



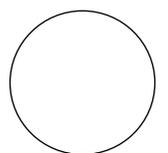
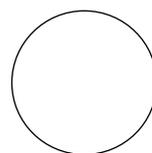
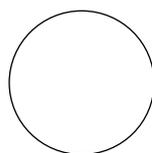
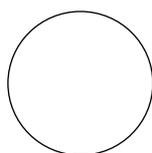
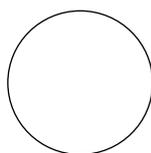
Ondes gravitationnelles Virgo entre dans sa phase opérationnelle

Voyage de presse à Cascina (Italie)
Mardi 22 mai 2007

DOSSIER DE PRESSE

Contact scientifique
Benoît Mours
T 04 50 09 16 00
benoit.mours@lapp.in2p3.fr

Contact presse
Claire Le Poulennec
T 01 44 96 49 88
Claire.le-poulennec@cnrs-dir.fr





Sommaire

➤ A la recherche des ondes gravitationnelles

Les objectifs scientifiques de Virgo

Le détecteur Virgo

La collaboration Virgo et EGO

1993 – 2007 : de la construction à l'exploitation scientifique

LIGO

GEO

L'accord LIGO/VIRGO

L'avenir de Virgo

Les interféromètres de troisième génération

Les détecteurs à barres raisonnantes

➤ La contribution des laboratoires du CNRS à VIRGO

ARTEMIS : Le laser de puissance et la simulation numérique

LAPP : L'enceinte à vide, le système de détection et d'acquisition de données

LAL : L'enceinte à vide, les pièges optiques, le contrôle global et les réseaux informatiques

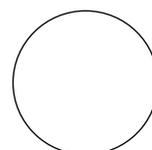
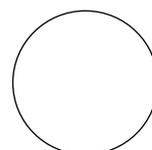
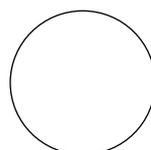
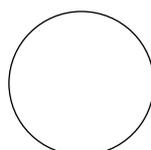
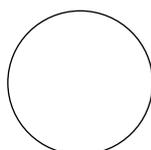
SLP- LAM : Les composants optiques

LUTH – IAP : Les sources d'ondes gravitationnelles

➤ Les autres expériences sur la gravitation (Microscope, Pharo, Télémétrie laser, Lisa)

➤ Glossaire

➤ Brochure EGO/Virgo





A la recherche des ondes gravitationnelles

Le 18 mai 2007, l'interféromètre Virgo a débuté sa première phase d'exploitation scientifique. Il s'agit d'une étape cruciale dans la traque aux ondes gravitationnelles qui a commencé il y a plusieurs décennies avec les détecteurs à barres résonnantes (voir ci-dessous le paragraphe sur ces détecteurs). Virgo, le plus grand détecteur européen (franco-italien), vient rejoindre les détecteurs LIGO aux États-Unis et l'interféromètre GEO en Allemagne. Ce réseau ultraperformant d'instruments d'observation aura notamment la capacité d'observer la coalescence¹ de trous noirs binaires dans des galaxies éloignées et de fournir des informations sur la direction de la source.

Ce dossier présente l'état actuel de Virgo et de la recherche sur les ondes gravitationnelles, ainsi que les projets du futur proche. Le principe de fonctionnement de Virgo est expliqué dans la brochure EGO/Virgo (ci-jointe) et le DVD « VIRGO au LAPP, à la recherche des voix de l'Univers »².

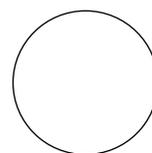
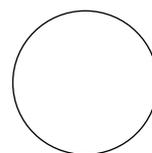
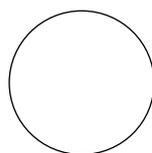
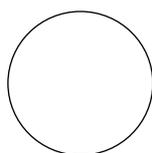
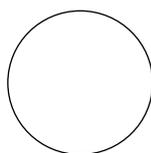
Les objectifs scientifiques

Les ondes gravitationnelles sont des déformations de l'espace temps générées par des processus violents impliquant l'accélération de masses gigantesques. Les sources typiques de ces ondes sont les explosions de supernovae ou de deux corps compacts, tels les trous noirs ou les étoiles à neutrons qui décrivent une orbite rapprochée avant leur fusion finale. L'émission d'ondes gravitationnelles est prédite par la théorie générale de la relativité d'Albert Einstein. À ce jour, seuls les effets des émissions d'ondes gravitationnelles ont été observés. Cette preuve indirecte de l'existence des OG - l'observation d'un système de deux étoiles à neutron par Joseph Taylor et Russel Hulse - a été récompensée par le prix Nobel de physique en 1993. La première observation directe d'ondes gravitationnelles aura la plus haute importance : elle enrichira le champ de l'astronomie gravitationnelle et permettra d'approfondir notre compréhension de la gravitation et de la relativité générale.

Il est difficile de prédire combien d'ondes gravitationnelles seront détectables, dans un laps de temps donné, soit parce que leur force est inconnue (par exemple dans le cas où elles sont générées par des supernovae), soit parce que le nombre de sources reste difficile à estimer (par exemple le nombre de systèmes binaires de trous noirs). Les ondes gravitationnelles sont un nouveau champ de recherche dont de nombreuses facettes restent encore à découvrir. Le détecteur Virgo initial observera quelques occurrences par an dans le meilleur des cas, tandis que les détecteurs de nouvelle génération devront en observer plusieurs, voire des centaines par an.

