

# Particules et noyaux dans l'univers

*Cette thématique de recherche, qui s'exerce hors accélérateur, a débuté au laboratoire dans les années 90. Elle traite deux questions fondamentales :*

- la détection directe des ondes gravitationnelles avec un interféromètre géant en construction à Cascina (Italie) dans le cadre d'une collaboration franco-italienne;*
- la recherche d'antimatière dans l'univers avec l'expérience AMS qui sera embarquée sur la station spatiale ISS à l'horizon 2004.*



# Expérience de recherche d'ondes gravitationnelles : VIRGO

## Participation du LAPP

**Physiciens:** B. Mours, D. Buskalic, R. Flaminio, F. Marion, L. Massonnet, R. Morand, D. Verkindt, M. Yvert

**Ingénieurs, Techniciens :** F. Bellachia, D. Boget, F. Cadoux, T. Carron, F. Chollet, G. Daguin, P.Y. David, D. Dufournaud, G. Gaillard, L. Giacobone, C. Girard, R. Hermel, J.C. Lacotte, J.C. Le Marec, B. Lieunard, S. Malosse, A. Masserot, P. Mugnier, R. Sottile

**Visiteurs :** P. Puppo, V. Sannibale

**Doctorants :** L. Derome

**Stagiaires :** B. Bataillou, T. Gourdin, D. Merkel, C. Mugnier, J. Milan

## Collaboration

Collaboration franco-italienne : LAPP Annecy, INFN Florence, INFN Frascati, IPN Lyon, INFN Naples, OCA Nice, LAL Orsay, ESPCI Paris, INFN Perugia, INFN Pise, INFN Rome

## Dates clés

1989 : proposition de réaliser VIRGO

1993 : Accord CNRS/INFN

1996 : Ouverture du chantier à Cascina

2000 : fin d'installation de l'interféromètre central

2002 : fin d'installation de VIRGO

## Abstract

*The construction of a large Michelson Interferometer for the detection of gravitational waves has been decided by CNRS and INFN. The main activities of the Annecy group have been the design of the central building vacuum chamber with the realization of a full scale lower tower prototype in Annecy, the R&D activities for the photodetection system and its associated optical elements, the data acquisition, the calibration and the simulation.*

## L'expérience VIRGO

L'objectif de l'expérience est de mettre en évidence - de façon directe - l'existence des ondes gravitationnelles, prédites 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  $\Delta l$  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).

- la rotation asymétrique d'un objet massif et compact tel qu'une étoile à neutron. 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 car périodique.
- 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.

La mesure d'un changement relatif de distance inférieur à  $10^{-21}$  entre deux points est une expérience délicate envisagée depuis de nombreuses années. L'idée de base du détecteur VIRGO consiste à prendre comme distances de référence les longueurs des bras d'un interféromètre de Michelson. Les élongations asymétriques induites par une onde gravitationnelle dans deux directions X et Y 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 sur la lame séparatrice de l'interféromètre d'environ 1 kW. A plus basse fréquence la sensibilité est limitée par l'agitation sismique et thermique des miroirs.

Cet interféromètre est découplé du bruit environnant en étant suspendu dans l'ultra vide : la suspension de ses composants les découple du bruit sismique, l'ultra vide les isole du bruit acoustique et supprime les perturbations dans la propagation du faisceau lumineux. Des suspensions de plusieurs étages sont installées dans des tours dont la hauteur dépend de la qualité de l'isolation sismique requise. Le composant optique qui représente la charge utile de la suspension est suspendu dans la partie basse de ces tours. Ces bas de tours raccordent les segments constitutifs de l'interféromètre.

La fin de la construction sur le site de Cascina, au voisinage de Pise, et le démarrage de la prise de données sont prévus pour la fin de l'année 2002. L'année 2000 représentera une étape importante dans le processus de mise au point du détecteur: elle correspond à l'achèvement d'une première phase de construction permettant d'entreprendre le test de l'interféromètre, dans une configuration simplifiée par rapport au dispositif final.

## 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,
- les stations de travail, le système d'horloges, les cartes de transmissions numériques, l'imagerie,
- le système d'acquisition de données,
- la calibration de l'interféromètre,
- certains logiciels de l'expérience (simulation, visualisation de données...).

