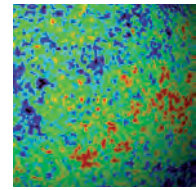


Virgo et la quête des ondes gravitationnelles



Prédites théoriquement il y a cent ans dans le cadre de la Relativité Générale, les ondes gravitationnelles sont traquées depuis cinquante ans par les expérimentateurs. Ces infimes variations de la métrique de l'espace-temps sont produites par des événements astrophysiques cataclysmiques : effondrement d'étoile, formation de trou noir ou coalescence d'objets compacts. Ces ondes peuvent être directement détectées en utilisant un interféromètre de Michelson extrêmement sensible tels que LIGO et Virgo. Après 15 années de construction et de mise au point, ces détecteurs kilométriques ont atteint leur sensibilité nominale et délivré leurs premiers résultats astrophysiques. Les équipes impliquées mettent en œuvre la nouvelle génération, dix fois plus sensible, qui sera opérationnelle à l'horizon 2015 et qui devrait marquer le début de l'astronomie gravitationnelle.

Les ondes gravitationnelles

E instein « découvre » les ondes gravitationnelles dès 1916 en recherchant une solution aux équations de la Relativité Générale qu'il vient de publier. Pour ce faire, il linéarise ces équations en posant que la métrique de l'espace-temps est somme de celle de l'espace-temps vide (l'espace-temps de la Relativité Restreinte) et d'une petite perturbation. Cette petite perturbation de la métrique de l'espace-temps obéit alors à une équation de propagation tout à fait similaire à celle des ondes électromagnétiques dans le vide. Les ondes gravitationnelles sont nées. Dans le cadre de la Relativité Générale, une onde gravitationnelle est ainsi une perturbation de la métrique, c'est-à-dire un champ tensoriel de masse nulle qui se propage. Les propriétés fondamentales en découlent : la célérité de l'onde gravitationnelle est c et son hélicité est 2, montrant qu'il y a en général deux polarisations indépendantes. L'amplitude généralement notée h d'une onde gravitationnelle est une quantité sans dimension liée aux composantes du tenseur métrique associé. L'interprétation physique est indiquée plus bas. Enfin, on montre que le rayonnement gravitationnel est quadrupolaire à l'ordre le plus bas, alors que le rayonnement électromagnétique est dipolaire. Tout



Figure 1 – Vue aérienne du site de l'interféromètre Virgo à Cascina près de Pise.
© Virgo collaboration and EGO

objet possédant un moment quadrupolaire variable est donc une source potentielle d'ondes gravitationnelles. Malheureusement les ordres de grandeur sont désastreux, par exemple pour des sources au laboratoire, et empêchent toute réalisation d'une expérience de Hertz dans le domaine du rayonnement gravitationnel (voir *encadré 1*). En fait, seules des sources compactes (de dimensions comparables à leur rayon de Schwarzschild¹) et/ou relativistes (animées de vitesses caractéristiques proches de c)

1. Rayon d'un trou noir qui aurait la même masse que l'objet considéré.

Article proposé par :

Fabien Cavalier, cavalier@lal.in2p3.fr

Patrice Hello, hello@lal.in2p3.fr

Nicolas Leroy, leroy@lal.in2p3.fr

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, UMR 8607, CNRS / Univ. Paris-Sud 11, Orsay



Encadré 1

Puissances émises par différentes sources

Source	Distance	Amplitude h	P (W)
Cylindre d'acier, 500 tonnes, $\varnothing = 2$ m, $L = 20$ m, tournant à 5 tour/s perpendiculairement à l'axe du cylindre	1 m	2×10^{-34}	10^{-29}
Bombe H, 1 megatonne Asymétrie 10 %	10 km	2×10^{-39}	10^{-11}
Supernova de 10 masses solaires asymétrie 3 %	10 Mpc	10^{-21}	10^{44}
Coalescence de 2 trous noirs de 10 masses solaires chacun	10 Mpc	10^{-20}	10^{50}

sont susceptibles de rayonner une puissance dans le domaine gravitationnel suffisante pour être détectable sur Terre par un instrument tel que Virgo. C'est ce qu'indique la formule du quadrupôle d'Einstein où on fait apparaître l'asymétrie de la source ε , sa vitesse typique v , sa taille R et son rayon de Schwarzschild associé R_s . On a alors :

$$P \approx \frac{c^5}{G} \varepsilon^2 \left(\frac{v}{c}\right)^6 \left(\frac{R_s}{R}\right)^2 \approx (4 \times 10^{52} \text{ W}) \times \varepsilon^2 \left(\frac{v}{c}\right)^6 \left(\frac{R_s}{R}\right)^2$$

où G est la constante de Newton. Numériquement $c^5/G \sim 4 \times 10^{52} \text{ W}$ représente une puissance énorme. On constate donc qu'une bonne source d'ondes gravitationnelles doit être asymétrique, relativiste et compacte.

Les sources astrophysiques

Les sources potentielles pour Virgo impliquent donc essentiellement des astres compacts, étoiles à neutrons ou trous noirs.

Coalescence d'astres compacts

La source la plus importante, celle dont on pense qu'elle donnera lieu à la première détection, est le système double d'astres compacts. Un tel couple possède en effet un moment quadrupolaire variable et rayonne donc dans le domaine gravitationnel. Il perd ainsi de l'énergie et les deux astres se rapprochent l'un de l'autre. Se rapprochant, les deux étoiles perdent encore plus d'énergie et ainsi de suite jusqu'à la fusion finale des deux astres. Un détecteur terrestre comme Virgo avec une bande passante typiquement comprise entre quelques Hz et quelques kHz est alors susceptible de détecter les derniers instants du couple, c'est-à-dire les derniers cycles avant que les deux objets ne fusionnent en un trou noir unique.

