

Physique corpusculaire

M. Marcel FROISSART, professeur

COURS : Systèmes effondrés

Le moteur principal de l'effondrement des mondes que nous voyons est celui qui a fait s'effondrer la Tour de Babel : la gravitation.

Il existe une instabilité essentielle de la gravitation, qui va être au centre de ce cours : toute fluctuation de densité a tendance à s'accroître, de façon exponentielle.

Après quelques rappels sur l'origine du *Big Bang*, on aborde une question centrale : comment des régions de l'Univers qui n'étaient pas en relation causale au moment du découplage ont une telle uniformité, comment l'irrégularité actuelle a-t-elle été atteinte ?

Seule une fraction de la matière est baryonique, et parmi celle-ci seule une fraction est visible (étoiles). Toutes ces matières sont non-relativistes (Cold Dark Matter ou CDM), ce qui renforce les petites inhomogénéités et leur permet de s'agréger.

Les constatations en faveur de ce schéma sont : les fluctuations du CMB ; la variation de la constante de Hubble à grand z ; la vitesse de rotation des galaxies ; la distribution des vitesses des galaxies au sein des amas.

Il faut encore pour équilibrer l'Univers introduire une constante cosmologique $\Lambda > 0$.

La matière cachée n'ayant avec la matière ordinaire que des interactions gravitationnelles, elle a commencé à créer les inhomogénéités de l'Univers avant le découplage, par échelles croissantes, de petites condensations de matière cachée (CDM) s'agrégeant pour en donner de plus lourdes.

Un ajustement à 10 paramètres fait par Tegmark et Zaldarriaga donne une courbure due à la matière de $0,24 < \Omega_k < 0,38$, une contribution de la matière noire bornée par $h^2\Omega_{\text{cdm}} < 0,3$, et une constante cosmologique positive.

— La cartographie de l'Univers repose sur la constante de Hubble $H_0 = 100 h \text{ km/s/Mpc}$: on peut mesurer des vitesses de récession par la spectrographie.

Les principales calibrations sont obtenues à partir des Céphéides, étoiles brillantes, jeunes, pulsant avec une période liée avec leur luminosité absolue.

Plusieurs indicateurs secondaires sont calibrés sur les Céphéides : variations de luminosité de surface ; relation de Tully-Fisher ou du plan fondamental ; supernovæ de type Ia, bien calibrées mais rares. Deux projets majeurs de veille permanente pour leur découverte sont en route.

Le grand Nuage de Magellan (LMC), sert de base intermédiaire pour le raccordement de toutes ces échelles ; trop profond, il apporte une incertitude non négligeable.

— Les méthodes indépendantes des Céphéides :

Les satellites dédiés à la mesure des parallaxes (Hipparcos, Gaïa) vont faire faire des progrès considérables aux mesures absolues.

L'effet Sunyaev-Zeldovich est le fait qu'un photon de basse énergie (typiquement un photon du CMB) traversant un gaz chaud (dans un amas, les électrons sont à plusieurs keV) se diffuse et en moyenne acquiert de l'énergie. Ce réchauffement donne l'épaisseur optique absolue. Le rayonnement X reçu de ce gaz d'électrons, dépendant de l'épaisseur optique et de la distance, permet de déterminer la distance.

Le CMB a des variations aléatoires de quelques dizaines de μK , bien supérieures au signal SZ (de l'ordre du μK). Ces deux signaux ont une forme fonctionnelle différente : le CMB suit une loi du corps noir, tandis que le signal SZ s'annule pour $\nu \approx 217$ GHz. On peut obtenir le signal SZ par comparaison à des fréquences différentes.

Des bruits parasites, mal calibrés, ont une amplitude comparable à l'effet SZ. On les minimise en intégrant les signaux selon les harmoniques sphériques, en traitant indépendamment chaque composante multipolaire, ce qui limite la dimension du problème au nombre de fréquences séparables.

Les corrélations d'anisotropie du CMB fournissent des informations sur les masses interposées et leurs distances.

Les effets non-linéaires de la gravitation ont lieu en présence de masses considérables, par exemple d'amas de galaxies. Ils se traduisent par des duplications d'images, des caustiques, sur le fond des galaxies de champ lointaines. L'effet local le plus notable est une déformation quadrupolaire.

L'utilisation des valeurs de l'agrandissement apparent, ou, ce qui revient au même, de la densité des galaxies de fond, supposerait des hypothèses supplémentaires sur la forme de la lentille ou sur celle des objets observés.