1 lorsque deux trous noirs attirés l'un vers l'autre finissent par se réunir

2 Pour en savoir plus sur ce film, contacter Nathalie Lambert, CNRS Image, 01 45 07 56 92]





Les ondes gravitationnelles ne devraient avoir que des conséquences ténues sur Terre. Elles se manifesteront par des distorsions des bras de Virgo, de l'ordre d'un milliardième du diamètre d'un atome (10^{-18} mètre). Pour détecter des changements si infimes, le détecteur fait appel aux technologies les plus avancées, dans les domaines de la métallurgie, de l'optique, des systèmes de contrôle, de l'informatique, de l'analyse de données etc.

Le détecteur Virgo

Le détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo est essentiellement un interféromètre laser de Michelson constitué de deux bras orthogonaux de trois kilomètres de longueur. Les réflexions multiples entre les miroirs disposés aux extrémités de chaque bras augmentent la distance effective de mesure de chaque bras pour atteindre 120 kilomètres de longueur.

Virgo est sensible aux ondes gravitationnelles dans un domaine de fréquence allant de 10 hertz à plusieurs kilohertz. Ce domaine de fréquence, ainsi que la sensibilité très élevée de Virgo, devrait permettre de détecter des ondes gravitationnelles générées par les supernovae et par la coalescence de systèmes binaires dans la Voie lactée et dans les galaxies proches, par exemple dans l'amas de la Vierge (dont Virgo tire son nom).

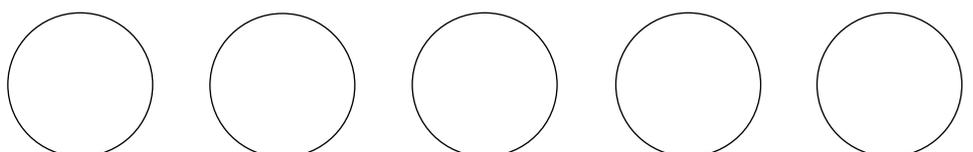
Pour atteindre l'extrême sensibilité requise pour la détection des ondes gravitationnelles, l'interféromètre est proche de la perfection optique et il est extrêmement bien isolé du reste du monde. Les techniques les plus sophistiquées sont à l'œuvre dans le domaine des lasers ultra stables de haute puissance, des miroirs à réflectivité élevée, de l'isolation sismique et du contrôle de position et d'alignement.

Quant à l'optique, Virgo utilise une nouvelle génération de lasers ultra stables et les oscillateurs les plus stables jamais construits. Une unité de traitement optique construite spécialement à Lyon a produit des miroirs de haute qualité combinant la réflectivité la plus élevée (plus de 99,999 %) à une qualité de surface extrême.

Pour éviter les mouvements parasites des éléments optiques dus au bruit sismique, chacun d'eux est isolé à l'aide d'un pendule composite de dix mètres de hauteur. La présence d'un gaz résiduel étant susceptible de perturber légèrement les mesures, le faisceau lumineux doit se propager dans l'ultra vide. Les deux tubes de trois kilomètres de longueur et de 1,2 mètre de diamètre sont les plus grands récipients sous vide en Europe et les deuxièmes dans le monde. L'environnement de l'interféromètre Virgo est ainsi plus calme que celui d'un vaisseau spatial en orbite autour de la Terre.

La collaboration Virgo et EGO

La collaboration Virgo est le groupe d'ingénieurs et de scientifiques des différents laboratoires qui ont conçu, construit, exploitent aujourd'hui l'interféromètre Virgo et analysent les données qu'il produit. Constituée à l'origine de groupes français et italiens, la collaboration a récemment intégré en son sein un groupe de chercheurs néerlandais et





compte aujourd'hui 150 personnes provenant de 12 laboratoires différents. Elle continue de se développer.

EGO (European Gravitational Observatory) a été créé en 2001 pour accueillir Virgo et permettre sa mise en service et son exploitation. EGO a le statut d'un consortium, financé à parts égales par le CNRS et l'Institut national de physique nucléaire italien (INFN) afin de répondre aux besoins en infrastructure de l'exploitation de Virgo et de promouvoir la collaboration dans le domaine de la recherche gravitationnelle en Europe.

Entre la collaboration Virgo et le personnel d'EGO, 180 scientifiques travaillent actuellement sur le projet Virgo.

1993 – 2007 : de la construction à l'exploitation scientifique

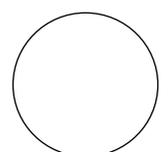
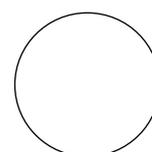
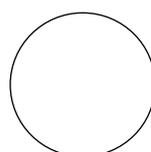
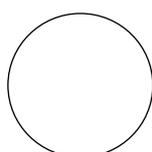
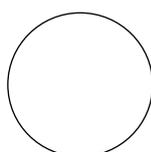
La construction de Virgo, soutenue par le CNRS et l'Institut national de physique nucléaire italien (INFN) depuis 1993, a commencé sur le site de Cascina près de Pise en 1996 et s'est achevée en juin 2003. Elle a été suivie d'une phase destinée à activer et à régler l'ensemble des systèmes de contrôle de ce détecteur unique en son genre et à diminuer au minimum le niveau de bruit du détecteur.

Aujourd'hui, la sensibilité du détecteur Virgo est particulièrement intéressante dans les basses fréquences dans lesquelles il est le meilleur détecteur au monde, alors que pour les autres fréquences, les capacités de Virgo se rapprochent de celle des détecteurs LIGO. Virgo est par exemple sensible à la coalescence de deux trous noirs de dix masses solaires situés à 100 millions d'années lumières (plus loin que l'amas de la Vierge). Cette réussite ouvre la voie à une période de prise de données en commun avec LIGO.

La première phase d'exploitation scientifique a commencé le 18 mai 2007. Une fois lancé, Virgo va fonctionner de jour comme de nuit, constamment à l'écoute des signaux gravitationnels provenant de tout l'Univers. Une équipe d'opérateurs et de scientifiques exploite et surveille l'instrument 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. Les signaux sont détectés, enregistrés et font l'objet d'une première analyse à l'aide d'un système informatique en ligne. Ces données sont ensuite mises à la disposition de la communauté scientifique pour une étude ultérieure plus avancée.

