



www.cnrs.fr

FAQ :
30 questions sur Virgo, les ondes gravitationnelles et GW150914



1) Qu'est-ce que Virgo ?

Virgo est un instrument scientifique conçu pour détecter les ondes gravitationnelles. C'est un interféromètre de Michelson dont les deux bras perpendiculaires font trois kilomètres de long et qui a comme source lumineuse un laser infrarouge. Virgo est le plus grand détecteur de ce type en Europe et le troisième au monde. Son nom vient d'un amas d'environ 1500 galaxies, situé dans la constellation de la Vierge («Virgo» en latin), distant d'une cinquantaine de millions d'années-lumière et qui devait être à portée de la première version du détecteur. Virgo a été construit en Italie près de Pise, sur le site de l'Observatoire gravitationnel européen (EGO) ; il est principalement financé par le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) français et l'*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare* (INFN) italien. En 2006, le *National instituut voor sub-atomaire fysica* (Nikhef) néerlandais a rejoint la collaboration Virgo et contribué de manière importante à la construction du détecteur. Ont suivi en 2008 l'équipe POLGRAW de Varsovie (Pologne), puis en 2010 le KFKI Research Institute for Particle and Nuclear Physics (RMKI) de Budapest (Hongrie).

2) Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?

Une onde gravitationnelle est une infime ondulation de l'espace-temps qui se propage dans l'Univers à la vitesse de la lumière. Ces ondes sont produites par des phénomènes astrophysiques violents, comme la coalescence² d'étoiles à neutrons ou de trous noirs, ou bien l'explosion d'étoiles massives en supernovæ. Les ondes gravitationnelles sont une des conséquences de la théorie de la relativité générale, publiée par Albert Einstein en 1915, il y a un siècle. Néanmoins, ce n'est que dans les dernières décennies que les progrès technologiques ont permis de concevoir des instruments comme Virgo, suffisamment sensibles pour détecter directement les ondes gravitationnelles sur Terre.

3) A-t-on des preuves de l'existence des ondes gravitationnelles ?

Il existe des preuves indirectes de leur existence. La principale est basée sur PSR B1913+16, un pulsar en orbite autour d'un autre astre compact. Un pulsar est une étoile à neutrons qui émet un rayonnement électromagnétique intense dans une direction donnée. Comme le pulsar est en rotation rapide, ce jet balaie un cône dans l'espace. Si la Terre est sur son trajet, le pulsar est détecté sous forme de flashes périodiques, un peu comme un phare. Le suivi, sur trois décennies, des signaux émis par PSR B1913+16 a montré que le rayon de l'orbite du pulsar diminue et que son mouvement s'accélère. Cette évolution est lente mais les mesures précises sont en très bon accord avec les prédictions de la relativité générale : ce système binaire perd peu à peu son énergie en émettant des ondes gravitationnelles.

4) Les ondes gravitationnelles sont-elles différentes des ondes électromagnétiques³, comme celles qui constituent la lumière ?

Oui, ces deux types d'ondes sont de natures complètement différentes bien que les « mécanismes » à l'origine de leurs émissions soient similaires. Les ondes gravitationnelles sont des ondulations de l'espace-temps produites par des masses accélérées, alors que les ondes électromagnétiques sont des perturbations du champ électromagnétique créées par des charges électriques accélérées – par exemple lorsque du courant électrique circule dans une antenne. En plus de leurs origines bien distinctes, ces deux types d'ondes agissent sur des quantités

² En physique, le mot "coalescence" désigne un processus au cours duquel deux objets identiques (par exemple des gouttes d'eau) fusionnent pour n'en former qu'un seul. Lorsque deux astres (étoiles à neutrons ou trous noirs) orbitent l'un autour de l'autre, ils perdent de l'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles et se rapprochent. Ce phénomène, très long et progressif, s'amplifie dans les derniers instants qui précèdent la coalescence, c'est-à-dire la fusion des deux astres.