La méthode a été appliquée à l'amas Abell 1689, pour lequel on a pu déterminer une distribution de masses. Il a été procédé, sur le télescope de 3,5 m de Calar Alto (Espagne), à 9 analyses avec des filtres sélectionnant soit des raies notables au niveau de l'amas, soit des zones neutres. Le z de chaque galaxie a été déterminé dans l'espace à 9 paramètres ainsi obtenu, par référence à une bibliothèque comprenant 100 types de galaxies, et allant de $z = 0$ à 1,6 par pas de 0,002. Enfin, ce processus a été validé par Monte-Carlo, par déterminations

spectroscopiques sur les galaxies les plus brillantes du champ et par comparaison avec un champ censément vierge, venant de l'exploration en profondeur CADIS-B.

— L'évolution des amas

La cosmologie CDM implique une évolution des amas par accréation successive de petits amas en amas de plus en plus gros. Il est très difficile d'aborder ce problème par des moyens purement analytiques. En comparant par simulation l'évolution d'amas de masses diverses, on constate que plus les amas sont gros, plus ils évoluent lentement. À maturité, on trouve un profil à peu près universel.

On peut ainsi trouver des spectres spatiaux pour les amas, dont les comportements généraux sont très semblables, malgré une diversité d'hypothèses.

— Le spectre des galaxies

C'est le seul observable, mais nous ignorons les processus de formation de galaxies au sein des amas, et la liaison avec le spectre des amas est délicate. Chaque amas paraît dominé par une galaxie massive, qui y biaise la statistique. Il semble que les galaxies les plus lumineuses se forment moins facilement, et qu'elles sont plus jeunes : les gros amas restent plus chauds plus longtemps, et empêchent le gaz de se condenser en galaxies.

— Les trous noirs

Malgré la beauté de la théorie, il faut se demander si l'on dispose d'éléments d'observation en faveur de la réalité de leur existence.

Nous n'avons pas abordé les trous noirs dits primordiaux, qui auraient pu être formés à l'origine de l'Univers, au moment où sa densité était considérable.

— Les trous noirs galactiques

Comment se forme un trou noir, quel rôle exact joue-t-il dans la structuration de la galaxie ?

À l'« âge des quasars » $t = 3 \text{ Ga}$ ($z = 2$), des trous noirs importants fournissent leur énergie. Or les galaxies les plus vieilles sont observées à l'âge de 1 Ga ($z = 5,5$). Quelle est la clef ?

Des simulations numériques de la condensation d'un bulbe de galaxie dans un amas montrent à $z = 3,8$ déjà des accumulations de masse très fortes. On observe une corrélation nette du rapport de la masse du trou noir central à la masse totale du bulbe, avec l'âge spectral de la galaxie.

En outre, le modèle d'accréation qui semble fonctionner à l'échelle stellaire, que l'on connaît mieux, pourrait fonctionner à l'échelle galactique, et expliquer notamment comment le centre de notre Galaxie émet un rayonnement relativement intense dans les bandes X et radio, et faible dans la bande IR. Mais il y a peut-être à cette échelle divers types de phénomènes, qui ne rentrent pas dans un schéma d'explication unique.

— Les trous noirs stellaires

Quand une étoile a brûlé tout son combustible nucléaire, elle s'effondre en éjectant une partie de son écorce. S'il reste moins de la masse de Chandrasekhar

($1, 4M_{\odot}$), elle devient naine blanche, soutenue par la pression de Fermi des électrons.

Sinon, par réaction β inverse, les électrons transforment les protons en neutrons, qui se condensent. L'étoile à neutrons a un rayon de l'ordre du kilomètre, pas beaucoup plus que le rayon de Schwarzschild pour cette masse. Enfin si la masse dépasse substantiellement $3M_{\odot}$, on pense que la matière cède, et que le tout s'effondre dans un trou noir.

— Une démonstration de l'existence de trous noirs stellaires ?

La seule façon définitive de trancher serait de démontrer l'existence d'un horizon : ceci peut être fait en montrant qu'une quantité substantielle de matière tombe sur l'objet compact et disparaît au lieu de rayonner son énergie.

Dans un système binaire proche, où une étoile déverse de la matière sur un corps central, si c'est une étoile à neutrons, l'énergie se dissipe à la surface et est rayonnée ; si c'est un trou noir, rien ne se passe, et la matière franchit l'horizon avec son énergie.

La matière accrétée possède un moment cinétique important. Elle se répartit en un disque de gaz froid. La viscosité dans ce disque répartit le moment cinétique et permet de tomber sur le corps compact, tout en chauffant considérablement. Le bord interne du disque s'évapore, formant une couronne très chaude, émettrice à bas niveau de rayons X durs.