LIGO

Le *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (LIGO) est l'autre grand instrument de détection des ondes gravitationnelles. Il se compose de deux installations très éloignées l'une de l'autre, situées aux Etats-Unis, qui fonctionnent à l'unisson comme un observatoire unique. Il y a deux interféromètres à Handford (Washington), avec des bras de deux et quatre kilomètres de longueur, et un interféromètre à Livingston (Louisiane), avec des bras de quatre kilomètres de longueur.





LIGO est financé par la *National Science Foundation (NSF)* et a été conçu et construit par une équipe de scientifiques du *California Institute of Technology* et du *Massachusetts Institute of Technology*, avec la contribution de l'Université de Floride et en collaboration avec des industriels. Sa construction s'est achevée en 1999. Après plusieurs années d'essais, les interféromètres LIGO ont commencé leur première longue phase d'exploitation scientifique à l'automne 2005. Celle-ci prendra fin en septembre 2007. Les instruments seront alors remis à niveau, comme ceux de Virgo au même moment.

La collaboration scientifique LIGO regroupe 560 ingénieurs et chercheurs de 11 pays. Elle analyse les données et établit les priorités scientifiques ainsi que les programmes de recherche de LIGO.

GEO

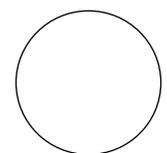
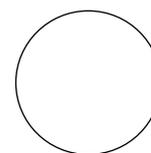
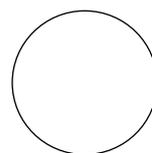
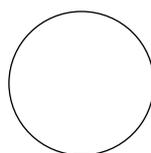
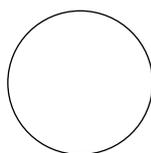
Le détecteur interférométrique à laser GEO (dont le nom complet est GEO600) est exploité dans la région de Hanovre par une collaboration germano-britannique. Il fait partie de la collaboration scientifique LIGO, dont il constitue le quatrième détecteur. GEO a recueilli des données en même temps que les trois autres détecteurs de LIGO, lors de la plupart des périodes d'exploitation depuis 2002. Avec ses bras de 600 mètres de longueur, GEO est une sorte de laboratoire expérimental pour les améliorations techniques de la prochaine génération de détecteurs d'ondes gravitationnelles. GEO sera mis à niveau et deviendra GEO-HF (*High Frequency*) en 2009, ce qui améliorera sa sensibilité, surtout dans le domaine des hautes fréquences.

GEO est financé conjointement par la Max Planck Gesellschaft, le ministère allemand de la science et de l'éducation, la Fondation Volkswagen et la *Science and Technology Facilities Research Council* au Royaume-Uni.

L'accord LIGO/VIRGO

LIGO et VIRGO poursuivent un objectif commun, à savoir la détection des ondes gravitationnelles générées par des événements astrophysiques. Ces événements atteignent tous les détecteurs quel que soit leur emplacement, puisque les OG ne sont pas arrêtées par la Terre. Toutefois la réponse des différents détecteurs et les temps d'arrivée observés dépendront de la localisation de la source. Par conséquent, les données combinées fourniront davantage d'informations sur la position de la source que chaque projet individuel. En outre, la combinaison des données récoltées augmentera les chances de trouver les premières ondes gravitationnelles et apportera une plus grande fiabilité aux détections ultérieures.

Début 2007, la collaboration LIGO (comprenant GEO) a signé un accord avec VIRGO afin de rechercher en commun les ondes gravitationnelles. L'accord prévoit un partage complet des données, qui a commencé le 18 mai avec la première phase d'exploitation scientifique de Virgo. Il prévoit également une analyse commune, comme si les données provenaient d'un détecteur unique constitué de plusieurs sondes réparties sur les deux rives de l'Atlantique et





sur la côte est du Pacifique. Les données seront ainsi statistiquement plus significatives et plus fiables.

La première réunion LIGO/VIRGO a eu lieu à Baton Rouge, en Louisiane, du 17 au 22 mars 2007, tandis que la seconde se déroule à Cascina, du 21 au 25 mai. Elle porte sur les résultats des essais de mise en service, les améliorations futures du détecteur et les analyses de données effectuées lors de précédentes périodes d'exploitation.

L'avenir de Virgo

Pour la première fois, la première génération de détecteurs interférométriques a une chance de détecter les ondes gravitationnelles. Néanmoins, le taux d'événements détectables attendu sur la base des modèles de populations astrophysiques est très faible : dans le scénario le plus optimiste, on s'attend à ne détecter que quelques événements de coalescence binaire d'étoiles compactes par an. Donc, même dans le cas d'une première détection réussie, ces détecteurs n'ouvriront pas encore l'ère de l'astronomie gravitationnelle.

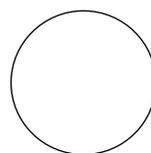
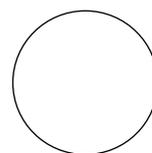
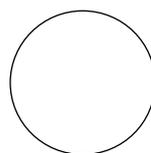
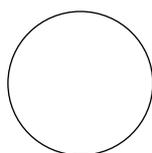
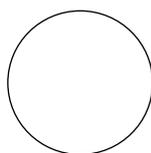
Des mises à niveau du détecteur, nommées *Virgo+* et *Advanced Virgo*, devraient améliorer sa sensibilité d'un facteur 1000. Des mises à niveau similaires sont prévues pour LIGO.