³ Les ondes électromagnétiques sont utilisées pour décrire l'ensemble du rayonnement électromagnétique : ondes radio, micro-ondes, infrarouge, lumière visible, ultraviolet, rayons X et rayons gamma. Ce sont des oscillations des champs électrique et magnétique qui se propagent à la vitesse de la lumière.



www.cnrs.fr

physiques différentes : les ondes gravitationnelles sur la géométrie de l'espace-temps, les ondes électromagnétiques sur les charges électriques. De plus, la gravitation est une force bien plus faible que l'électromagnétisme : on s'attend à ce que l'effet du passage d'une onde gravitationnelle sur Terre soit extrêmement faible, ce qui explique pourquoi des instruments spéciaux, aussi complexes que Virgo, sont nécessaires pour le détecter.

5) Quelles sont les sources potentielles d'ondes gravitationnelles ?

Aucune source d'origine terrestre (naturelle comme anthropique) ne peut produire d'ondes gravitationnelles suffisamment fortes pour être détectées par Virgo. Par contre, de nombreux phénomènes violents dans l'Univers pourraient générer de telles ondes. Par exemple, la théorie prédit que des ondes gravitationnelles détectables pourraient être brièvement émises à la fin de la coalescence de deux astres compacts (comme des étoiles à neutrons ou des trous noirs), ou encore lors d'une explosion de supernova. De plus, des étoiles à neutrons asymétriques et en rotation émettraient en continu des ondes gravitationnelles périodiques. Il devrait également y avoir un fond stochastique⁴ d'ondes gravitationnelles, issu de la superposition d'un grand nombre de sources faibles (trop éloignées pour être détectées individuellement), auquel pourrait s'ajouter un signal produit peu de temps après le Big-bang. Et aussi, peut-être, des objets astrophysiques encore inconnus.

6) Pourquoi les scientifiques cherchent-ils les ondes gravitationnelles ?

Détecter les ondes gravitationnelles ouvrira une nouvelle fenêtre sur le cosmos. Les ondes gravitationnelles sont des « messagers » complémentaires des observations astronomiques traditionnelles, basées sur l'ensemble du spectre électromagnétique (la lumière visible, l'infrarouge, les ondes radios, les rayons X et gamma), les rayons cosmiques ou les neutrinos. De plus, la détection directe des ondes gravitationnelles fournira un test puissant de la théorie de la relativité générale d'Einstein. Celle-ci explique la gravitation au moyen de la courbure de l'espace-temps mais elle n'a jusqu'à présent été testée que dans des cas où la gravitation est faible, comme dans le Système solaire. Les ondes gravitationnelles sont un moyen unique de tester la gravitation dans des conditions extrêmes, par exemple lors de la coalescence de deux astres compacts comme des étoiles à neutrons ou des trous noirs. Détecter puis étudier les ondes gravitationnelles seront des étapes majeures pour comprendre la nature de la gravitation.

7) Comment fonctionne Virgo ?

Selon la relativité générale, le passage d'une onde gravitationnelle induit une déformation extrêmement ténue de la structure de l'espace-temps. Pour détecter cette perturbation, Virgo mesure en permanence les interférences entre deux faisceaux laser (issus d'une source commune et séparés à l'aide d'une lame séparatrice) qui se propagent dans des directions perpendiculaires. En effet, une onde gravitationnelle modifie de manière différente les trajets suivis par la lumière dans les deux bras du détecteur, ce qui se traduit par un changement au niveau du signal d'interférence enregistré en sortie. Cette configuration optique, appelée « interféromètre de Michelson » (inventée au XIX^e siècle pour mesurer d'éventuelles variations de la vitesse de la lumière selon sa direction de propagation), permet de mettre en évidence des déformations spatiales infimes, comme celles produites par des ondes gravitationnelles. En fait, l'effet d'une onde gravitationnelle est si faible qu'il peut être masqué par de nombreuses sources de signaux parasites, appelés de manière générique « bruits ». Pour atteindre son objectif, Virgo doit donc réduire autant que possible tous ces différents bruits.