On sait que de tels systèmes d'étoiles compactes existent. C'est d'ailleurs la découverte de l'un d'entre eux, le pulsar binaire PSR1913 + 16, par Hulse et Taylor (prix

Nobel 1993) qui a fourni la première preuve expérimentale de l'existence du rayonnement gravitationnel. Le système PSR1913 + 16 est un système de deux étoiles à neutrons dont l'une est un pulsar. En l'étudiant sur plus de 30 ans, on a pu suivre l'évolution de ses paramètres orbitaux. En particulier la diminution de la période liée à la perte d'énergie par émission d'ondes gravitationnelles est en accord remarquable avec la prédiction de la Relativité Générale.

Un détecteur tel que Virgo pourra alors observer les quelques minutes de la fin du pulsar binaire PSR1913 + 16 quand le signal émis rentrera dans sa bande passante ... dans quelques centaines de millions d'années.

Heureusement d'autres systèmes similaires ont été découverts depuis dans notre Galaxie permettant d'avoir une estimation raisonnable du taux d'événements attendus pour ce type de source. Ainsi pour les détecteurs de la prochaine génération, l'observation de coalescences d'astres compacts devrait être routinière.

Le signal d'onde gravitationnelle émis lors de la spirale des deux objets compacts est très bien modélisé car la structure interne des objets peut être négligée quasiment jusqu'à leur contact. C'est un « chirp », signal dont la fréquence et l'amplitude augmentent au cours du temps, selon des lois d'évolution dépendant des paramètres fondamentaux du système, telles que les masses des étoiles par exemple (figure 2). Le signal étant *a priori* connu, on peut alors utiliser des techniques éprouvées d'analyse du signal (« filtrage adapté ») pour faire ressortir le signal du bruit [voir L. Blanchet, Images de la Physique, 2005].

Supernovae

L'effondrement gravitationnel d'une étoile massive donnant naissance à une étoile à neutrons (supernova de type II) ou à un trou noir est aussi susceptible de produire des ondes gravitationnelles détectables. Les simulations réalistes et récentes indiquent cependant que la puissance rayonnée lors d'un effondrement stellaire reste limitée,

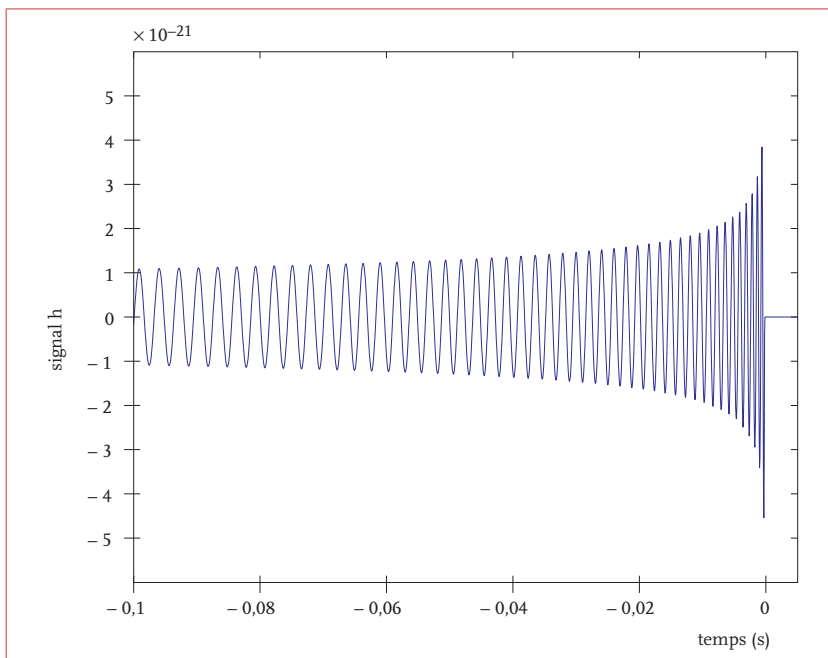


Figure 2 – Forme du signal d'onde gravitationnelle pour la fin de la coalescence de deux étoiles à neutrons. Le temps zéro correspond à l'instant du plongeon des deux astres pour n'en former qu'un seul. On observe une forme de « chirp » où la fréquence du signal augmente en même temps que l'amplitude.

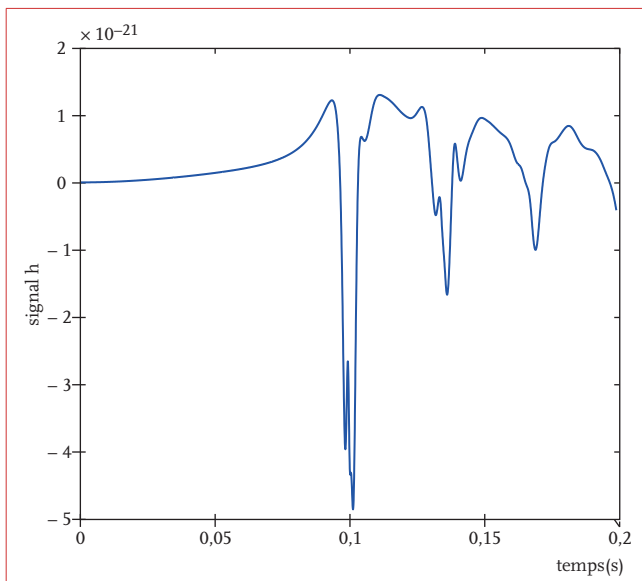


Figure 3 – Forme d'onde gravitationnelle pour une explosion de supernova provenant d'une simulation numérique. Les simulations donnent des formes d'ondes très variées mais on retrouve les mêmes caractéristiques avec un grand pic du fait de l'effondrement de l'étoile, suivi d'un ou plusieurs rebonds sur le noyau de matière nucléaire. D'après Dimmelmeier H., Font J.A. and Müller E., « Relativistic simulations of rotational core collapse. II. Collapse dynamics and gravitational radiation », *Astron. Astrophys.*, **393**, 523-542, (2002).

de sorte qu'un détecteur terrestre ne sera sensible, et sans doute à jamais, qu'à des supernovæ de notre propre Galaxie (quelques unes par siècle). Le signal attendu (*figure 3*) a une durée correspondant à la durée typique de l'effondrement, c'est-à-dire quelques millisecondes avec des amplitudes typiques $h \approx 10^{-21}$ pour des sources Galactiques. Il faut noter que la prédiction du signal émis est moins solide que celle qui concerne les spirales

d'étoiles compactes, la physique mise en jeu étant beaucoup plus complexe et seules les grandes lignes (durées typiques, pic de fréquence) sont à peu près certaines.