Virgo+ est la première étape de mise à niveau de Virgo. La puissance du laser sera augmentée de 20 à 50 watts. De nouveaux miroirs suspendus par des fibres en silice et un système de compensation thermique seront installés. L'électronique sera améliorée. La configuration optique de l'interféromètre ne sera pas modifiée. Ces améliorations modestes ne devraient nécessiter qu'une période d'essais limitée en 2009.

Le facteur d'amélioration de la sensibilité est approximativement de trois, ce qui correspond à une probabilité de détection 30 fois supérieure à l'actuelle. *Enhanced LIGO* se déroulera en même temps. Puis viendra une longue période de prise de données.

Advanced Virgo est un ensemble de mises à niveau majeures visant à atteindre une sensibilité 10 fois supérieure à la sensibilité nominale de Virgo, soit à une augmentation du taux d'événement de près de 1000 fois. Ceci requiert des modifications importantes telles l'élévation de la puissance du laser à 200 watts, la modification de la géométrie optique et de la topologie de l'interféromètre. La configuration d'*Advanced Virgo* est toujours à l'étude, avec une date butoir pour le démarrage de l'installation fixée à 2011.

Un programme similaire, *Advanced LIGO*, devrait être réalisé dans les mêmes délais. Dans les deux cas, des modifications significatives des éléments optiques sont prévues. En outre, le système d'isolation sismique de LIGO sera entièrement reconstruit pour diminuer le début de la bande de fréquence d'observation à environ 10 hertz, une valeur qui coïncidera aux performances de l'isolation sismique de Virgo. Les interféromètres avancés devraient être opérationnels d'ici 2013 ou 2014.





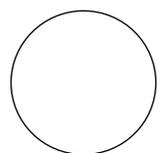
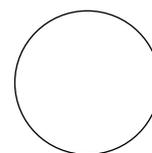
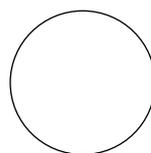
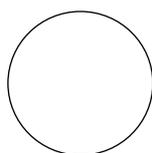
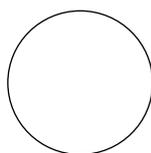
Les interféromètres de troisième génération

Le concept d'un détecteur de troisième génération est déjà à l'ordre du jour, dans le cadre du programme européen ILIAS, avec la participation des scientifiques des projets GEO et Virgo. Une étude du septième programme cadre de recherche et développement de l'Union européenne doit identifier les technologies et les caractéristiques nominales qui pourraient déboucher sur une sensibilité de plus de 100 fois supérieure à celle des instruments de première génération (Virgo et LIGO) et couvrir la totalité de la plage de fréquence observable du sol, de 1 hertz à 10 kilohertz environ. Ceci multipliera le volume observable de l'Univers, et par conséquent le taux d'événement, par un facteur de plus de un million.

Cette tâche sera réalisée en combinant les découvertes majeures dans le domaine de la science des mesures pour construire un nouvel observatoire qui sera probablement souterrain. La création d'un tel détecteur d'ondes gravitationnelles de troisième génération est une tâche colossale. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'accomplir des progrès dans de nombreux domaines : les lasers de haute puissance capables d'émettre des centaines de watts de puissance continue ; les nouvelles techniques d'amplification des signaux ; l'interférométrie à optique diffractive ; le refroidissement cryogénique des éléments optiques critiques ; les techniques d'isolation des vibrations et les suspensions monolithiques pour les éléments optiques.

Les détecteurs à barres résonnantes

Il existe en Europe une longue tradition et un excellent savoir-faire dans le développement de détecteurs d'ondes gravitationnelles. Il y a 10 ou 15 ans, l'Europe occupait le premier rang dans ce domaine. Aujourd'hui, plusieurs détecteurs d'ondes gravitationnelles de première génération sont toujours en activité en Europe. Trois d'entre eux sont des détecteurs à barres résonnantes cryogéniques (AURIGA, EXPLORER et NAUTILUS) exploités par l'Institut national de physique nucléaire en Italie (Frascati (Rome) et Legnaro (Padoue)) et au CERN. Leur sensibilité demeure toutefois limitée comparée aux performances récentes des nouveaux détecteurs à interféromètres tels que Virgo.





La contribution des laboratoires du CNRS à Virgo

Cinq laboratoires du CNRS font partie de la collaboration Virgo :

- le laboratoire Astrophysique relativiste, théories, expériences, métrologie, instrumentation, signaux (ARTEMIS – CNRS/Observatoire de la Côte d’Azur, à Nice).
- le Laboratoire d’Annecy-le-Vieux de physique des particules (LAPP-CNRS/Université de Savoie, à Annecy-le-Vieux).
- le Laboratoire de l’accélérateur linéaire (LAL - CNRS/Université Paris-Sud 11, à Orsay)
- le laboratoire de Spectroscopie en lumière polarisée (SLP – CNRS/ESPCI/Université Paris 6, à Paris)
- le Laboratoire des matériaux avancés (LMA – CNRS, à Villeurbanne)

D’autres laboratoires du CNRS ont des activités liées à Virgo, car ils travaillent sur les ondes gravitationnelles, notamment :

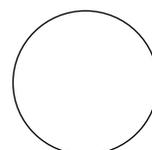
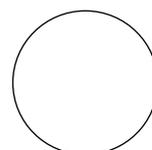
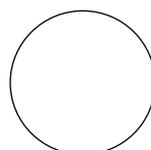
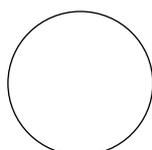
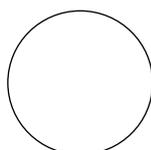
- le Laboratoire Univers et théorie (LUTH - CNRS/Observatoire de Paris/Université Paris VII)
- l’Institut d’astrophysique de Paris (IAP – CNRS/Université Paris VI)

ARTEMIS : Le laser de puissance et la simulation numérique

Les chercheurs d’ARTEMIS ont posé les bases du projet VIRGO, engagé la coopération franco-italienne depuis les années 1980 et participé à la direction du projet, de 1993 jusqu’à la mise en place du consortium EGO en 2001.

