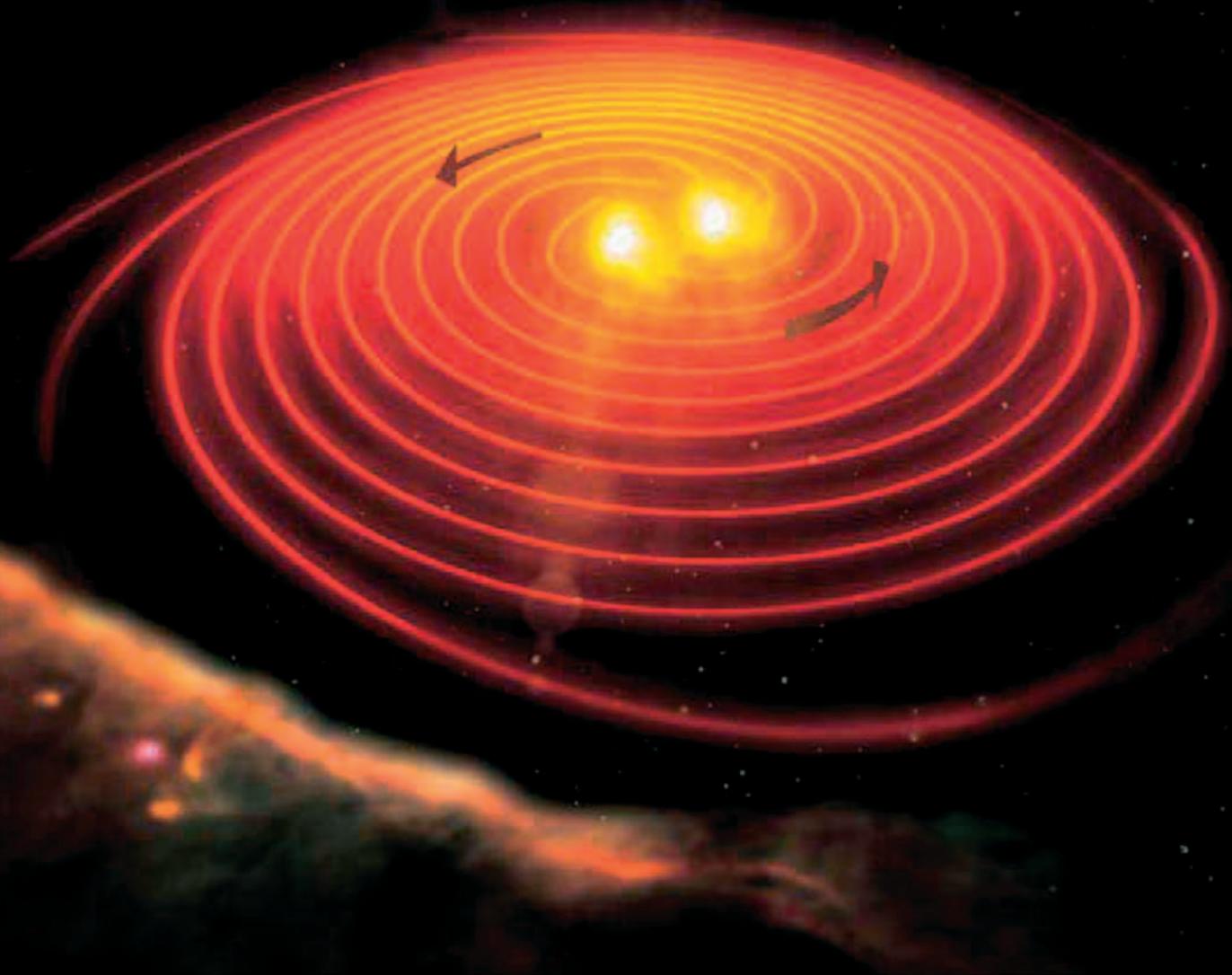


Recherche des ondes gravitationnelles



L'interaction gravitationnelle est la quatrième et la plus mal connue des interactions fondamentales; on la suppose associée à un boson médiateur de spin 2, le graviton. Depuis plusieurs décennies, des détecteurs traquent les effets infimes du rayonnement gravitationnel. La théorie prévoit en effet que les supernovae, les coalescences d'étoiles binaires, les trous noirs peuvent émettre des ondes gravitationnelles. Jusqu'à présent, seules des preuves indirectes ont été obtenues, à travers le système binaire PSR 1913+16. Leur mise en évidence de façon directe permettrait de tester la relativité générale et d'ouvrir une nouvelle fenêtre d'observation en astrophysique : c'est le but de l'expérience VIRGO, fondée sur une détection interférométrique, qui entre maintenant dans la phase opérationnelle.