⁴ L'adjectif "stochastique" est utilisé pour qualifier des phénomènes dont l'évolution au cours du temps n'est pas prédictible. Dans l'exemple développé ici d'un fond stochastique d'ondes gravitationnelles d'origine astrophysique, on ne sait pas combien de sources distinctes y contribuent à un instant donné mais on peut décrire leurs caractéristiques (nombre moyen de sources, intensité du rayonnement) de manière statistique et tester la possibilité de détecter un tel signal après un temps d'observation très long.



www.cnrs.fr

8) Quelles sont les principales sources de bruit pour Virgo ?

Ces bruits ont des origines très diverses et peuvent générer des signaux parasites dans la bande de fréquence à laquelle Virgo est sensible (de 10 Hz environ à 10 kHz). Un premier exemple de perturbation est le bruit sismique, aux causes multiples : vagues sur le rivage, activités humaines, microséismes autour de Virgo, etc. D'autres bruits ont une origine plus fondamentale, comme le bruit thermique, induit par les vibrations aléatoires de la surface des miroirs, ou le bruit de grenaille des photons, dû à la nature quantique de la lumière du laser. Pour être sensible au passage des ondes gravitationnelles, il faut réduire tous ces bruits : c'est tout l'enjeu de la conception du détecteur Virgo.

9) Qu'est-ce que le détecteur Advanced Virgo ?

Le détecteur Advanced Virgo (« Virgo Avancé ») est une mise à jour majeure du détecteur Virgo initial. En 2011, à la fin de la prise de données, tous les principaux composants de Virgo ont été démontés puis peu à peu remplacés par d'autres, améliorés, pour assembler le détecteur Advanced Virgo. Ce nouvel instrument permettra d'améliorer la sensibilité de Virgo d'un facteur dix, d'observer donc dix fois plus loin et d'explorer ainsi un volume d'Univers mille fois plus important que le détecteur Virgo initial.

10) Quelle sera la sensibilité du détecteur Advanced Virgo ?

Le détecteur Advanced Virgo sera sensible à des variations de longueur de l'ordre du milliardième de milliardième de mètre, soit environ un millième du diamètre d'un proton ! A comparer à la longueur des bras de l'interféromètre : 3 km. Advanced Virgo pourra détecter les signaux émis lors de la coalescence d'un système de deux étoiles à neutrons jusqu'à une distance d'environ quatre cent millions d'années-lumière, et bien plus loin dans le cas où le système binaire inclut au moins un trou noir. Advanced Virgo sera sensible aux ondes gravitationnelles dans une gamme de fréquences très large, comprise entre 10 Hz environ et 10 kHz.

11) Quelles technologies rendent Advanced Virgo aussi sensible ?

Ces technologies sont très variées et font appel à de nombreux domaines de l'ingénierie ; c'est pourquoi seules les principales sont mentionnées ici. Les miroirs d'Advanced Virgo sont plus lourds (42 kg) que ceux de Virgo, ce qui les rend moins sensibles aux légères fluctuations de la puissance du laser (activement stabilisé par ailleurs). La taille du faisceau est plus grande, pour moyenniser au mieux les fluctuations de position des surfaces des miroirs – le bruit thermique. Les miroirs ont également un revêtement spécial qui minimise les pertes de puissance à chaque réflexion et permet ainsi aux faisceaux laser de faire de nombreux allers-retours dans l'interféromètre. Au final, la puissance stockée dans les bras du détecteur devrait atteindre environ 500 kW, pour une puissance laser en entrée de 200 W. Cela permettra de réduire le bruit de grenaille des photons du laser, dominant à haute fréquence. Les miroirs sont toujours suspendus aux « super-atténuateurs », un système capable de réduire les vibrations du sol d'un facteur 10 000 milliards à partir de 10 Hz. De plus, l'ensemble de l'instrumentation utilisée pour suivre en temps réel l'état de l'interféromètre (photodiodes et caméras) est également isolé du bruit sismique et placé sous vide. Un vide très poussé (pression résiduelle inférieure au millionième de millionième d'atmosphère⁵) règne dans l'interféromètre afin d'éviter au maximum les interactions entre les faisceaux laser et les molécules d'air. Le maintenir nécessite entre autres l'emploi de « pompes cryogéniques », faites de tubes refroidis à l'azote liquide et situées aux extrémités des deux bras kilométriques.