Ils ont réalisé le laser de puissance ultra-stable, composant essentiel des antennes gravitationnelles, ainsi que les boucles d’asservissement qui le stabilisent. Il s’agit du système qui génère la lumière et qui l’injecte dans l’interféromètre. Leur expertise réside dans ce type de laser. Ils ont d’ailleurs défini le concept de laser ultra-stable utilisé dans les projets analogues (LIGO et GEO). Leur deuxième expertise concerne la simulation numérique de systèmes optiques complexes. Ils ont développé un programme informatique pour l’établissement du cahier des charges des optiques, (également repris dans LIGO et GEO) et pour la caractérisation optique de l’instrument. Enfin, ils contribuent au système d’analyse des données, en produisant des gabarits (filtres permettant de dégager le signal du bruit de fond) et en développant la recherche sur le fond gravitationnel stochastique (le « bruit de fond » gravitationnel).

Les chercheurs d’ARTEMIS travaillent également sur les améliorations futures de l’actuel interféromètre, ainsi que sur la prochaine génération d’instruments. Ils développent des





modèles théoriques et numériques relatifs aux problèmes thermiques, ainsi qu'un système laser innovant utilisant la technologie des fibres optiques.

Contact :

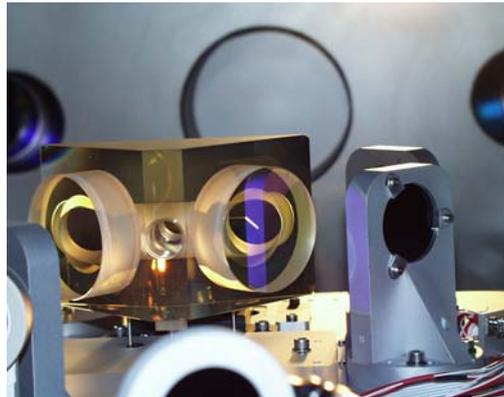
Nary Man

T 04 92 00 31 89/ 30 66

man@oca.eu



Sur cette table, appelée « banc lasers », se trouvent des lasers de puissance de 20 Watts avec leurs stabilisations. © CNRS Photothèque/EGO-VIRGO / BARILLE R.

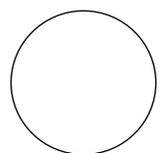
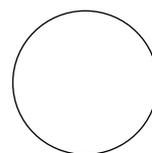
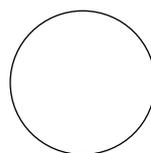
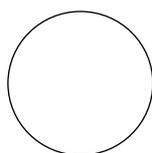
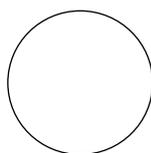


Dièdre de très belle qualité optique contenant deux des trois miroirs permettant de nettoyer le faisceau laser. © CNRS Photothèque/EGO / MAN Catherine-Nary

LAPP : L'enceinte à vide, le système de détection et d'acquisition de données

Le groupe du Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules a participé à la conception et à la construction de Virgo, depuis 1990, à travers plusieurs contributions :

- Il a conçu et fait réaliser les enceintes à vide qui abritent les suspensions et les miroirs de l'interféromètre. L'ultra-vide qui y règne élimine les perturbations que l'air introduirait sur la propagation du faisceau laser, isole les miroirs des perturbations acoustiques et les maintient dans un environnement propre, ce qui est indispensable à la préservation de leur qualité. Les enceintes à vide sont constituées de plusieurs compartiments dont certains se transforment en salle blanche et peuvent être chauffés pour améliorer la qualité du vide. L'inox des enceintes a également subi un traitement thermique spécifique.
- Il a conçu, développé et mis en œuvre le système de détection permettant de mesurer les signaux issus de l'interféromètre. Il s'agit d'un ensemble d'éléments optiques et électroniques (en partie sous vide), notamment une cavité optique triangulaire pour sélectionner la composante porteuse de signal dans le faisceau sortant du détecteur et des photo-détecteurs pour mesurer la puissance lumineuse.
- Il a élaboré une partie des asservissements ainsi que le système d'acquisition des données de l'expérience, qui permet d'enregistrer les différents signaux importants pour la mesure proprement dite et pour contrôler l'état du détecteur. Ce système traite aujourd'hui près de 4000 paramètres en temps réel, correspondant à un volume de données de plus de





20 mégaoctets à la seconde soit le contenu d'un CD toutes les 30 secondes. Il intègre un système GPS pour dater avec précision les signaux enregistrés.

- Les chercheurs ont contribué au développement de plusieurs logiciels, par exemple pour définir le format des données utilisées par tous les détecteurs d'ondes gravitationnelles dans le monde et visualiser les signaux enregistrés, ou encore simuler le fonctionnement du détecteur.

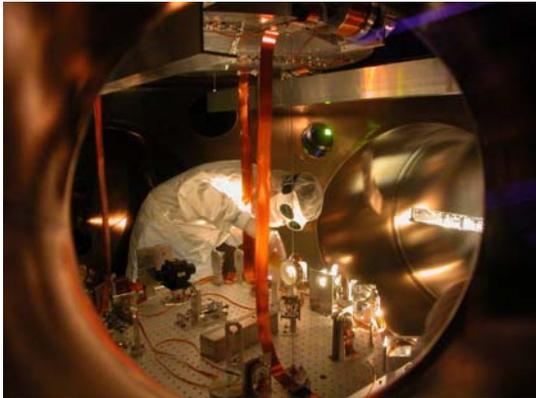
- Enfin ils sont impliqués dans l'analyse des données avec en particulier la recherche de signaux provenant de la coalescence de systèmes binaires d'étoiles à neutrons ou de trous noirs.