Expérience de recherche d'ondes gravitationnelles VIRGO

Participation du LAPP

Expérimentateurs : D. Buskalic, R. Flaminio, F. Marion, **B. Mours**, L. Massonnet, E. Tournefier, D. Verkindt, M. Yvert

Equipe technique : F. Bellachia, D. Boget, G. Cougoulat, P-Y. David, L. Fournier, L. Giacobone, L. Journet, R. Hermel, B. Lieunard, A. Masserot, F. Moreau, P. Mugnier, S. Vilalte

Doctorants : F. Beauville, R. Gouaty, J. Ramonet, O. Véziant

Stagiaires : F. Beauville, J. Cottinet, R. Gouaty, D. Scrivo

Abstract

The construction of VIRGO, a large interferometer dedicated to Gravitational Waves search has just been completed near Pisa (Italy). The LAPP group is in charge of the vacuum chamber housing the mirrors, the detection system, the data acquisition system, the calibration and is heavily involved in the detector commissioning and data analysis.

L'expérience VIRGO

L'objectif de l'expérience est de mettre en évidence - de façon directe - l'existence des ondes gravitationnelles, prédite il y a plus de 80 ans par Einstein comme une conséquence de la théorie de la relativité générale. L'intérêt d'une telle mise en évidence est multiple : non seulement elle conforterait davantage la théorie de la relativité générale mais ce serait le premier élément d'analyse des propriétés de la particule d'échange de la force gravitationnelle, le graviton. De plus, elle ouvrirait une nouvelle voie d'exploration de l'univers ; les astrophysiciens attendent en effet des ondes gravitationnelles des informations sur des régions cosmiques très denses et très éloignées.

Des ondes gravitationnelles sont émises lorsque des masses sont accélérées d'une façon non symétrique. Ces ondes induisent une «déformation de l'espace» conduisant à une modification Δl de la distance l entre deux points. La perturbation de la métrique $h = (2\Delta l)/l$ et l'énergie rayonnée correspondante sont non négligeables lorsque masses et accélérations mises en jeu sont très grandes. Avec les technologies actuelles on ne peut espérer engendrer en laboratoire des ondes gravitationnelles conduisant à des effets mesurables. En fait les espoirs sont tournés vers trois types de sources astrophysiques :

- L'explosion d'une supernova ou la création d'un trou noir, phénomènes brefs (quelques millisecondes) pour lesquels h est évalué à environ 10^{-23} pour une supernova explosant à une distance de 10 Mpc (amas de galaxies de la Vierge).
- Les sources périodiques, formées par la rotation asymétrique d'un objet massif et compact tel qu'une étoile à neutrons. Le signal correspondant est très petit (h est inférieur à 10^{-24} pour le pulsar du Crabe par exemple) mais présente l'avantage d'être toujours présent, donc intégrable.
- La coalescence d'un système binaire d'étoiles à neutrons ou de trous noirs. Ce phénomène est la source la plus prometteuse d'ondes gravitationnelles car il présente un signal très caractéristique. Le taux attendu est de quelques événements par an dans un rayon de 100 Mpc.

Pour mesurer un changement relatif aussi petit, le détecteur VIRGO compare les longueurs des deux bras d'un interféromètre de Michelson. Les élongations asymétriques induites par une onde gravitationnelle sont alors mesurées comme une variation de phase entre les faisceaux lumineux se propageant dans les deux bras.

La sensibilité de l'expérience sera de $h \sim 3 \cdot 10^{-23}/\text{Hz}^{1/2}$ au-dessus d'une centaine de hertz. Elle est alors limitée par le bruit de photons du faisceau laser. Elle sera atteinte en insérant dans chacun des bras longs de 3 km une cavité Fabry-Perot de finesse 50 pour porter la longueur effective des bras à une centaine de kilomètres, et en utilisant la technique du recyclage pour obtenir une puissance lumineuse d'environ 1 kW sur la lame séparatrice de l'interféromètre. A plus basse fréquence la sensibilité est limitée par l'agitation sismique et thermique des miroirs. Cet interféromètre est découplé du bruit environnant, en particulier sismique, en étant suspendu dans l'ultra vide par des suspensions de plusieurs étages. L'ultra vide l'isole du bruit acoustique et supprime les perturbations dans la propagation du faisceau lumineux.