12) Y a-t-il d'autres instruments comme Virgo ?

Un réseau « d'interféromètres gravitationnels » comme Virgo est en train de se mettre en place. En effet, utiliser les mesures de plusieurs détecteurs est un élément clef pour rejeter les signaux parasites dus aux bruits et pour localiser la position de la source d'ondes gravitationnelles dans le ciel. Ce réseau comprend notamment les deux

⁵ Une atmosphère est la valeur de la pression atmosphérique au niveau de la mer.



interféromètres LIGO (*Laser Interferometer Gravitational Observatory*) construits aux Etats-Unis (à Hanford dans l'état de Washington et à Livingston en Louisiane) et dont les bras font 4 km de long. Il inclut également le détecteur GEO-600 aux bras de 600 m, installé près de Hanovre en Allemagne. Un cinquième interféromètre, KAGRA, est en construction au Japon sous une montagne, dans la mine de Kamioka : il sera terminé vers 2018. A plus long terme, la collaboration LIGO souhaite installer un troisième interféromètre de 4 km en Inde : c'est le projet LIGO-India.

13) Virgo est-il un télescope observant l'Univers ?

En un sens Virgo est un télescope, puisqu'il cherche des phénomènes qui se déroulent loin dans le cosmos. Mais son apparence et son principe de fonctionnement sont complètement différents de ceux d'un télescope traditionnel. En effet, Virgo n'utilise pas ses miroirs et ses lentilles de la même façon qu'un télescope optique. Le détecteur est composé de deux bras perpendiculaires de 3 km de long qui servent à mesurer les déformations infimes de l'espace-temps générées par le passage d'une onde gravitationnelle. De plus, ni Virgo ni les autres interféromètres gravitationnels (en particulier les deux détecteurs LIGO situés aux Etats-Unis) ne peuvent être pointés dans une direction particulière : à chaque instant ils observent une grande partie du ciel. C'est pour cette raison qu'il est crucial d'avoir plusieurs interféromètres en fonctionnement simultané, afin de localiser la source des ondes gravitationnelles à partir des différences entre les temps d'arrivée et les formes des signaux mesurés dans les instruments. Le vrai télescope est en fait le réseau global composé des détecteurs indépendants Virgo et LIGO. C'est pourquoi les scientifiques de LIGO et de Virgo se sont associés : depuis la première période de prise de données de Virgo en 2007, ils partagent leurs connaissances techniques sur les instruments et exploitent en commun les données scientifiques produites.

14) Peut-on identifier les sources des ondes gravitationnelles provenant de l'Univers ?

Les informations fournies par le réseau des instruments LIGO et Virgo ne fourniront qu'une localisation approximative pour une source d'ondes gravitationnelles : la zone sélectionnée dans le ciel sera bien plus grande que celle occupée par la pleine lune. Des accords ont été passés avec des télescopes optiques qui observent différentes gammes de longueurs d'onde électromagnétiques, ainsi qu'avec des détecteurs de neutrinos. Lorsqu'un candidat « onde gravitationnelle » potentiel est identifié, ces observatoires sont prévenus et explorent la zone où pourrait se trouver sa source. L'observation simultanée d'ondes gravitationnelles et d'autres signaux émis par la même source permettrait d'améliorer sa localisation dans le ciel et d'identifier sa nature ; elle fournirait aussi des informations sur les mécanismes astrophysiques qui produisent de tels signaux.

15) Qu'est-ce que la collaboration Virgo ?