Contact :

Frédérique Marion

T 04 50 09 16 73

Frederique.Marion@lapp.in2p3.fr



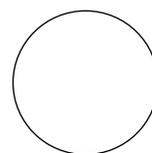
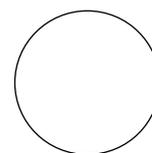
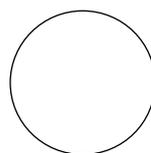
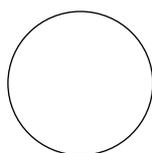
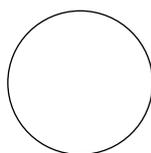
Banc de détection de l'interféromètre VIRGO (Cascina, en Italie). Ce banc suspendu, installé dans une enceinte à vide, supporte une cavité optique qui filtre le faisceau laser sortant de l'interféromètre. Le faisceau filtré sort de l'enceinte à vide par la fenêtre horizontale située à la droite de la photo pour être détecté par un réseau photodiodes. © CNRS Photothèque/EGO-VIRGO/JOURNET Laurent



Vue générale du hall central de l'expérience VIRGO. Chaque tour correspond à un élément optique de l'interféromètre. © CNRS Photothèque/EGO-VIRGO

LAL : L'enceinte à vide, les pièges optiques, le contrôle global et les réseaux informatiques

Le Laboratoire de l'accélérateur linéaire participe à VIRGO depuis 1991. Fort de ses compétences dans le domaine des grands détecteurs de la physique des particules et des accélérateurs, le LAL a pris en charge de larges pans de la conception, puis de la construction de l'expérience. En parallèle, le groupe de physiciens du LAL a joué un rôle déterminant dans la préparation de l'analyse des données, en développant des algorithmes de filtrage robustes et performants, destinés à extraire les faibles signaux d'ondes gravitationnelles noyés dans le bruit résiduel de l'instrument, et en participant activement à la mise en place de l'architecture informatique du traitement, du stockage et de l'accès aux données au Centre de calcul du CNRS/IN2P3 à Villeurbanne.





Parmi les réalisations techniques majeures, qui ont mobilisé jusqu'à 30 scientifiques, citons :

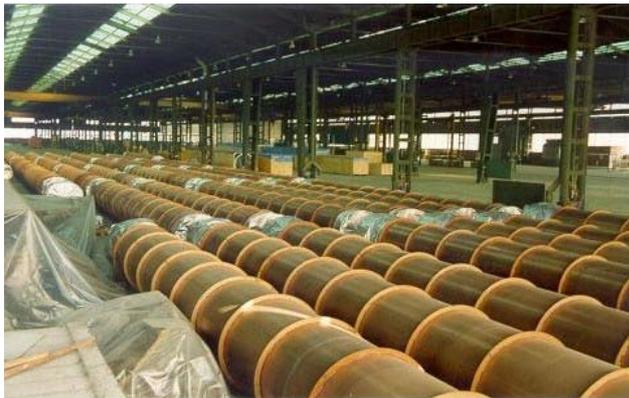
- la conception et le suivi industriel de la réalisation en France de l'enceinte à vide des deux bras de trois kilomètres de l'interféromètre, d'un volume total de 6000 mètres cube, le plus important d'Europe, dans des conditions d'ultravide rigoureuses imposées par le respect de la propreté des optiques ;
- le contrôle-commande du système de pompage de toutes les parties de l'instrument ;
- l'étude et la réalisation de pièges optiques destinés à lutter contre la lumière laser diffusée (même si cet effet est faible, il représenterait un danger de pollution de la pureté des faisceaux principaux de l'interféromètre) ;
- le contrôle-commande des lasers et de leur optique associée ;
- le contrôle global de l'interféromètre, la pièce majeure de pilotage des miroirs pour amener et maintenir l'interféromètre à son point de fonctionnement optique. Ce point est atteint lorsque toutes les cavités optiques sont en état de résonance maximale et l'interféromètre de Michelson est « sur la frange noire », c'est-à-dire que les faisceaux issus des deux bras interfèrent de façon destructive (le point de sensibilité maximale pour la détection des ondes gravitationnelles) ;
- la réalisation de nombreux logiciels de contrôle en temps réel, de gestion et de communication ;
- la conception et la mise en place des réseaux informatiques kilométriques autour de Virgo.

Contact :

Michel Davier

T 01 64 46 83 85

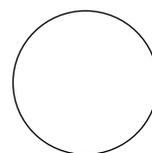
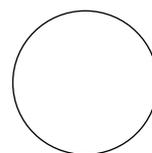
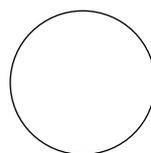
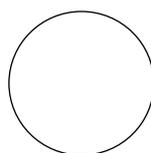
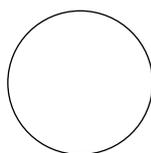
davier@lal.in2p3.fr



Une petite partie des 400 modules de l'enceinte à vide de 6000 mètres cubes de Virgo construits par le LAL, stockée dans un hall en Italie. © EGO.



L'intérieur du tunnel de Virgo avec les modules assemblés et habillés. © CNRS Photothèque/EGO-VIRGO.