Figure 1 : Vue aérienne de l'expérience VIRGO

La période de tests de la partie centrale de l'interféromètre («CITF») s'est achevée en juillet 2002 parallèlement avec la construction des bras de trois kilomètres. L'assemblage et la mise en configuration complète de VIRGO se sont achevés à la fin de l'été 2003. L'étape suivante est la mise en route progressive de l'interféromètre. Les premières prises de donnée avec une sensibilité raisonnable sont attendues pour la fin de l'année 2004.

Contribution du LAPP

Les responsabilités du LAPP dans la réalisation de l'appareillage concernent les domaines suivants :

- L'étude et la réalisation des enceintes à vide du bâtiment central et des tours d'extrémité.
- L'étude et la réalisation de l'ensemble de détection du signal.
- Le système d'horloges, les cartes de transmissions numériques, l'imagerie, les premières stations de travail.
- Le système d'acquisition de données.
- La calibration de l'interféromètre.
- Certains logiciels de l'expérience (simulation, visualisation de données...).
- Des contributions au fonctionnement de l'interféromètre et à l'analyse des données.

Activités 2002/2003

Enceintes à vide («tours»)

L'année 2002 a été celle de l'installation et de l'équipement (four, chambre à vide intermédiaire...) des deux enceintes à vide qui abritent les miroirs des bouts de bras de l'interféromètre. Divers travaux de finition tels que le renforcement des liaisons entre les fours de la partie centrale ont permis de clore au début de l'année 2003 l'activité du LAPP liée aux enceintes à vide. Leur maintenance est maintenant assurée par EGO, l'organisme chargé d'assurer le fonctionnement de l'interféromètre.

L'ensemble de détection

L'ensemble de détection doit pouvoir fonctionner avec une excellente efficacité quantique, une puissance lumineuse de l'ordre du watt, et un bruit électronique inférieur au bruit de photon. Il comprend une partie optique importante.

Après le succès de son fonctionnement pendant les tests du CITF, l'activité récente a été dominée par les modifications nécessaires pour passer à la configuration finale de Virgo. Les activités et réalisations principales de ces deux années ont été :

- L'assistance pour le fonctionnement du système de détection pendant les tests du CITF.
- Les modifications du banc de détection suspendu : nouveau télescope d'entrée pour accepter un faisceau cinq fois plus gros et offrir plus de possibilités de réglages, installation d'un isolateur de Faraday (Figure 2).
- Les modifications du banc externe avec l'adjonction de la mesure de la polarisation parasite des faisceaux

et l'introduction d'une mesure des composantes aux fréquences de modulation double et triple.

- La modification de l'intégralité de la chaîne électronique des photodiodes pour travailler à une fréquence de modulation deux fois plus basse que pour le CITF.
- L'installation des composants optiques et électroniques qui observent les faisceaux transmis en bout de bras de trois kilomètres de l'interféromètre.
- L'augmentation de la dynamique des cartes électroniques chargées de la mesure de position des faisceaux sur le banc suspendu.
- L'élaboration de procédures de réglage et de logiciels de monitoring du banc ainsi que l'amélioration des logiciels de contrôle.

Composants «standard»

Pour le fonctionnement de l'expérience, un certain nombre de composants «standards» sont fournis par le LAPP : châssis VME, processeurs VME, cartes VME de liaison numérique par fibres optiques, système de distribution de signaux d'horloge, caméras numériques permettant de visualiser et d'analyser les faisceaux ainsi que de déterminer la position des miroirs, système de vidéo analogique, moyens de calculs du site.