La collaboration Virgo est une équipe internationale de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens qui travaillent ensemble pour construire, mettre en service, exploiter et améliorer le détecteur Virgo, dans le but de permettre la détection puis l'étude des ondes gravitationnelles. Actuellement, plus de 300 personnes sont membres de la collaboration Virgo. Elles viennent de nombreux laboratoires issus de cinq pays européens : la France, l'Italie, les Pays-Bas, la Pologne et la Hongrie. L'expérience Virgo est principalement financée par le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) français et l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) italien. Le National Institute for Subatomic Physics (Nikhef) néerlandais a rejoint la collaboration en 2006 et a contribué au financement d'Advanced Virgo. Plus récemment, en 2008 et en 2010, le groupe POLGRAW de Varsovie (Pologne) et le KFKI Research Institute for Particle and Nuclear Physics (RMKI – Budapest, Hongrie) sont devenus membres de Virgo.



www.cnrs.fr

16) Qu'est-ce qu'EGO ?

L'Observatoire européen pour la gravitation (*European Gravitational Observatory*, EGO) est un consortium franco-italien créé par un accord entre le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Ces deux agences financent à parts égales le fonctionnement de ce consortium depuis sa fondation en décembre 2000. En 2009, EGO a accueilli le National Institute for Subatomic Physics (Nikhef) comme observateur au sein de son conseil. Le site d'EGO, situé près de la ville de Cascina dans la province de Pise, comprend le détecteur Virgo et les bâtiments associés. Les missions principales d'EGO sont de mener à bien la construction d'Advanced Virgo, de garantir son fonctionnement, sa maintenance et ses améliorations, ainsi que l'exploitation de ses données scientifiques. EGO fait partie de la collaboration Virgo à laquelle il apporte son support technique tout en étant responsable du site de l'interféromètre. Enfin, EGO promeut l'étude de la gravitation en Europe.

17) Quel est le montant de l'investissement consenti pour Virgo ?

Les investissements pour Virgo sont de l'ordre de 10 à 15 millions d'euros par an, sur une période d'environ 20 ans. Ce montant comprend la construction des infrastructures, les améliorations apportées à l'instrument ainsi que les salaires des chercheurs, ingénieurs et techniciens qui travaillent sur le projet. Ces investissements ont principalement été pris en charge par la France et l'Italie, avec plus récemment des contributions en matériel et en personnel des Pays-Bas.

18) Quels sont les principaux résultats de Virgo pour le moment ?

Le détecteur Virgo initial a atteint sa sensibilité nominale⁶ en 2010, ce qui a validé les choix technologiques et les développements de pointe faits pour construire cet instrument. Les périodes de prises de données communes avec LIGO entre 2007 et 2010 ont permis d'obtenir des contraintes sur les taux des événements astrophysiques recherchés. La prise de données finale de 2011 a exploré la gamme des basses fréquences pour chercher des signaux émis par des étoiles à neutrons en rotation. Cette étude a été permise par la mise en place anticipée d'une technologie développée pour Advanced Virgo, les « suspensions monolithiques » : une nouvelle manière de suspendre les miroirs, à l'aide de fibres de verre soudées remplaçant les fils métalliques originaux. Ce progrès a ouvert la voie vers Advanced Virgo.

19) Quand Advanced Virgo commencera-t-il à observer le cosmos ?

La construction du détecteur Advanced Virgo se terminera en 2016. Ensuite, une phase de test et de démarrage de l'instrument sera nécessaire, avant de commencer une première période d'observation, commune avec les détecteurs LIGO et qui durera six mois environ. D'autres périodes de prise de données suivront, entrecoupées de phases d'arrêt pendant lesquelles les différents détecteurs seront optimisés afin d'améliorer encore leurs sensibilités. Ces nouvelles données seront analysées en commun par les membres des collaborations LIGO et Virgo, tout comme celles enregistrées précédemment par les détecteurs initiaux à partir de 2007.

20) Puis-je visiter le site de l'expérience Virgo ?