La couronne tombe sur le corps compact, entraînant avec soi une fraction de l'énergie interne, capturée par le plasma (ADAF : Advection Dominated Accretion Flow, flux d'accrétion dominé par d'advection).

Si la masse accrétée par unité de temps augmente, le rayon interne du disque diminue. À partir d'un certain débit critique, l'évaporation dans la couronne n'épuise plus le débit du disque, et le disque s'étend jusqu'à l'objet compact — ou tout au moins jusqu'à la plus petite orbite stable. Ceci correspond à une haute luminosité en X mous, dégradés par la diffusion multiple sur le disque. La matière accrétée est variable, les sources X aussi.

Ces variations sont particulièrement spectaculaires dans le cas de la source X variable Cyg X-1, où l'on a vu des passages d'un état à l'autre en quelques semaines.

Le calcul des transitions de Cyg X-1 par un modèle ADAF est qualitativement correct, pour les transitions dans les deux sens.

La coupure du spectre à haute fréquence donne la température des électrons de plus haute énergie. C'est donc un thermomètre permettant de mesurer et d'interpréter les variations de puissance de façon tout à fait conforme au modèle.

— Le modèle rend bien compte de l'existence de trous noirs

La dispersion des objets dans le plan du rapport des luminosités extrêmes et de la luminosité maximale montre deux populations : l'une, avec un rapport limité, et dans une zone de luminosité maximale faible est interprétée comme

des systèmes à étoile à neutrons, dont la surface rediffuse un minimum d'énergie même dans l'état bas, l'autre est interprétée comme une population à trous noirs, où l'ADAF traverse l'horizon sans incident, ce qui rend la luminosité minimale extrêmement faible, pour des objets intrinsèquement plus lumineux : les trous noirs sont plus lourds que les étoiles à neutrons. On peut donc dire que ce dernier fait établit dans toute la mesure des faits connus l'existence de trous noirs, au centre d'émetteurs X variables.

M. F.

1. Activité du Laboratoire : Introduction

Depuis le milieu de la décennie 90, en particulier sous l'impulsion de *P. Bareyre* et *M. Froissart* qui ont co-dirigé le Laboratoire jusqu'au 30 juin 99, les scientifiques du Laboratoire se sont réorientés exclusivement vers ce domaine en émergence que l'on appelle « astroparticules », domaine frontière entre la physique des particules et l'astrophysique, qui englobe également la cosmologie. Ce recentrage s'est affiné au cours de la dernière année et, compte tenu des forces dont nous disposons, nous pensons avoir atteint un équilibre thématique sinon optimal, du moins séduisant. Cet équilibre doit évidemment s'envisager dans le cadre du futur du Laboratoire. Ce cadre s'est récemment précisé : les thématiques d'« astroparticules et cosmologie » (APC) se retrouvent en effet au cœur du projet scientifique de l'UFR de Physique de l'Université Paris VII dans l'optique de sa refondation sur le site de Paris Rive Gauche-Tolbiac à partir de 2003.

Parmi les points marquants de l'année écoulée concernant le programme scientifique, nous rappelons :

- a) la décision de l'IN2P3 de collaborer avec le CEA à GLAST, sous l'égide du CNES ;
- b) le succès du vol technique d'ARCHEOPS en juillet 99 à Trapani ;
- c) les premiers résultats de CELESTE, sur le site de Thémis, au printemps 2000 ;
- d) l'arrivée des premières cuves de l'observatoire Pierre Auger sur le site argentin de Malargüe, en attendant l'installation complète du *réseau test* d'ici fin 2000 ;
- e) les résultats finals de l'expérience de CHOOZ à l'automne 99.

— Dans ce rapport, nous regroupons les activités scientifiques en 4 chapitres correspondant aux 4 groupes de physique du Laboratoire. En allant des énergies les plus élevées vers les énergies les plus basses, nous rencontrons :

- a) l'étude des rayons cosmiques de très haute énergie ($> 10^{19}$ eV), avec l'expérience AUGER, qui a pris son essor en 1999, avec un financement au niveau du CNRS ;
- b) l'astronomie gamma à haute énergie (10 GeV—10 TeV), avec les expériences CAT et CELESTE, en cours sur le site de Thémis, et les projets HESS (2002, au sol, en Namibie) et GLAST (2005, sur satellite) ;

- c) l'étude des neutrinos et la quête de leur masse via les oscillations ; jusqu'à présent, CHOOZ (étude des neutrinos de réacteurs) et HELLAZ (R & D sur les neutrinos solaires) se complétaient sur ce sujet ; l'expérience CHOOZ étant brillamment finie, et l'IN2P3 ayant pris position sur l'ambitieux mais difficile projet HELLAZ, l'activité se réorientera vers un programme à court et moyen terme sur les neutrinos solaires avec le couplage BOREXINO/LENS ;
- d) la cosmologie observationnelle, avec l'étude du rayonnement cosmologique primordial à 3 K, grâce au ballon ARCHEOPS (2001) et au satellite PLANCK (2007), sans oublier la fin du programme AGAPE (recherche d'événements de microlentille gravitationnelle par la méthode des pixels) avec les observations sur le télescope INT des Canaries.