Autres types de sources

D'autres types de sources offrent des signatures d'onde gravitationnelle très différentes. Parmi celles-ci, les pulsars isolés peuvent émettre des ondes gravitationnelles de façon périodique s'ils sont déformés et possèdent ainsi un moment quadrupolaire variable à cause de leur rotation propre. Les déformations sont faibles, mais les sources potentielles étant continues, on a donc affaire à des signaux périodiques continus que l'on peut intégrer sur le temps nécessaire à leur détection. Si une recherche en aveugle est difficile et coûteuse en temps de calcul, il est beaucoup plus simple de s'intéresser à des pulsars connus comme celui du Crabe, dont la fréquence est suivie en permanence par les radiotélescopes. Enfin des fonds cosmologiques à l'origine de signaux

de type stochastique sont aussi prédits, signature de transitions de phase de l'Univers primordial ou signaux émis par des cordes cosmiques par exemple. Ce type de source donne un signal aléatoire dans un détecteur, qui apparaît donc comme un bruit supplémentaire et il faut donc corréler les sorties d'au moins deux détecteurs pour mettre en évidence un tel signal.

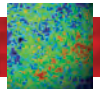
Le principe de Virgo

Une onde gravitationnelle est une perturbation de la métrique qui se propage à la vitesse de la lumière. L'effet physique associé est donc une variation de la mesure de la distance L entre deux masses test lors du passage d'une onde gravitationnelle. La variation relative maximale de distance est alors reliée à l'amplitude de l'onde gravitationnelle h par $\delta L / L = h / 2$. L'effet est de plus différentiel, car si les longueurs semblent s'allonger dans une direction, elles semblent rétrécir dans la direction perpendiculaire.

L'interféromètre de Michelson éclairé par une source laser stable de longueur d'onde λ est alors tout indiqué : il mesure la différence de phase de la lumière qui a suivi deux trajets orthogonaux selon les deux « bras » de longueur L de l'interféromètre. Ce déphasage est lui-même relié à la différence de chemin optique qui est justement l'effet induit par l'éventuel passage d'une onde gravitationnelle. Ce déphasage s'écrit

$$\delta\phi = \frac{4\pi L}{\lambda} h$$

et il est donc directement proportionnel à l'amplitude h de l'onde gravitationnelle. Une mesure interféro-



métrique de cette amplitude h est donc *a priori* possible. Pour atteindre une sensibilité qui permette de détecter une supernova galactique par exemple ($h \approx 10^{-21}$) il faut cependant quelques raffinements. En effet, le bruit de comptage de photons limite la sensibilité en phase (en l'absence d'autres bruits) comme dans toute expérience d'optique. La densité spectrale d'amplitude du bruit de phase ne dépend que des propriétés de la source laser (puissance P et pulsation ω)

$$\delta\tilde{\phi} = \sqrt{\frac{\hbar\omega}{P}}$$

Ce qui se traduit par une sensibilité en amplitude d'onde gravitationnelle

$$\tilde{h}_{\text{BruitPhoton}} = \frac{\lambda}{4\pi L} \sqrt{\frac{\hbar\omega}{P}}$$

Le premier paramètre sur lequel on peut jouer pour améliorer la sensibilité est donc la longueur des bras L . Virgo a ainsi des bras de 3 kilomètres dans lesquels la lumière est de plus « repliée » à l'aide de cavités Fabry-Perot de finesse modérée (de l'ordre de 50) ; les photons y parcourent alors un chemin optique de l'ordre de la centaine de kilomètres. De plus, une valeur élevée de L permet de diminuer l'influence des bruits de mesure (bruit sismique ou bruit thermique par exemple).

Un second facteur d'amélioration est lié à la puissance lumineuse P qui arrive sur la lame séparatrice de l'interféromètre. On montre que le maximum de sensibilité est atteint quand l'interféromètre est réglé sur une frange sombre et donc, l'essentiel de la lumière incidente est réfléchi vers la source laser. L'interféromètre est alors vu du point de vue de la source laser comme un miroir presque parfaitement réfléchissant. Une astuce consiste alors à placer un miroir, dit « miroir de recyclage », partiellement transparent à l'entrée de l'interféromètre de façon à former une nouvelle cavité Fabry-Perot, constituée du miroir de recyclage et du miroir composite formé par le reste de l'interféromètre. On obtient ainsi, à résonance, un gain d'intensité circulant dans l'interféromètre. La séparatrice est alors éclairée par un faisceau de puissance supérieure à la puissance délivrée par le laser source. Le schéma optique est alors complètement établi (figure 4) et le bruit de photons de l'expérience est totalement fixé par les caractéristiques de la source laser (longueur d'onde et puissance incidente) et de l'interféromètre « amélioré », longueur des bras, finesse des grandes cavités, réflexion du miroir de recyclage et pertes optiques.

Mais le bruit de photon n'est pas la seule source de bruit et n'est en fait pas la source dominante dans la partie de la bande passante la plus intéressante du point de vue

astrophysique, c'est-à-dire plutôt en deçà du kHz. Pour s'affranchir autant que possible du bruit sismique, les miroirs (les masses-test de l'expérience) sont suspendus à une chaîne d'atténuateurs sismiques de fréquence de résonance les plus basses possibles, exploitant le fait que des résonateurs mécaniques sont des filtres passe-bas. Une fois filtré, le bruit sismique impose la limite basse de la bande passante d'un détecteur terrestre, à savoir quelques Hz pour Virgo.