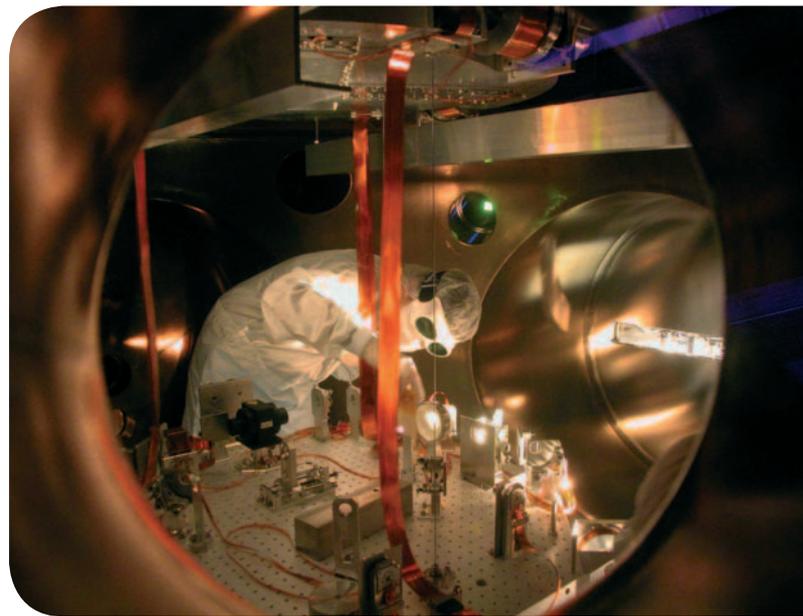


Figure 2 : Réglages sur le banc de détection suspendu.

Pendant la période 2002/2003, l'essentiel de l'activité a été d'installer ces composants dans les bâtiments de bouts de bras. En particulier le système d'horloge qui assure la synchronisation des contrôles et le bon fonctionnement de l'acquisition des données a été reconfiguré, y compris dans le bâtiment central, pour que les signaux d'horloges soient parfaitement synchronisés. Une horloge atomique destinée à vérifier la stabilité à court terme de ce système a également été installée. Le logiciel (Gx) qui traite les images des miroirs pour déterminer leur position a suivi l'évolution du système optique (nouveaux leviers optiques et mesure de la position des «marionnettes»).

L'acquisition des données :

L'acquisition des données doit fonctionner en mode continu en collectant une grande quantité d'informations (plusieurs Moctets/sec) sur des sites distants (3 km). Les réalisations principales ont été :

- L'assistance sur le site pour le fonctionnement du système d'acquisition des données qui fonctionne de manière continue depuis le printemps 2001.
- L'installation des équipements nécessaires en bout de bras et la reconfiguration dans la partie centrale pour passer à la configuration finale de l'interféromètre. Signalons que le flux de données compressé est ainsi passé de 4 Moctets/s à 6 Mo/s (soit plus de 14Mo/s de données non compressées).
- La maintenance et l'évolution des logiciels (y compris le passage sous Linux d'une partie des applications) pour accepter ce nouveau flux et assurer une latence minimale.
- Le développement de nouveaux logiciels ("Frame File Monitoring") pour effectuer un monitoring du bon fonctionnement de l'acquisition des données et fournir les outils pour accéder de manière transparente aux derniers mois de données (environ 60 Toctets).
- L'amélioration des outils de supervision de l'acquisition (interface graphique en ligne ou sur le web).
- L'amélioration et le développement de nouveaux outils de production de données dérivées (meilleur filtrage des données à 50Hz, détection en ligne du bon fonctionnement des suspensions...).
- L'amélioration de l'outil de visualisation des données («data display»).
- Le suivi du format de données et du logiciel associé qui est utilisé par les différents détecteurs d'ondes gravitationnelles dans le monde.

La Calibration de l'interféromètre

L'intense activité de test du CITF a nécessité de nombreuses calibrations de l'interféromètre, en particulier durant les prises de données techniques. Le groupe du LAPP a ainsi déterminé toutes les courbes de sensibilité (Figure 3). Pour cela, à chaque changement de configuration de l'interféromètre, il a fallu déterminer la forme des fonctions de transfert. Puis il a fallu mesurer leurs paramètres ainsi que leur évolution au cours du temps. Cette connaissance a permis de fabriquer des données «reconstruites» où les effets dus aux boucles d'asservissements ont été corrigés et où les résonances («raies») les plus importantes, en particulier celles provenant de l'alimentation générale («50Hz» et harmoniques), ont été soustraites. L'actionneur optique capable de déplacer les miroirs indépendamment des actionneurs électromagnétiques classiques a été mis au point et installé sur le bras nord afin d'être utilisé dès que Virgo aura une sensibilité suffisante.