— Mentionnons enfin une activité sur DELPHI qui se terminera avec l'arrêt du LEP en 2000.

Quelques remarques sur ce programme :

- i) sur chaque thème, nous recherchons un équilibre entre les expériences en cours, qui permettent d'avoir des données à analyser, et la préparation des expériences à venir, qui assurent le futur du Laboratoire ;
- ii) la quasi-totalité des expériences ou des projets se font en collaboration avec d'autres laboratoires, et il s'agit le plus souvent de collaborations internationales ;
- iii) ces 4 thèmes se trouvent au cœur des thèmes scientifiques du futur pôle APC de Paris VII.

Vivant sur le plan scientifique, le Laboratoire l'est également sur le plan structurel, nous l'avons dit en préambule. Le Laboratoire est actuellement une UMR (n° 7553) entre le Collège de France et le CNRS-IN2P3, dont la contractualisation arrive à renouvellement fin 2000. Les contacts pris depuis plus d'un an avec l'Université Paris VII nous orientent, pour la prochaine période quadriennale 2001-2004, vers la création d'une UMR tripartite entre le Collège de France, le CNRS-IN2P3 et l'Université Paris VII en vue du futur pôle APC. Cette orientation a reçu un accord de principe de l'Administrateur du Collège de France, de la direction de l'IN2P3 et de l'Université Paris VII. Elle a été largement discutée (et approuvée) lors de plusieurs conseils de Laboratoire et d'une assemblée générale qui s'est tenue en mars 2000.

Au cours de cette année, 2 thèses ont été soutenues, et il faut souligner l'heureuse surprise de l'arrivée de 5 nouveaux thésards à l'automne 1999, preuve s'il en fallait du dynamisme et de l'attrait que constituent à la fois nos équipes et nos thématiques scientifiques. Parmi les bonnes nouvelles, rappelons le recrutement d'un chercheur CNRS à l'automne 99, *J. Delabrouille*, affecté dans le groupe de cosmologie observationnelle pour travailler sur le rayonnement cosmologique primordial. Je voudrais également dire quelques mots du nouveau fonctionnement du service de mécanique. Anticipant le départ des 2 IR en mécanique (*A. Diaczek* en janvier 2000 et *D. Marchand* en juin 2000), la direction du Laboratoire avait

depuis longtemps demandé à l'IN2P3 le recrutement d'un IR pour diriger le service de mécanique. Après de longues discussions, liées au souhait de l'IN2P3 de rapprocher les services de mécanique du Laboratoire et du LPNHE de Jussieu, nous sommes arrivés à un compromis : *D. Imbault*, qui dirige le service de mécanique de Jussieu, a pris également la direction de celui du Laboratoire depuis le 1^{er} avril 2000 et partage son temps entre les deux laboratoires ; un IR en mécanique arrivera au Laboratoire en septembre 2000 ; des réunions régulières de concertation entre les directions des deux laboratoires se sont mises en place.

Le Laboratoire comprend aujourd'hui 26 physiciens, 44 ITA, 9 doctorants et 6 post-doctorants ou visiteurs étrangers. Le personnel est pour l'essentiel CNRS. Au Collège de France appartient un professeur, 2 maîtres de conférences et 6 IPTARF. En outre, le directeur est mis à disposition par le CEA et un maître de conférences à Paris 6 effectue son service de recherche au Laboratoire. Il y a trois services techniques au Laboratoire, ainsi qu'un service administratif, un service intérieur et une équipe de bibliothèque et documentation. Le service de mécanique comprend 9 personnes (dont un IR en cours de recrutement), le service d'électronique 11 personnes et le service d'informatique 10 personnes. *G. Tristram* assure la coordination de ces trois services.

Il n'y a pas eu de journées du Laboratoire comme celles organisées à Saint-Malo en décembre 1998. Avec le rythme biennal traditionnel de ces réunions, le Laboratoire se retrouvera au début de 2001 dans un lieu encore à préciser.

Daniel Vignaud, Directeur du Laboratoire.