SLP – LMA : Les composants optiques

Les composants optiques qui constituent le cœur de Virgo, les grands miroirs et la lame séparatrice, sont certainement les plus parfaits jamais réalisés. Leurs pertes totales (incluant les pertes par absorption, diffusion, biréfringence) sont inférieures à quelques parties par millions, et les facteurs de réflexion de certains de ces miroirs atteignent 0,99995. Ces caractéristiques hors du commun ont nécessité le développement d'instruments de métrologie optique spécifiques ayant des sensibilités 10 à 100 fois supérieures à celles des instruments communément utilisés. Les chercheurs ont conçu et réalisé l'ensemble des instruments qui ont servi à caractériser les matériaux et composants optiques. Les techniques classiques de métrologie n'étant généralement pas adaptées au test de composants aussi parfaits, ils ont conçu des instruments pour la plupart totalement originaux : on citera par exemple un profilomètre absolu (sans référence) qui permet de mesurer la rectitude de profils avec une précision de quelques nanomètres sur trente centimètres, ou encore un réflectomètre utilisé pour comparer l'égalité de deux facteurs de réflexion avec une imprécision de 0,00001. Les activités de métrologie se font en étroite collaboration avec le Laboratoire des matériaux avancés qui réalise les miroirs et où les instruments sont implantés.

Contact SLP :

Vincent Loriette

T 01 40 79 46 04

loriette@optique.espci.fr

Contact LMA :

Jean-Marie Mackowski

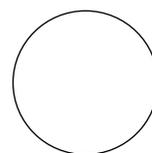
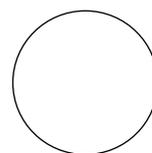
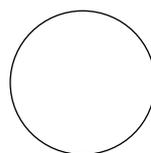
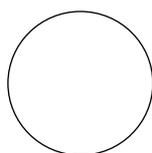
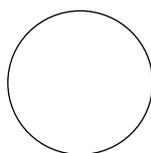
T 04 72 43 26 69

mackowski@lma.in2p3.fr

LUTH - IAP : Les sources d'ondes gravitationnelles

Les chercheurs de l'équipe de relativité numérique du Laboratoire Univers et théories et du groupe de relativité et gravitation de l'Institut d'astrophysique de Paris étudient les différentes sources astrophysiques d'ondes gravitationnelles afin de prédire la forme des signaux qui seront détectés par Virgo. Connaître la forme du signal est *a priori* nécessaire à sa détection, pour l'extraire du bruit instrumental. En effet, contrairement à un télescope optique, l'interféromètre est un détecteur à faible rapport signal sur bruit. La sortie du détecteur est dominée par le bruit de l'instrument et non par le signal, ce qui rend nécessaire une étude approfondie des sources.

Les sources principales d'ondes gravitationnelles mettent en jeu des étoiles à neutrons ou des trous noirs. Ce sont des objets que l'on qualifie de « compacts », c'est-à-dire dont le champ gravitationnel est si intense qu'il ne peut pas être décrit par la théorie de Newton : il faut employer la relativité générale. Les chercheurs du LUTH résolvent les équations de la



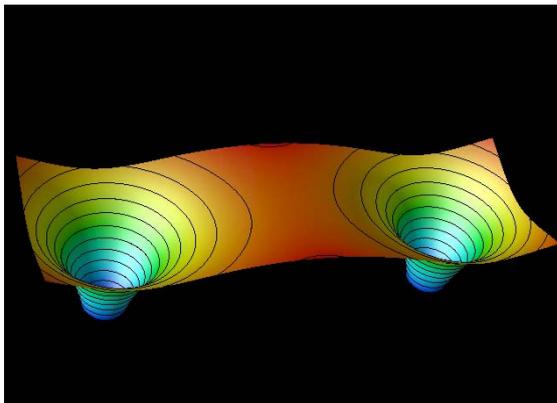


relativité générale (équations d'Einstein) à l'aide d'ordinateurs, grâce à des codes numériques qu'ils ont développés. Ils ont notamment étudié l'émission d'ondes gravitationnelles par des étoiles à neutrons magnétisées (pulsars) ou encore lors d'effondrements gravitationnels d'étoiles massives (phénomène de supernova). Actuellement, ils se focalisent sur les systèmes binaires, de trous noirs ou d'étoiles à neutrons, qui constituent les émetteurs d'ondes gravitationnelles les plus prometteurs pour Virgo.

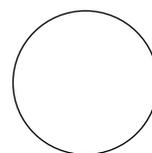
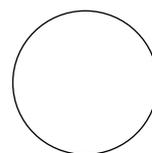
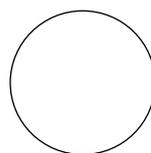
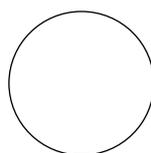
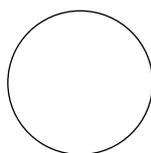
A l'IAP, les études se font analytiquement à l'aide de méthodes d'approximations en relativité générale. Dans le cas des systèmes binaires de trous noirs, le signal d'ondes gravitationnelles a été calculé jusqu'à un ordre très élevé en terme de corrections relativistes dites aussi « post-newtoniennes » (lorsque la vitesse des corps compacts est petite devant la vitesse de la lumière). Tous les détecteurs actuels d'ondes gravitationnelles utilisent les formules post-newtoniennes pour rechercher, et plus tard pour analyser, les ondes gravitationnelles émises par les systèmes de trous noirs.

Contact LUTH :
Éricourgoulhon
T 01 45 07 74 33
eric.gourgoulhon@obspm.fr

Contact IAP
Luc Blanchet
T 01 44 32 81 77
blanchet@iap.fr



Système binaire de trous noirs calculé par résolution numérique des équations d'Einstein. © P. Grandclément, E. Gourgoulhon, S. Bonazzola – CNRS 2007





Les autres expériences sur la gravitation

VIRGO, dont l'objectif est la détection d'ondes gravitationnelles, n'est pas le seul programme de recherche dans ce domaine. Quatre autres expériences, auxquelles participent des laboratoires du CNRS, sont en préparation. Elles visent à mieux connaître les propriétés de la force de gravitation. Elles se dérouleront dans l'espace, laboratoire de prédilection pour des expériences de physique fondamentale car du point de vue instrumental, il élimine certaines des limites liées à l'environnement terrestre.