Les bruits qui interviennent ensuite sont les bruits thermiques associés aux degrés de liberté mécaniques des miroirs suspendus : les fils de suspensions ainsi que les miroirs sont des oscillateurs mécaniques qui sont excités par le mouvement brownien dû à la température. De manière imagée, on peut se figurer les miroirs comme des tambours dont la surface vibre à cause de la température. C'est le bruit thermique pendulaire qui domine à basse fréquence, au-delà de la coupure due au bruit sismique (quelques Hz) et jusqu'à quelques dizaines de Hz, puis le bruit thermique des miroirs prend le relais aux fréquences intermédiaires, jusqu'à quelques centaines de Hz, et enfin le bruit de photon domine à haute fréquence, au-delà du kHz.

La courbe de sensibilité de Virgo, essentiellement enveloppe de tous ces bruits, est représentée sur la figure 5 accompagnée des sensibilités des interféromètres LIGO situés à Hanford (état de Washington) et Livingstone (Louisiane).

Les premiers résultats

Les détecteurs LIGO et Virgo ont achevé leur première prise de données commune à l'automne 2007. Les interféromètres de LIGO ont en fait accumulé des données pendant deux ans et Virgo a rejoint le réseau en mai 2007. L'analyse des premiers résultats et la publication

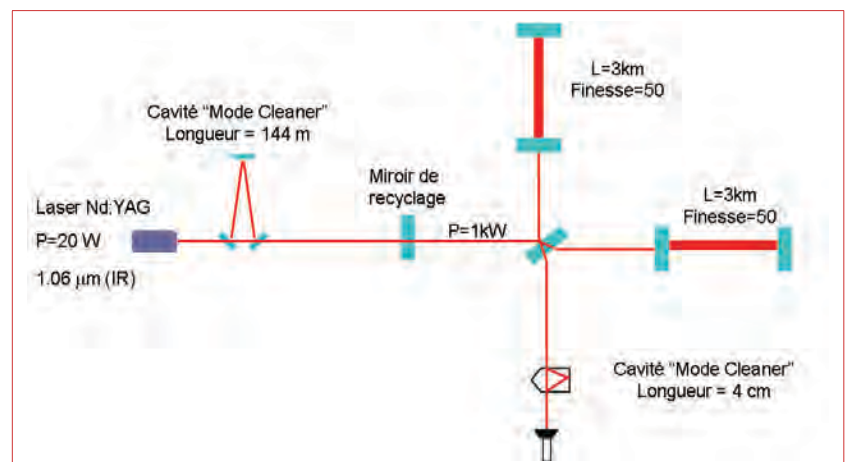


Figure 4 – Le schéma optique de Virgo. Les bras de l'interféromètre sont constitués de cavités Fabry-Perot de longueur 3 km et de finesse de l'ordre de 50. Le miroir de recyclage sert à augmenter la puissance circulant dans l'interféromètre. Les cavités « mode-cleaner » servent principalement à filtrer le faisceau laser et éliminer les « mauvais » modes. La source laser est continue et peut délivrer 20 W dans le proche infrarouge.