2. Observatoire Pierre Auger

L'étude des rayons cosmiques est essentielle pour la compréhension des mécanismes astrophysiques à l'œuvre dans l'univers. Durant les trois dernières décennies, plusieurs de ces rayons d'énergie supérieure à 10^{19} eV ont été observés par divers détecteurs. L'arrivée dans l'atmosphère terrestre de particules ou de noyaux ayant une énergie aussi énorme reste inexplicée, et il est nécessaire, pour comprendre ce phénomène, de mesurer avec précision la distribution en énergie des particules, leur direction et de déterminer leur nature.

2.1. Description du dispositif

Le flux de ces particules, extrêmement faible, est estimé à $0,02/\text{km}^2/\text{an}$. L'obtention d'une centaine d'événements par an exige donc un détecteur couvrant une très grande surface au sol.

Depuis 1992, une collaboration internationale de taille régulièrement croissante s'est fixé pour objectif de concevoir et réaliser un détecteur en vue de déterminer la nature et l'origine de ces rayons d'énergie extrême. Le travail effectué est décrit dans un *rapport de conception* du détecteur, régulièrement mis à jour à

mesure que les options techniques s'affinent et que le champ d'investigation physique du projet s'élargit.

L'Observatoire Pierre Auger sera un détecteur *hybride*, constitué de deux réseaux géants (d'environ 3 000 km² chacun) et d'un ensemble de télescopes à fluorescence (du type « Fly's Eye ») ayant la même couverture géométrique que le réseau. Chacun des réseaux est constitué d'environ 1 600 *stations locales* (cuves remplies d'eau dans lesquelles les particules sont détectées par leur rayonnement Cerenkov) espacées de 1,5 km et formant un maillage triangulaire.

La difficulté majeure de ce projet est sa grande taille. Le coût exclut de relier par câbles les 1 600 stations. Il les faut autonomes, ce qui implique :

- l'alimentation électrique solaire, imposant l'économie énergétique,
- l'échange d'informations entre stations par voie hertzienne,
- l'utilisation du système GPS pour déterminer à 10 ns près le temps d'arrivée des particules.

2.2. Construction de l'Observatoire

L'origine de ces rayons cosmiques étant inconnue, il faut associer deux sites pour couvrir tout le ciel. Avec la technique choisie, sensible aux gerbes d'incidence quelconque, les deux sites doivent se situer entre 35° et 40° de latitude Nord et Sud. Ainsi le site austral peut explorer à fond la direction du centre de la Galaxie, et le site boréal les directions extra-galactiques. Tout effet, même faible, lié à la latitude galactique pourra donc être perçu.

Enfin, le site Sud sera le premier détecteur majeur de rayons cosmiques de hautes énergies dans cet hémisphère.

Les sites, choisis sur des critères topographiques, atmosphériques, physiques, et de soutien scientifique et économique, sont ceux de Malargüe, dans la province de Mendoza (Argentine), et de Millard County dans l'Utah (USA).

Nous commençons donc par le site austral, accepté en 1999, et dont le plan de financement s'étend sur les années 1999-2003. En 2000-2001 sera construit le *réseau test*, de surface comparable au plus grand réseau actuel (AGASA au Japon). Il comprendra une quarantaine de stations locales, la station centrale, un détecteur de fluorescence et 2 stations de télécommunications. Ce seront encore des prototypes. De 2001 à 2003, l'observatoire austral sera mis en place. Sa modularité nous permettra d'avoir des données d'intérêt physique à partir de l'année 2001.

La collaboration est, à ce jour, forte de 50 institutions de 19 pays. La participation française, largement pluridisciplinaire, regroupe des laboratoires liés à 4 départements du CNRS. Elle est présente dans ce projet depuis ses origines, et Paris a vu plusieurs réunions générales ou activités décisives, depuis 1995.

Soulignons notamment que l'initiateur et principal animateur du projet, le Professeur *J. W. Cronin*, a été titulaire de la Chaire Internationale du Collège de France cette année.

2.3. Réalisations du Laboratoire

Les activités du Laboratoire, au sein de cette collaboration, portent essentiellement sur :

i) **Simulation des gerbes** de haute énergie. Simulation délicate en raison du nombre de particules constituant les gerbes, et des énergies disponibles dans les premières interactions, situées bien au-delà du domaine accessible expérimentalement auprès des accélérateurs. Nous essayons de réduire les problèmes de multiplicité et à rendre pratique l'utilisation de divers modèles d'interactions. Il reste à affiner l'influence des fluctuations dans chaque cas.