Bien sûr : vous êtes le bienvenu ! Une visite est guidée par des scientifiques ; elle commence par une présentation d'introduction et se poursuit par la visite de certaines parties de l'instrument. Les créneaux de visite sont réservés en priorité aux écoles, lycées, établissements d'enseignement supérieur et aux journalistes. Les associations, groupes, et plus généralement toute personne intéressée par la découverte de l'interféromètre sont également invités à venir nous voir, notamment lors des journées « portes ouvertes » organisées chaque année. Vous pouvez également

⁶ La "sensibilité nominale" était l'objectif (en matière de performance) défini pour le détecteur Virgo lors de sa conception. Atteindre cette sensibilité a marqué à la fois l'aboutissement du travail sur l'instrument de première génération et le coup d'envoi de la phase d'amélioration du détecteur – Advanced Virgo.



visiter « virtuellement » Virgo en visionnant les nombreuses vidéos en ligne dans la galerie multimédia de notre site internet. Les visites publiques ont en général lieu le samedi et peuvent être réservées auprès du secrétariat scientifique d'EGO (voir <http://public.virgo-gw.eu/visiter-virgo> pour plus d'informations).

21) Que sait-on de la source astrophysique à l'origine du signal détecté le 14 septembre ?

Le signal a été émis lors des derniers instants de l'évolution d'un couple de trous noirs liés par l'attraction gravitationnelle. Les deux trous noirs pesaient chacun environ de 30 fois notre Soleil et ont fusionné pour former un trou noir plus lourd, tournant sur lui-même. Juste avant de fusionner, les trous noirs tournaient l'un autour de l'autre 75 fois par seconde, à une vitesse approchant la moitié de la vitesse de la lumière. Les perturbations de l'espace-temps engendrées par ce phénoménal tourbillon se sont propagées pendant plus d'un milliard d'années avant de traverser la Terre et d'être captées par les détecteurs LIGO le 14 septembre.

22) Quelles sont les implications de la détection pour l'astrophysique ?

Cette première détection représente l'avènement d'une nouvelle discipline scientifique, l'astronomie des ondes gravitationnelles, ouvrant la possibilité d'observer des phénomènes astrophysiques avec un nouvel outil complémentaire de l'astronomie traditionnelle, pour un "spectacle son et lumière" de l'Univers. (Les ondes gravitationnelles ne sont pas des ondes sonores, l'analogie tient à ce que la gamme de fréquence des signaux accessibles aux détecteurs interférométriques terrestres comme Virgo et LIGO est la même que celle des sons accessibles à l'oreille humaine – la fréquence définissant la hauteur du son, du grave à l'aigu.) Plus spécifiquement, cette première détection démontre qu'à la fin de leur vie des étoiles massives peuvent former des trous noirs très lourds (environ 30 fois plus lourds que notre Soleil) et que ces trous noirs peuvent se trouver sous la forme de couples qui évoluent jusqu'à la fusion en un temps relativement court (à l'échelle de l'âge de l'Univers) : des informations précieuses pour mieux comprendre l'évolution des étoiles.

23) Quelles sont les implications de la détection pour la physique fondamentale ?

Cette détection représente la première observation directe de trous noirs, via leur rayonnement gravitationnel. Elle permet de tester la relativité générale de manière inédite, dans des circonstances extrêmes : celles d'astres lourds et compacts évoluant à des vitesses significatives par rapport à la vitesse de la lumière. La confrontation du signal observé le 14 septembre aux prédictions théoriques montre un bon accord avec celles-ci. La détection de futurs événements similaires permettra d'affiner ces mesures pour pousser la théorie dans ses retranchements. L'enjeu est de taille dans la mesure où la gravitation se trouve au cœur des énigmes les plus fascinantes de l'Univers aujourd'hui, la matière sombre et l'énergie sombre.

24) Les scientifiques de LIGO et Virgo sont-ils sûrs de cette découverte ?

Oui ! Leur certitude repose sur deux piliers : d'une part les détecteurs LIGO fonctionnaient parfaitement au moment du passage de l'onde gravitationnelle, et la "météo" autour des détecteurs était calme (météo au sens habituel mais également au sens sismique, magnétique...). D'autre part le signal détecté est un cas d'école : il est très clair et correspond à ce qui est prédit pour la fusion de deux trous noirs. Sa détection simultanée dans deux détecteurs indépendants ne laisse aucune place au doute.

25) Comment les scientifiques de LIGO et Virgo ont-ils réagi à cette découverte ?

