sur 24 dans le cadre des recherches sur les ondes gravitationnelles se heurtait à des difficultés techniques et financières, ces ondes n'étant alors que pures hypothèses théoriques. Maintenant que nous les savons réelles, le système de surveillance et la chaîne d'alerte automatiques de SVOM sont encore plus légitimes.* » La détection par Ligo arrive d'ailleurs à point nommé : la conception définitive de la mission sera décidée à la fin de l'année 2016.

L'espace et le sol en alerte

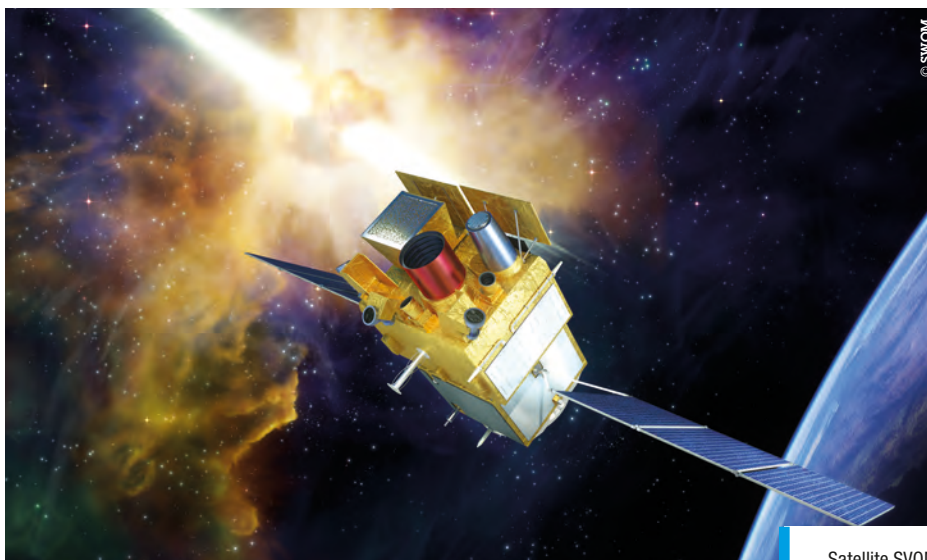
Au sol, les télescopes robotisés de SVOM ne seront pas les seuls à pointer leurs miroirs vers le ciel à la recherche de la contrepartie lumineuse des ondes gravitationnelles. D'autres instruments font partie de la traque. Le télescope Hess, par exemple. Installé en Namibie, cet ensemble de cinq télescopes est dédié lui aussi à l'étude des rayons gamma de très hautes énergies en provenance de l'espace. Or, Hess II, le télescope central, mastodonte de 28 mètres de diamètre, est capable de se positionner sur

une source en moins d'une minute ! *« Jusqu'à maintenant, la contrepartie gamma des ondes gravitationnelles n'était pas vraiment la priorité de Hess⁴,* avoue Fabian Schüssler, chercheur Irfu/CEA et membre

de la collaboration internationale qui pilote l'instrument. *Nous allons sans doute surveiller un peu plus les alertes émises par les expériences Ligo/Virgo.* » C'est surtout le successeur de Hess, CTA⁵, dont le

Maintenant que nous savons que les ondes gravitationnelles sont réelles, SVOM est encore plus légitime !

Bertrand Cordier, de l'Irfu/CEA.



Satellite SVOM.

CEA réalise plusieurs équipements (caméras, miroirs, chaîne d'analyse des données...), qui devrait participer pleinement à cette recherche. Il sera constitué de plusieurs dizaines de télescopes avec des miroirs de 4 à 23 m de diamètre, répartis sur les deux hémisphères de la planète et capables, comme Hess II, de se positionner très rapidement sur la source des ondes. « Une nouvelle fenêtre sur l'univers le plus violent vient de s'ouvrir, conclut Fabian Schüssler. Nous pouvons déjà tirer des informations très précieuses des ondes gravitationnelles elles-mêmes. Imaginez tout ce que nous pourrions apprendre lorsque nous verrons aussi leur contrepartie lumineuse ! » ♦

Le neutrino, l'autre messager

Les ondes gravitationnelles sont des rides qui se propagent dans l'espace-temps. Produites par des événements cataclysmiques, elles peuvent aussi s'accompagner d'ondes électromagnétiques, des photons gamma, X ou visibles. Une autre particule pourrait aussi leur être associée : le neutrino.