Parmi les études effectuées, nous pouvons encore citer :

— l'effet Landau-Pomeranchuk-Migdal, qui réduit les interactions électromagnétiques effectives. Selon les premiers résultats, la méthode de discrimination entre photons et hadrons primaires devra être modifiée,

— l'effet du champ géomagnétique sur la propagation des gerbes, pour une meilleure distinction entre protons et noyaux primaires.

ii) **Contrôleur de stations locales.** La principale responsabilité technique du Laboratoire est le contrôleur de chaque station locale, centre névralgique du système d'acquisition du réseau. Le Laboratoire a la responsabilité, pour l'ensemble de la collaboration, de sa conception, de sa construction et de la réalisation de son logiciel.

Un premier prototype du contrôleur a été construit et testé et une première version du logiciel d'acquisition y a été installée.

iii) **Mesure du temps d'arrivée** des particules de la gerbe. Nous avons participé à la conception et à la réalisation de cet équipement, qui est sous la responsabilité du laboratoire du *Temps et des Fréquences* de l'Observatoire de Besançon. De plus, nous devons réaliser un ASIC (Application-Specific Integrated Circuit, circuit intégré spécifique à une application) rassemblant toutes les fonctionnalités de cette carte en un seul composant. Cet ASIC équipera le prototype de 2^e génération (qui doit être fonctionnel au début du 4^e trimestre 2000) et la carte définitive.

iv) **Télécommunications.** Les maîtres d'œuvre pour la gestion des télécommunications sont le laboratoire de l'Université de Leeds, en Angleterre, le LPNHE et l'ENST, à Paris. Le Laboratoire a toutefois joué un rôle déterminant dans la conception de la stratégie des télécommunications.

Dans l'élaboration d'un programme de simulation du réseau de télécommunications nous avons à simuler les stations locales et une partie des stations de base. Les prototypes de l'électronique pour les stations locales du *réseau test* sont modulaires (électronique de décision, contrôleur, datation, télécommunications et surveillance). Nous aurons la responsabilité de l'unification de ces modules en une carte unique et définitive qui doit équiper, à partir de 2001, les stations locales.

Nous avons déjà emporté sur le site argentin de Malargüe un ensemble comprenant les cartes suivantes :

- Carte mère, contrôleur, carte Ethernet (construites par le Collège de France),
- Contrôle & surveillance (construite par le LAL d'Orsay),
- Mesure de temps (construite par le service Temps et Fréquences de l'Observatoire de Besançon).

Cet ensemble, ainsi que l'interface de télécommunications, avait été préalablement testé au Laboratoire. Il servira à vérifier le bon fonctionnement des instruments de contrôle en attendant le dernier module d'électronique, interface entre les photomultiplicateurs et le premier niveau de déclenchement, sous la responsabilité de l'*Université Technologique du Michigan* et attendu pour le dernier trimestre 2000.

Participent à cette activité au Laboratoire : *C. Boutonnet, J.-M. Brunet, J.-N. Capdevielle, B. Courty, G. Desplancques, P. Frenkiel, L. Guglielmi, C. Le Gall, J.-J. Jaeger, P. Tardy, G. Tristram, J. Vergne, J. Waisbard.*

3. Étude des gammas cosmiques

L'étude du rayonnement gamma émis par les sources célestes permet l'étude des phénomènes cosmiques parmi les plus énergétiques, et c'est un outil pour la compréhension de l'origine des rayons cosmiques.

Le rayonnement gamma interagit en particulier avec le fond infrarouge intergalactique. L'étude de son spectre, en provenance de sources lointaines, donne des indications sur la densité de cet infrarouge, corrélée à l'époque de formation des premières étoiles dans l'Univers.

Le Laboratoire est engagé dans CAT et CELESTE, sur le site de THEMIS, à Targassonne dans les Pyrénées Orientales, utilisant toutes deux la technique Cerenkov atmosphérique : les rayons cosmiques créent des gerbes de particules qui émettent de la lumière Cerenkov. L'analyse de cette lumière donne des indications sur l'énergie, la nature et l'origine du rayon primaire.

Le Laboratoire prépare aussi l'avenir et s'intéresse à 2 projets nouveaux en astronomie gamma : HESS et GLAST.

CAT est en phase d'exploitation de croisière. Une vingtaine de sources galactiques et extragalactiques sont suivies en permanence et plus particulièrement la nébuleuse du Crabe et 2 objets extragalactiques, les AGN Mrk501 et Mrk421. Ces derniers objets ont été observés ponctuellement simultanément par le satellite Beppo-SAX et les télescopes gamma de l'hémisphère nord (dont CAT).

La mesure simultanée de la plus grande bande possible du spectre électromagnétique de ces puissants moteurs cosmiques est très importante pour parvenir à percer leur secret. Ces sources extragalactiques sont extrêmement variables et

donc très difficiles à détecter en gamma. Le Laboratoire n'a pas participé à la construction du détecteur mais joue un rôle important dans la prise et l'analyse des données.