## Activités 97/99

### Enceintes à vide

Les enceintes à vide qui abritent les composants optiques et leurs systèmes de suspension doivent satisfaire un certain nombre de critères : grand volume, rigidité mécanique, transformation en salle blanche lors de l'installation des optiques, qualité du vide (pression  $<10^{-8}$  mbar et absence d'hydrocarbures). Les activités principales du groupe du LAPP ont été :

- Suivi de construction et installation sur le site de la chambre à vide centrale de l'interféromètre. Ceci comprend le suivi de fabrication des multiples composants («bas de tour», tubes de liaison, hublots, système d'étuvage, structure entourant l'enceinte à vide, viroles). L'installation comprend l'assemblage sur le site avec en particulier l'alignement des différents éléments. L'ensemble de la partie ultravide a été étuvé pendant l'été 1999. La pression totale atteinte après étuvage a été de  $8.10^{-10}$  mbar et inférieure à  $10^{-14}$  mbar pour les hydrocarbures.

- Suivi de fabrication et mise en place du système de vide différentiel entre la partie basse et la partie haute de la tour.
- Suite à l'expertise acquise au LAPP, suivi de la définition des salles blanches de l'expérience, participation à l'implémentation dans VIRGO de la procédure de mise en place des miroirs en collaboration avec le groupe de Rome. Etudes et suivi de fabrication des outillages servant à manipuler les objets introduits dans les bas de tour. Réalisation des premières mise en place (banc de détection dans la tour).



Vue partielle de la chambre à vide centrale à Cascina. Au milieu des structures et des fours, on distingue les dômes de quatre bas de tour (du haut vers le bas : tour entrée du bras ouest, séparatrice, recyclage de signal, détection).

### 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 avoir développé et testé au cours des années précédentes un certain nombre de composants optiques tels que la cavité Mode Cleaner, l'accent a été mis pendant les années 97-99 à la réalisation et l'intégration au LAPP de l'ensemble complet du système de détection puis son installation sur le site à la fin de l'été 1999. Les réalisations principales de ces deux années ont été:



Le banc de détection (banc 'externe') installé à Cascina.

- Réalisation de l'ensemble des montures optiques allant sous vide (banc interne).
- Définition et mise en place de l'ensemble des optiques des bancs interne et externe.
- Développement et réalisation de l'ensemble de l'électronique bas bruit et large bande associée aux photodiodes.
- Le développement des programmes temps réel de lecture des cartes électroniques de conversion analogique numérique des signaux produits par les photodiodes.
- Le développement des logiciels de contrôle de l'électronique du banc de détection.
- L'amélioration du système de contrôle de position du banc de détection. Ce système comprend des photodiodes «quadrant» et leur électronique analogique ainsi que des caméras numériques.



*Le banc de détection (banc 'interne') préparé en salle blanche.*

### Composants «standards»

Pour le fonctionnement de l'expérience, un certain nombre de composants «standards» sont fournis par le LAPP. Ils ont rendu nécessaire :

- Le développement du système de distribution de signaux d'horloges (cartes VME et logiciel).
- La fourniture de châssis VME, de processeurs VME et des outils logiciels associés.

- La fourniture de caméras numériques, le développement d'une nouvelle interface VME associée et la poursuite du développement des logiciels correspondants.
- La fourniture du système de vidéo analogique.
- La fourniture des moyens de calcul du site (stations de travail, serveur de fichiers, terminaux).

### L'acquisition des données

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

- Le suivi d'un format de données développé au LAPP qui a été adopté par tous les grands projets de détecteurs d'ondes gravitationnelles (GEO, LIGO, TAMA, VIRGO).
- La réalisation d'un système de lecture des données fonctionnant en continu.
- Le développement du système d'assemblage des données et du système de sélection.
- La mise au point d'un outil de visualisation des données («data display»).

### Logiciels

Enfin, de multiples outils logiciels ont été développés pour préparer l'analyse des données:

- Le programme de simulation a atteint sa maturité. Il est maintenant couramment utilisé pour l'étude des systèmes de contrôle de l'interféromètre ou la génération de données test pour les programmes d'analyse.
- Les préparatifs pour la calibration de VIRGO ont été centrés sur l'étude d'outils logiciels pour corriger les effets instrumentaux et 'reconstruire' la valeur de  $h$ .
- Un environnement d'analyse interactif (Vega) a été développé.
- Un algorithme de recherche de coalescence binaire a été mis au point.

*Liste des publications et communications à des conférences en fin de rapport.*