Microscope

L'objectif du projet est de vérifier que tous les corps en chute libre sont soumis à la même accélération gravitationnelle, quelle que soit leur composition (principe d'équivalence). Actuellement ce principe est vérifié dans des expériences sur Terre, ou en utilisant la mesure laser de distance Terre-Lune. Microscope gagnera un facteur 1000 sur la précision des mesures en utilisant des accéléromètres ultrasensibles développés par l'ONERA, à bord d'un microsattellite du CNES dont le lancement est prévu en 2011. Microscope est un projet de l'ONERA et de l'Observatoire de la Côte d'Azur. Le CNRS est impliqué dans Microscope au travers du Laboratoire Gemini (CNRS/ Observatoire de la Côte d'Azur) pour ce qui est de la mission. D'autres chercheurs travaillent sur la vérification du principe d'équivalence dans plusieurs laboratoires parisiens (www.spectro.jussieu.fr/GREX/). Le CNES et l'ESA sont partenaires.

Contact :

Gilles Metris

T 04 93 40 53 56

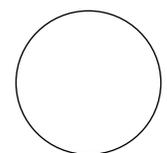
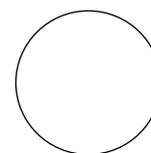
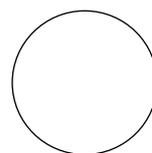
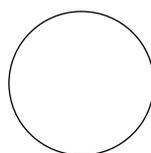
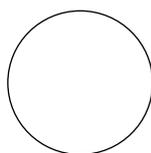
gilles.metris@obs-azur.fr

Pharao

Il s'agit de réaliser une horloge à atomes refroidis par laser en orbite terrestre. Pharao sera placé en microgravité dans la station spatiale internationale. Ce projet permettra de faire des tests très précis de la relativité, en particulier de l'effet Einstein de ralentissement des horloges. Pharao est un projet porté par deux laboratoires du CNRS (laboratoire Système de référence temps-espace CNRS/Observatoire de Paris/Université Paris VI et Laboratoire Kastler Brossel CNRS/ENS/Université Paris VI), cofinancé par le CNRS/INSU, le CNES et l'ESA, dans le cadre de la mission européenne ACES.

Contact :

Christophe Salomon





T 01 44 32 25 10

Christophe.Salomon@lkb.ens.fr

Télémétrie Laser

Cette expérience vise à comparer l'effet de la force de gravitation exercée par le Soleil sur la Lune et sur la Terre, en mesurant les distances entre ces objets avec une très grande précision. Aujourd'hui, la précision atteinte est de quelques millimètres sur la distance Terre-Lune. Les chercheurs sont en passe d'étendre ces mesures à des satellites artificiels, avec T2L2 (système de lien laser). Ils envisagent ensuite des mesures de distance d'objets plus lointains dans le système solaire. Le CNRS participe à cette recherche au travers de la station de télémétrie Laser-Lune de l'Observatoire de la Côte d'Azur (laboratoire Gemini CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur). Cette opération est soutenue par le CNRS/INSU, le CNES et la région PACA.

Contact :

Etienne Samain

T 04 93 40 54 29

etienne.samain@obs-azur.fr

Lisa

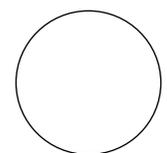
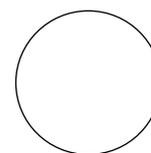
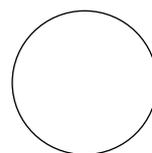
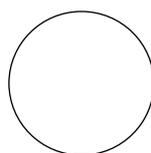
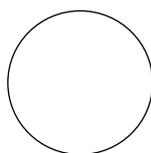
L'observation du rayonnement gravitationnel sur Terre est limitée à une fenêtre de fréquence de 10 hertz à 10 kilohertz, à cause du bruit sismique et de la « petite » taille du détecteur. Lisa est un interféromètre qui sera doté de bras de cinq millions de kilomètres. En orbite autour du Soleil, il devra détecter le rayonnement gravitationnel à des fréquences de 100 microhertz à 100 millihertz, pour lesquelles on connaît mieux les sources potentielles. C'est un projet international soutenu notamment par l'ESA, auquel participent sept laboratoires du CNRS.

Contact :

Eric Plagnol

T 01 57 27 60 84

Plagnol@apc.univ-paris7.fr





Glossaire

EGO	<i>European Gravitational Observatory</i> , un consortium financé par le CNRS et l'INFN qui héberge le détecteur Virgo.
GEO	L'interféromètre germano-britannique. GEO est financé par la <i>Max Planck Gesellschaft</i> (Allemagne) et le <i>Science and Technology Facilities Council</i> (Royaume-Uni)
ILIAS	Une initiative d'infrastructure intégrée financée par l'Union européenne pour produire un projet ciblé, cohérent et intégré visant à améliorer l'infrastructure existante dans le domaine des astroparticules en Europe
INFN	L' <i>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare</i> (Italie), l'une des deux agences de financement de Virgo avec le CNRS
LIGO	<i>Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory</i> .
LSC	<i>LIGO Scientific Collaboration</i> , un groupe de 500 scientifiques provenant d'universités de tous les États-Unis et de huit autres pays qui mènent les travaux de recherche LIGO. Il englobe les membres de GEO.
NSF	La <i>National Science Foundation</i> des États-Unis. La principale agence de financement de LIGO.
PCRD7	Septième programme-cadre qui est le principal outil de financement par lequel l'Union européenne soutient les activités de recherche et développement.
VIRGO	La collaboration Virgo et EGO.
Virgo	Le détecteur Virgo situé près de Pise.