CELESTE : Jusqu'à la fin des années 90, il n'existait pas de détecteurs efficaces dans la bande 20—300 GeV. C'est l'ambition de l'expérience CELESTE de couvrir cette bande d'énergies à l'aide d'un télescope au sol. Pour descendre au seuil de 20 GeV avec la technique Cerenkov atmosphérique, il faut avoir une surface de miroirs très importante. CELESTE réutilise 40 héliostats de 50 m² de l'ancienne centrale solaire THEMIS. Une optique secondaire a été installée en haut de la tour, à la place de l'ancienne chaudière, et une électronique rapide développée. CELESTE est opérationnelle depuis le printemps 1999. Les premiers résultats ont été obtenus au début de l'année 2000. Des rayons gamma de 30 GeV en provenance de la nébuleuse du Crabe ont été détectés ainsi qu'un sursaut de l'AGN Mrk421 dans le même domaine d'énergies.

Afin de baisser encore le seuil du détecteur, le nombre d'héliostats doit être accru. Le Laboratoire a la responsabilité de l'étude et de la mise en place d'un nouveau système de pilotage des héliostats à base de microcontrôleurs et de liaisons radio.

CAT et CELESTE ont des programmes d'observation communs. La présence sur le même site de ces 2 détecteurs complémentaires permet d'une part des calibrations croisées (garantissant une meilleure compréhension des deux appareillages) et surtout l'observation simultanée des sources, dans les mêmes conditions. Nous disposons sur ce site d'outils uniques permettant l'observation d'objets célestes entre 50 GeV et 10 TeV.

Une bonne connaissance de la transmission de l'atmosphère est importante et particulièrement pour CELESTE, que la grande surface de miroirs rend extrêmement sensible. Notre groupe a participé à la construction d'un LIDAR, dispositif explorant la transmission atmosphérique par rétrodiffusion d'impulsions laser. Ce projet est une collaboration entre la Région Midi-Pyrénées et le CNRS (INSU et IN2P3). Le Laboratoire a réalisé la mécanique de l'appareil. Les premières mesures sont programmées pour la mi-2000.

HESS : Dans la continuité directe de CAT, ce projet est un ensemble de 4 télescopes utilisant la technique Cerenkov atmosphérique. Chaque télescope comprend un miroir de 100 m² et une caméra de près de 1 000 pixels. Ce projet, en collaboration avec le Max-Planck Institut de Heidelberg, sera installé en Namibie. La surface, la technique stéréo et le grain fin devraient permettre d'atteindre un seuil en énergie de 100 GeV avec une sensibilité 10 fois celle de CAT. Ainsi, dans l'hémisphère Sud cet instrument sera un moyen très performant pour étudier l'émission gamma des restes de supernovæ, lieu privilégié d'accélération des rayons cosmiques galactiques, et donc probablement émetteurs gamma, ce qui n'a pas encore été observé.

HESS est aussi un bon instrument de découverte d'émetteurs gammas.

Le premier télescope devrait être opérationnel sur le site à l'été 2001, et l'ensemble fin 2002. Le Laboratoire construit un banc de test des cônes de Winston, destinés à augmenter la collecte de lumière utile tout en réduisant la lumière parasite. Les propriétés optiques de chacun seront mesurées sur ce banc.

GLAST : Les détecteurs au sol ont une grande sensibilité mais un petit champ de vue. Inversement, les détecteurs spatiaux ont une faible sensibilité mais un grand champ de vue. Les deux techniques sont donc complémentaires. Une décision de l'IN2P3 en 1999 a permis de rejoindre le projet GLAST, projet américain de détection de rayons gamma de quelques MeV à une centaine de GeV embarqué dans un satellite, et qui sera opérationnel en 2006. C'est un détecteur de traces, formé d'un sandwich de microstrips de silicium et de plomb, avec un calorimètre en CsI.

Cet appareillage succède au détecteur EGRET installé sur le satellite CGRO. Grand champ, grande surface et bonne résolution angulaire en font un excellent outil. La France est partie prenante dans la construction du calorimètre et le Laboratoire plus précisément dans la simulation. Il a en charge l'optimisation de la liaison optique entre les cristaux et les diodes de lecture. Pour cela, un banc de test reproduisant les conditions de température et de pression régnant en orbite est à l'étude au Laboratoire ; divers systèmes de liaison pourront être ainsi testés dans des conditions réalistes. Le Laboratoire est aussi chargé de tests sur faisceau au CERN pour optimiser et contrôler le calorimètre.