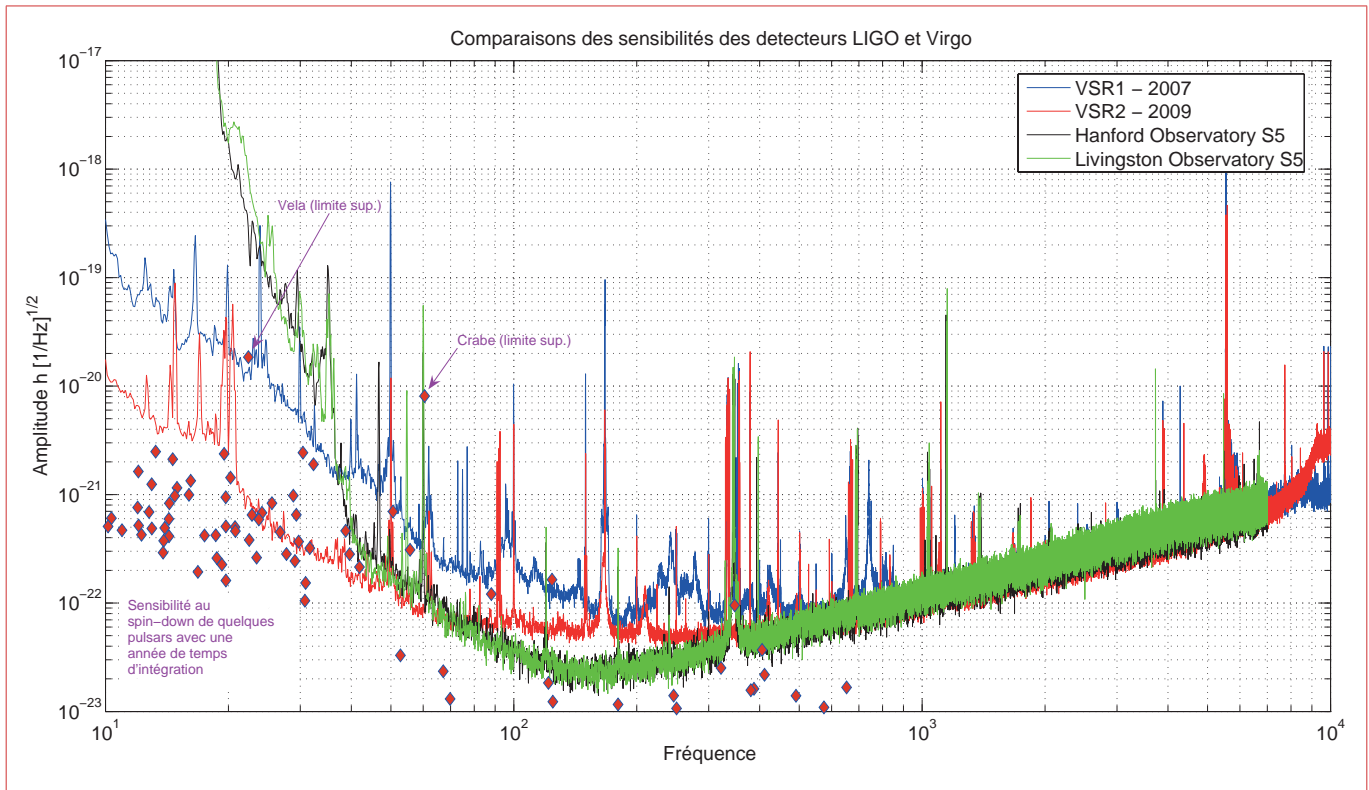


Figure 5 – Sensibilité mesurée des interféromètres Virgo (pendant les campagnes VSR1 et VSR2) et LIGO (Livingston et Hanford pendant la campagne S5 en 2007) lors des récentes prises de données. Le bruit sismique limite la sensibilité de Virgo en deçà de quelques Hz et n'apparaît donc pas sur la figure. On a ajouté le signal maximum attendu pour certains pulsars à rotation rapide comme le pulsar du Crabé (fréquence d'émission attendue ~ 60 Hz) ou le pulsar Vela (fréquence un peu supérieure à 20 Hz).

des plus importants a pris presque 2 ans et, à l'été 2010, le travail d'analyse n'est pas encore totalement achevé. Malheureusement aucun événement significatif n'a été mis en évidence. Cependant certaines analyses, notamment celles qui concernent les sources périodiques (pulsars) ou le fond stochastique, commencent à apporter des contraintes pertinentes pour l'astrophysique ou la cosmologie.

Pulsars

La recherche d'ondes gravitationnelles périodiques émises par des pulsars connus a permis de placer des limites supérieures compétitives sur les amplitudes. Pour la première fois ces limites sont en effet inférieures au signal maximum possible, ce qu'on appelle la « spin-down limit », signal maximum calculé en attribuant entièrement le ralentissement observé de la rotation du pulsar à l'émission de rayonnement gravitationnel. La figure 6 montre le résultat obtenu par LIGO entre autres sur le pulsar du Crabé (fréquence d'émission gravitationnelle ~ 60 Hz). On voit que les caractéristiques physiques du pulsar, son ellipticité et son moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation, commencent ainsi à être contraintes par les détecteurs d'ondes gravitationnelles. D'autres pulsars de basse fréquence sont sur le point d'être sondés par Virgo (seul appareil possédant la sensibilité adéquate à basse fréquence) comme le pulsar Vela.

Fond cosmologique

Un autre résultat intéressant concerne le fond cosmologique d'ondes gravitationnelles qui peut être mis en évidence en corrélant plusieurs détecteurs indépendants. L'absence de signature d'onde gravitationnelle se traduit par une limite supérieure sur la densité d'énergie d'un fond stochastique d'ondes gravitationnelles (normalisée par la densité critique²) de l'ordre de $\Omega \approx 6,9 \times 10^{-6}$ aux alentours de 100 Hz, c'est-à-dire au pic de sensibilité des interféromètres.

Cette mesure directe améliore en fait les limites indirectes obtenues *via* l'étude de la nucléosynthèse primordiale et par l'étude du fond cosmologique à 3K. Sur la figure 7 on voit que la limite actuelle permet déjà d'exclure certains modèles cosmologiques (« pre-big-bang » sur la figure). Les résultats attendus avec les détecteurs de seconde génération (AdvLIGO sur la figure) seront plus contraignants et permettront de s'attaquer aux modèles cosmologiques à base de cordes cosmiques par exemple.

Coalescence d'astres compacts

En ce qui concerne les coalescences de binaires, la recherche a été là aussi infructueuse. L'espace des

2. Densité pour un univers plat.

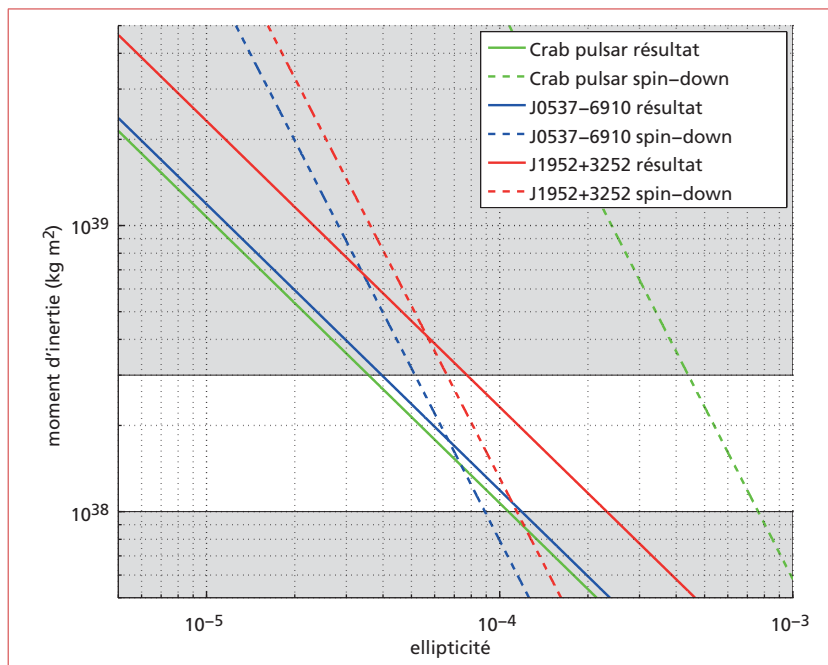


Figure 6 – Comparaisons entre les limites supérieures de la recherche d’ondes gravitationnelles pour 3 pulsars et la « spin-down limit ». La bande blanche correspond aux moments d’inertie les plus probables pour des étoiles à neutrons. La « spin-down limit » pour le Crabe est nettement battue (d’après LIGO Scientific Collaboration, Searches for gravitational waves from known pulsars with S5 LIGO data, paru dans *The Astrophysical Journal*, vol. 713, p. 671-685, 2010).