À condition, là encore, que de la matière soit impliquée (le neutrino est produit lorsque des photons frappent des particules de matière, les hadrons). Prédit en 1930, découvert en 1956, le neutrino a la particularité d'interagir très faiblement avec la matière. Autant dire que son étude n'est pas une mince affaire. L'observatoire Antarès, installé à 2500 mètres de profondeur dans la Méditerranée, au large de Toulon, est dédié à la détection de cette particule insaisissable. « Lorsque l'onde gravitationnelle a été captée, nous nous sommes aussitôt plongés dans les données enregistrées par Antarès, raconte Fabian Schüssler, qui participe également à l'expérience. Comme prévu dans le cas de la coalescence de deux trous noirs, nous n'avons pas observé de flux de neutrinos plus intense. » Il n'empêche, les observatoires de neutrinos Antarès et IceCube (pôle Sud) – et plus tard Km3Net (Méditerranée) – sont désormais aussi en alerte.

Le graviton, graal ultime

La physique quantique repose sur le principe de dualité qui associe à chaque type d'onde une particule élémentaire. La confirmation de l'existence des ondes gravitationnelles relance ainsi la quête de la particule qui leur est associée : l'insaisissable graviton.

La Terre tourne autour du Soleil, la Lune autour de la Terre et... les pommes tombent des arbres. Tous ces phénomènes ont un point commun : la loi qui les gouverne, à savoir la gravitation décrite en 1686 par Isaac Newton¹. Plus de deux siècles plus tard, Albert Einstein développa une théorie plus large de la gravitation avec la relativité générale et les modifications de l'espace-temps par les masses ; théorie qui trouve aujourd'hui une formidable confirmation avec la détection des ondes gravitationnelles.

Seulement voilà, cela ne suffit pas. Les physiciens sont toujours incapables d'accorder cette théorie de la gravitation avec les **interactions fondamentales** testées avec précision, par exemple dans les collisionneurs de particules². Aussi, afin de tenter d'unifier la gravitation avec ces autres interactions, une nouvelle particule a été inventée : le graviton. « Il est à la gravité ce que le photon est à la force électromagnétique : un vecteur de la force d'attraction », explique Pierre Vanhove de l'Ipht/CEA.

Maintenant que les ondes gravitationnelles sont devenues réalité, et selon le principe quantique de dualité « onde-corpuscule », le graviton peut-il être observé ? « C'est une nécessité : nous pouvons faire l'hypothèse mathématique de son existence et décrire les phénomènes classiques ou quantiques avec lui, mais il faut aller plus loin et lui donner un sens réel, estime Pierre Vanhove. Ça ne sera pas facile car nous pensons que sa nature quantique n'interagit pas avec la matière de la même façon que le photon peut le faire. » Mais comme le remarque le physicien, au début du XX^e siècle, personne n'imaginait pouvoir piéger et manipuler des photons uniques, ce que font maintenant les physiciens. Aujourd'hui, la détection des ondes gravitationnelles fournit déjà une limite supérieure de la masse du graviton et on espère obtenir d'autres contraintes dans le futur. Le détecteur de graviton pourrait donc voir le jour et ainsi confirmer la gravité quantique, réconciliant les théories classiques et modernes de la physique pour dessiner un tableau cohérent et complet des forces qui régissent l'Univers. ♦

Notes :

1. Dans son célèbre *Principia* dans lequel il établit les équations mathématiques de la mécanique classique.

2. Voir *L'élégante traque du boson de Higgs*, hors-série décembre 2013 *Les Défis du CEA*.

Interactions fondamentales

Interaction électromagnétique, interaction nucléaire faible et interaction nucléaire forte régissant les phénomènes physiques de l'Univers.