La préparation de l'analyse des données

De multiples outils logiciels ont été développés et exploités pour préparer l'analyse des données :

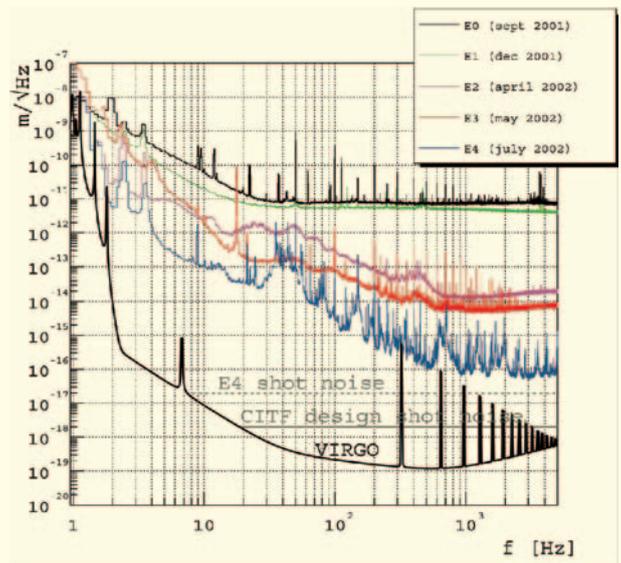


Figure 3 : Courbe de sensibilité de l'interféromètre central illustrant les progrès réalisés au fur et à mesure des cinq prises de données techniques réalisées de septembre 2001 (E0) à juillet 2002 (E4).

- Le développement d'un environnement d'analyse interactif (Vega) a été poursuivi.
- Un soutien a été apporté à la maintenance du logiciel de simulation de l'expérience (SIESTA) et le développement de nouvelles fonctionnalités, en particulier pour la simulation optique utilisée dans les études d'asservissement de l'interféromètre et pour la simulation de sources périodiques binaires.
- La recherche de coalescences binaires a fait l'objet de plusieurs développements : la recherche de méthodes efficaces de pavage de l'espace des paramètres et la mise au point d'une méthode de recherche de sources basée sur une analyse par bandes de fréquence (Figure 4). Ces développements ont été mis en oeuvre avec succès lors d'analyses tests («Mock Data Challenge») organisées par la collaboration ainsi qu'avec les données du CITF.

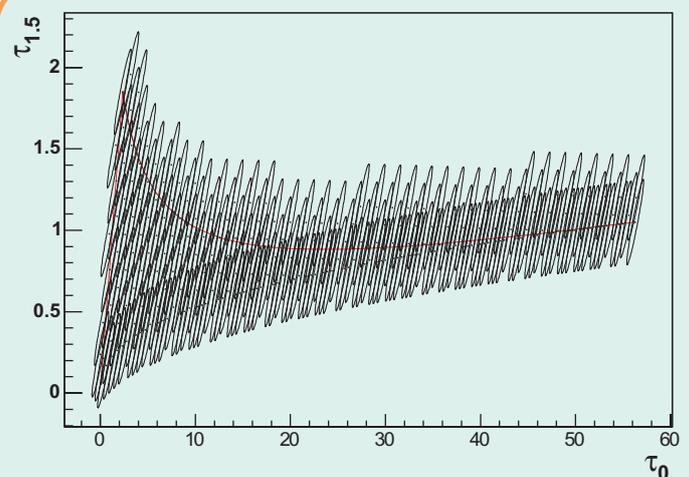


Figure 4 : Exemple de pavage de l'espace des paramètres des coalescences binaires utilisé pendant un «Mock Data Challenge». Les paramètres τ_0 et $\tau_{1,5}$ sont caractéristiques des masses des deux étoiles.

- Le développement de méthodes de recherche de signaux provenant de pulsars faisant partie d'un système binaire a continué. Ces méthodes ont été testées avec des données du CITF.

La mise au point du détecteur («commissioning»)

Un interféromètre est un ensemble complexe qui pour être opérationnel nécessite le fonctionnement simultané de l'ensemble de ses éléments. Cette activité a nécessité la présence sur le site de plusieurs membres de l'équipe du LAPP. Sa coordination a été assurée par un physicien du LAPP.

En 2002, différentes étapes dans le fonctionnement de l'interféromètre central ont été franchies : mises en route du recyclage de la lumière, alignement automatique de certains degrés de liberté. Les progrès réalisés se sont traduits par l'amélioration des courbes de sensibilité observées au cours des cinq prises de données techniques effectuées de septembre 2001 à juillet 2002 (Figure 2). L'équipe du LAPP s'est également impliquée dans l'analyse de ces données, en particulier dans la recherche de bruits impulsifs en vue de leur réduction. Enfin, la préparation de la nouvelle période de mise au point de VIRGO complet a eu lieu pendant la fin 2002 et le début 2003.

Collaboration internationale regroupant 11 laboratoires dont 5 français : LAPP Ancecy, IPN Lyon, OCA Nice, LAL Orsay, ESPCI Paris

Pour en savoir plus
<http://www.lapp.in2p3.fr/virgo>
<http://www.virgo.infn.it>