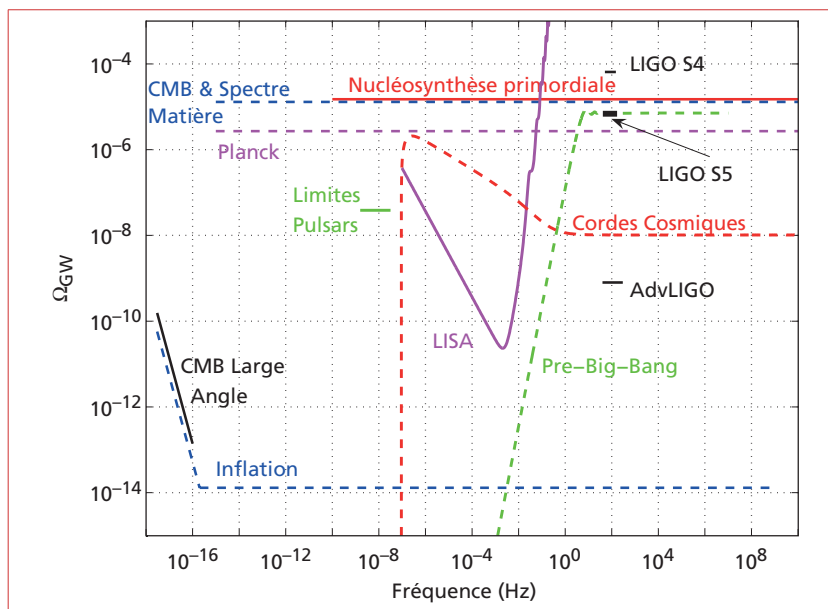


Figure 7 – Limite supérieure obtenue par les détecteurs LIGO sur le fond stochastique d’ondes gravitationnelles ainsi que les limites obtenues avec l’étude du fond diffus cosmologique. Les limites attendues avec la prochaine génération de détecteur et le futur détecteur spatial LISA sont également représentées. Ces limites sont comparées aux différents modèles d’émission de ce fond stochastique (d’après LIGO&Virgo coll., An upper limit on the stochastic gravitational-wave background of cosmological origin, *Nature* 460, 990-994 (2009)).

paramètres (les deux masses des astres en jeu) a été divisé en 3 catégories correspondant aux couples d’étoiles à neutrons, aux couples de trous noirs et aux couples formés d’une étoile à neutrons et d’un trou noir. L’absence de détection par LIGO et Virgo, pour des distances comprises entre 10 Mpc pour des couples d’étoiles à neutrons et

150 Mpc pour des trous noirs, se traduit par des limites supérieures sur les taux de tels événements. On obtient ainsi un taux d’événement maximal $R = 8,7 \times 10^{-3} \text{an}^{-1} L_{10}^{-1}$ pour les systèmes d’étoiles à neutron, $R = 4,4 \times 10^{-4} \text{an}^{-1} L_{10}^{-1}$ pour les trous noirs binaires et $R = 2,2 \times 10^{-3} \text{an}^{-1} L_{10}^{-1}$ pour les couples d’étoile à neutrons et trou noir, où L_{10} désigne 10^{10} fois la luminosité solaire dans le bleu (le taux de coalescences de binaires étant supposé proportionnel à cette quantité qui représente la luminosité typique d’une galaxie spirale). Les limites supérieures sont encore d’un ordre de grandeur supérieure aux prédictions astrophysiques optimistes. Cependant avec les détecteurs de seconde génération (Advanced LIGO et Advanced Virgo, voir ci-dessous) la sensibilité fera un bond d’un ordre de grandeur ce qui se traduira par un volume d’univers observable mille fois plus grand (les détecteurs étant sensibles à l’amplitude h et h étant proportionnel à $1/r$) et donc un taux d’événements également 1 000 fois supérieur. De marginale pour les détecteurs actuels LIGO et Virgo, la probabilité de détection d’une coalescence de binaires compactes deviendra presque certaine avec les détecteurs avancés.

Sources impulsives

En ce qui concerne la dernière catégorie de sources potentielles d’ondes gravitationnelles, les sources donnant des signaux brefs, ou « bursts », les résultats de LIGO et Virgo sont moins spectaculaires. Là encore, il n’y a eu aucune détection et l’analyse fournit des limites supérieures au taux d’événements et à leurs amplitudes caractéristiques pour différents signaux testés, comme montré sur la figure 8. La limite sur le taux d’événements dépend du temps d’observation alors que la sensibilité de l’analyse fixe les amplitudes caractéristiques maximales mesurables. Pour l’analyse commune LIGO/Virgo des prises de données des campagnes S5 et VSR1 entre 2005 et 2007, la sensibilité descend sous les $10^{-21} / \sqrt{\text{Hz}}$ pour des signaux de quelques centaines de Hz, et la limite sur le taux d’événements de « bursts » d’onde gravitationnelle est de l’ordre de 2 par an.

Suivis d’événements astrophysiques

La recherche d’ondes gravitationnelles peut être facilitée par l’utilisation d’informations collectées par d’autres observatoires (ondes électromagnétiques, neutrinos...).