L'incrédulité des premiers instants a rapidement laissé la place à l'émerveillement de voir cette longue quête enfin aboutir, un accomplissement qui est le fruit d'un cadeau de la nature et de décennies de travail. Et surtout, les scientifiques des collaborations Virgo et LIGO ont beaucoup travaillé pendant cinq mois, pour vérifier les résultats dans les moindres détails et préparer la publication scientifique annonçant la découverte, ainsi que la dizaine d'articles complémentaires qui l'accompagne.

26) Qu'est-ce qu'un trou noir ?

Un trou noir est un astre si compact que rien hormis les ondes gravitationnelles ne peut s'en échapper : la matière comme la lumière y sont prisonnières de l'attraction gravitationnelle. Celle-ci est si forte que les trous noirs sont des



www.cnrs.fr

objets singuliers, qui ne sont pas constitués de matière ordinaire. Prédits par la relativité générale, ils n'avaient été observés qu'indirectement jusqu'à présent, à travers les effets qu'ils produisent sur la matière ou la lumière dans leur environnement. L'événement du 14 septembre met en scène trois trous noirs : les deux trous noirs d'origine, vestiges de deux étoiles massives liées par l'attraction gravitationnelle, et le trou noir final résultant de la fusion des deux premiers.

27) Comment sait-on que des trous noirs sont à l'origine du signal détecté ?

Le signal détecté porte beaucoup d'informations sur la source émettrice : l'évolution de sa fréquence et de son amplitude au cours du temps est très caractéristique (comme un son qui devient plus fort et plus aigu) et permet d'estimer les masses des astres impliqués. Celles-ci sont de l'ordre de 30 fois la masse de notre Soleil. De plus, juste avant la fusion, les deux astres tournent l'un autour de l'autre 75 fois par seconde et doivent donc être très proches l'un de l'autre (quelques centaines de kilomètres) sans se toucher. Les seuls objets connus qui soient suffisamment compacts pour entrer en contact aussi tardivement sont les trous noirs.

28) S'attendait-on à ce qu'une telle source – la fusion de deux trous noirs – soit à l'origine de la première détection ?

On s'attendait à ce que la fusion d'astres compacts, étoiles à neutrons ou trous noirs, donne lieu aux premières observations d'ondes gravitationnelles. Mais les prédictions n'étaient pas assez précises pour pronostiquer qui des fusions d'étoiles à neutrons ou de trous noirs seraient les plus fréquemment observées. En particulier, il n'était pas certain que les étoiles puissent former des trous noirs aussi massifs à la fin de leur vie. C'est cette possibilité qui a permis à une fusion de trous noirs de l'emporter : plus les trous noirs sont lourds et plus leur fusion est visible à grande distance, ce qui augmente la probabilité d'observer un tel signal.

29) Comment la source est-elle localisée ?

En comparant les propriétés, notamment le temps d'arrivée, du signal reçu dans au moins deux détecteurs distants, on peut estimer d'où provenait l'onde gravitationnelle (un peu comme notre cerveau, en comparant le son entendu par nos deux oreilles, est capable d'en localiser approximativement l'origine). Avec deux détecteurs cette estimation est grossière ; le renfort de Virgo permettra de gagner en précision pour la localisation des sources, qui s'affinera davantage à mesure que le réseau de détecteurs continuera à s'étoffer.

30) Est-il normal qu'aucun signal lumineux n'ait été observé en lien avec ce signal d'onde gravitationnelle ?

Oui. Les signaux lumineux qui témoignent de nombreux phénomènes violents dans l'Univers sont le fait de la matière plongée dans des circonstances hors du commun (radioactivité, accélérations gigantesques, collisions, explosions...) Les trous noirs n'étant pas constitués de matière ordinaire, aucun signal lumineux n'est attendu lors de leur fusion. Par ailleurs, la zone du ciel susceptible de contenir la source de ces ondes gravitationnelles est vaste et n'a pas été explorée entièrement, de sorte qu'on ne peut pas conclure à l'absence de signal lumineux – pas plus qu'on ne pourrait conclure qu'un signal lumineux détecté dans cette zone serait nécessairement lié à la source d'ondes gravitationnelles.