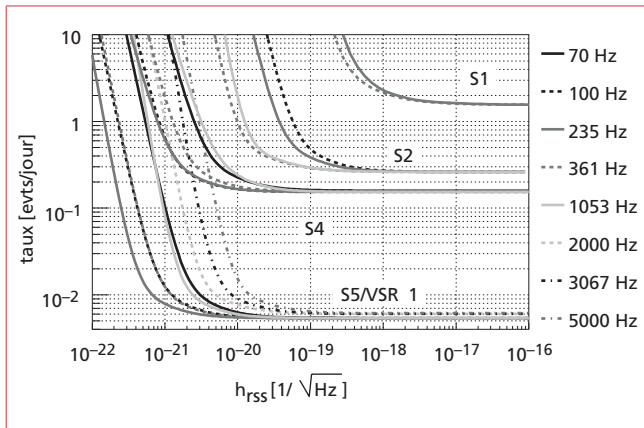


Figure 8 – Limites supérieures sur le taux de sources impulsives en fonction de l'amplitude possible (h_{rss}) pour des événements d'onde gravitationnelle et pour différents types de signaux, lors des campagnes d'observations des collaborations LIGO et Virgo.

La recherche associée aux sursauts gamma (GRB) en est une très bonne illustration. Le moteur central de ces phénomènes reste encore inconnu et deux scénarii probables sont la coalescence d'astres compacts ou l'effondrement d'une étoile massive en trou noir (hypernova). Ainsi l'utilisation des données provenant des observatoires gravitationnels permet d'ajouter des contraintes sur les modèles d'émission de ces objets comme dans le cas du GRB 070201. Cet événement a eu lieu dans la direction de la galaxie M31 (galaxie Andromède, située à 0,77 Mpc) pendant une prise de données des interféromètres LIGO. L'absence de détection a permis d'exclure la coalescence de binaires dans M31, ce qui implique qu'un autre scénario est à l'œuvre pour le cœur du sursaut ou encore que cet événement s'est déroulé dans une autre galaxie plus lointaine située sur la ligne de visée de M31.

La prochaine génération

Quelle science accessible avec la prochaine génération ?

Comme nous avons pu le voir précédemment, les interféromètres en cours de fonctionnement n'ont pas encore détecté directement le passage des ondes gravitationnelles. Si les sources n'ont pas été au rendez-vous pour l'instant, il convient de souligner que ces instruments, qui représentaient un immense défi lors de leur approbation dans les années 90, ont atteint les sensibilités prévues. Ils restent la meilleure stratégie disponible pour détecter les ondes gravitationnelles dans un avenir proche. Le plan (ambitieux) consiste à améliorer la sensibilité de ces instruments d'un facteur 10 sur l'ensemble de la bande de fréquence à l'horizon 2015 (voir *figure 9*).

Quand une telle sensibilité sera atteinte, les coalescences d'étoiles binaires seront visibles jusqu'à une distance de 140 Mpc et celles de trous noirs jusqu'à 1 Gpc. Avec de telles performances, plusieurs événements sont attendus chaque année même dans les scénarii les plus défavorables. Au-delà de la détection directe des ondes gravitationnelles, l'observation de tels phénomènes pourra avoir de nombreuses retombées astrophysiques : modèles de formation stellaire, équation d'état de la matière nucléaire ou observation directe de trous noirs. D'autre part, les coalescences de systèmes binaires constitueront un nouveau type de chandelle standard qui permettra d'estimer les paramètres cosmologiques.

En ce qui concerne les étoiles à neutrons en rotation, on pense que la « spin-down limit » d'une quarantaine de pulsars sera dépassée en un an d'observation et les limites sur l'ellipticité des pulsars atteindront alors 10^{-5} - 10^{-4} .

Même si la détection des supernovae restera limitée à la Galaxie et donc avec un taux faible, une telle mise en évidence permettra de mieux comprendre le mécanisme de l'explosion et une détection en coïncidence avec les détecteurs de neutrino conduira à des limites intéressantes sur la masse des neutrinos. D'autres sources impulsives telles que les « soft gamma repeaters (SGR) » devraient être détectables. Enfin, l'association avec les sursauts gamma (GRB) continuera à être étudiée activement.

Finalement, l'étude du fond stochastique d'ondes gravitationnelles conduira à de meilleures contraintes sur les modèles cosmologiques comme montré sur la *figure 7*.

Nous avons déjà mentionné l'intérêt de la détection en coïncidence avec les détecteurs de neutrinos. Cette approche dite multi-messagers est déjà en œuvre aujourd'hui avec l'utilisation de radiotélescopes pour les

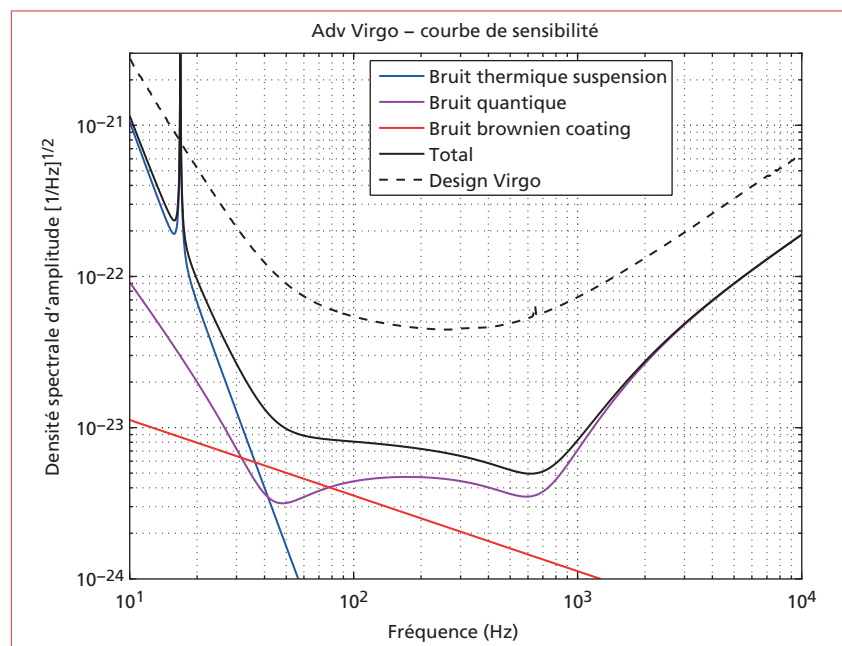


Figure 9 – Sensibilité prévue pour Advanced Virgo comparée à la courbe du design de Virgo.



pulsars, les télescopes optiques ou satellites X et γ pour la recherche de contreparties (signal optique par exemple « vu » en coïncidence avec le signal d'onde gravitationnelle). En premier lieu, une détection en coïncidence permettra bien évidemment de renforcer la confiance dans la première détection directe des ondes gravitationnelles. Ensuite, elle nous donnera des informations supplémentaires sur les mécanismes physiques mis en œuvre.

Comment modifier les instruments ?

Si le potentiel de physique pour la nouvelle génération est très prometteur, atteindre la sensibilité requise reste néanmoins un vrai défi scientifique qui implique la maîtrise de nombreuses technologies : laser, traitement de surfaces, vide, physique des matériaux, contrôle de cavités optiques suspendues. Tout d'abord, la configuration optique sera encore complexifiée avec l'ajout d'un nouveau miroir dit de « recyclage du signal » entre la séparatrice et le système de détection. Ce miroir permet de réduire le bruit de photon dans une région donnée du spectre, région qui dépend de la position et des paramètres optiques du miroir. La puissance de la source laser augmentera de 10 à 125 W et les contraintes sur la stabilité en puissance, fréquence et alignement demandent la mise en œuvre de nombreuses boucles de rétroaction. Les qualités des miroirs sont, elles aussi, poussées aux limites : rugosité inférieure à l'Angström, planéité définie au nanomètre. Le système de suspension des miroirs ne devrait être que faiblement modifié car l'atténuation du bruit sismique obtenue pour Virgo est suffisante pour Advanced Virgo. Cependant, afin de réduire le bruit thermique, les miroirs ne seront plus soutenus par des fils d'acier mais suspendus par des fibres de silice directement soudées aux miroirs. Ces suspensions, dites monolithiques, sont actuellement testées dans Virgo et devraient donc être bien maîtrisées pour Advanced Virgo. La liste des modifications apportées à Virgo est trop longue pour être dressée ici mais on peut affirmer aujourd'hui qu'aucune ne semble particulièrement risquée au vu de l'expérience acquise dans la collaboration dans les années passées à construire et mettre au point Virgo.

Afin d'être opérationnel en 2015, le détecteur Virgo sera arrêté mi-2011 après une dernière prise de données qui pourrait se révéler très intéressante pour la recherche de sources périodiques de type pulsar. Suivront ensuite la désinstallation de Virgo et la modification des infrastructures pour pouvoir accueillir dès 2013 les nouveaux composants nécessaires à Advanced Virgo.

Conclusion

La détection directe des ondes gravitationnelles est un long chemin qui devrait s'achever d'ici la fin de cette décennie. La première génération de détecteurs a atteint la sensibilité prévue lors de son lancement et la mise au point, qui s'est étendue sur plusieurs années, a représenté

un vrai défi scientifique. Même si la première détection se fait toujours attendre, la sensibilité actuelle permet d'obtenir des contraintes astrophysiquement pertinentes dans de nombreux domaines : pulsars, sursauts gamma ou modèles cosmologiques.

Les succès récoltés durant cette période ont permis l'approbation d'une nouvelle génération de détecteurs qui seront dix fois plus sensibles et qui devraient conduire de manière quasi-certaine à la première détection des ondes gravitationnelles. En coïncidence avec d'autres messages astrophysiques, il sera alors possible de mieux comprendre ces phénomènes cataclysmiques de l'Univers à l'origine des ondes gravitationnelles.

Encadré 2

Le laser de Virgo

La source laser utilisée par Virgo doit obéir à un cahier des charges complexe. On demande une source continue de puissance délivrant une dizaine de Watts tout en étant ultra-stable en fréquence, en puissance et en pointé. Deux lasers sont utilisés à cette fin, l'un délivre la puissance et l'autre est stabilisé en fréquence. La lumière du laser stabilisé est injectée dans le laser de puissance et lui confère sa stabilité (deux oscillateurs couplés et de fréquences proches peuvent en effet se synchroniser). La stabilisation en fréquence se fait en particulier grâce à une cavité rigide, fabriquée dans un matériau de faible coefficient de dilatation thermique (ULE) (voir [figure 10](#)). Cette cavité fournit en effet un étalon de longueur stable et donc une référence de fréquence. Le laser est asservi sur cette cavité et sa fréquence « suit » alors les fluctuations de longueur de la cavité rigide. Enfin, la technologie choisie pour les lasers est la technologie infrarouge (1,064 μm), éprouvée depuis au moins deux décennies.

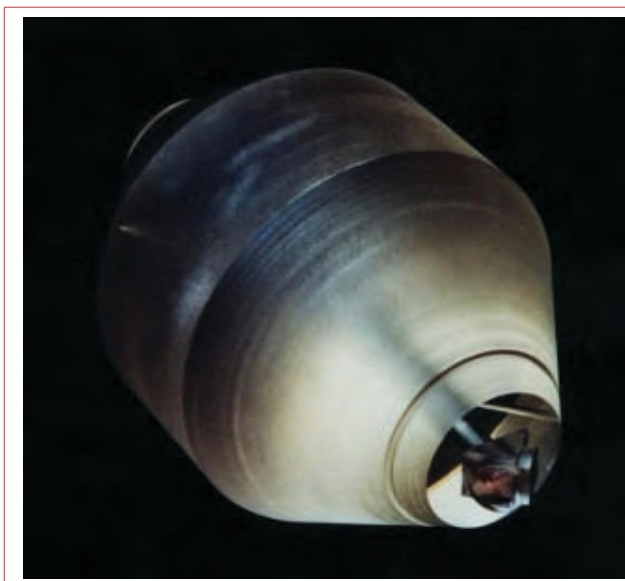


Figure 10 – Cavité de référence utilisée pour la stabilisation en fréquence de la source laser de Virgo. © OCA-Artemis