Avec CAT et CELESTE, le Laboratoire est impliqué dans des observations de rayons gammas cosmiques couvrant le spectre électromagnétique de 50 GeV à 10 TeV. GLAST et HESS permettront de poursuivre dans cette voie avec des moyens complémentaires et plus performants.

Participent ou ont participé à ces activités au Laboratoire : *C. Boutonnet, A. Chekhtman, B. Courty, A. Djannati-Ataï, C. Dufour, M.-G. Espigat, P. Espigat, L. Guglielmi, B. Khelifi, F. Lelong, C. Masterson, D. Marchand, F. Münz, M. Punch, J.-P. Rény, S. Selmane, Ph. Tardy, R. Terrier, D. Vallée, A. Volte et B. Yoffo.*

4. Neutrinos solaires

La physique des neutrinos se concentre depuis longtemps sur leurs masses, qui ouvrent une porte au-delà du modèle standard minimal de la physique des particules et dont les implications sont cruciales en cosmologie. Dans la recherche d'oscillations entre les différentes familles (clé probable de l'existence de la masse), deux domaines sont aujourd'hui prometteurs, celui des neutrinos « atmosphériques » et celui des neutrinos solaires.

Du côté des neutrinos atmosphériques, l'expérience SUPERKAMIOKANDE a annoncé au printemps 2000 l'observation probable de l'oscillation entre les ν_μ et une autre famille (avec un mélange maximal et une valeur de Δm^2 de quelque 10^{-3} eV^2). L'expérience de CHOOZ, à laquelle a activement contribué le Labora-

toire, a permis d'éliminer la solution d'oscillation $\nu_\mu - \nu_e$ et favorise donc l'oscillation entre ν_μ et ν_τ . Du côté des neutrinos solaires, c'est la solution d'oscillation entre ν_e et ν_μ qui est privilégiée (elle explique parfaitement l'ensemble des résultats expérimentaux, mais il manque encore la preuve qu'elle constitue *LA* solution). Pour aller plus loin, il faut :

a) observer à haute énergie soit une déformation du spectre (SUPERKAMIOKANDE ou SNO), soit les courants neutres (SNO), et des résultats sont attendus prochainement ;

b) observer ce qu'il est advenu des neutrinos de moyenne énergie (ceux du ${}^7\text{Be}$) et de basse énergie (les neutrinos *pp*) ; de nouvelles expériences vont bientôt démarrer comme BOREXINO à moyenne énergie au Gran Sasso ou sont en projet (LENS, HELLAZ). HELLAZ est un programme de R & D séduisant et ambitieux, initié il y a plusieurs années au Laboratoire. Son but est la mesure précise du spectre des neutrinos de basse énergie (les neutrinos *pp* et ${}^7\text{Be}$).

L'expérience de CHOOZ s'est terminée en 1998 et les dernières publications ont été faites en 1999. L'équipe de CHOOZ s'est alors intéressée à l'autre volet des oscillations, les neutrinos solaires, en prenant contact avec l'expérience BOREXINO (mesure des neutrinos du ${}^7\text{Be}$), qui doit démarrer en 2001. Sa proposition de construire des flash ADC à 400 MHz, pour une mesure précise du signal au-dessus de 1 MeV a été retenue par la collaboration BOREXINO. La discussion de la participation du Laboratoire à BOREXINO est en cours. Parallèlement, la R & D LENS s'est mise en place pour mesurer les contributions respectives des neutrinos *pp* et des neutrinos du ${}^7\text{Be}$. La forte synergie entre BOREXINO et LENS a conduit la même équipe à s'intéresser simultanément à BOREXINO et LENS.

L'IN2P3 ayant décidé de ne plus soutenir HELLAZ, il a été décidé que ce programme ne se poursuivrait plus au Laboratoire au-delà de la fin 2000. La présente année est donc une année de transition entre un programme CHOOZ — HELLAZ et un programme BOREXINO — LENS qui sera focalisé sur les neutrinos solaires à court et moyen terme.

4.1. Expérience de CHOOZ

L'étude des neutrinos émis par les réacteurs nucléaires est un moyen privilégié d'observer les oscillations des neutrinos. En éloignant le détecteur à près d'un kilomètre des réacteurs, l'expérience de CHOOZ, dans les Ardennes, a permis de gagner plus d'un ordre de grandeur dans la sensibilité aux paramètres de l'oscillation. Le Laboratoire a contribué très fortement à cette expérience.

L'expérience de CHOOZ a publié ses résultats définitifs en novembre 1999. Le rapport entre nombre de $\bar{\nu}$ détectés et celui de $\bar{\nu}$ attendus en l'absence d'oscillations est de

$$1,01 \pm 0,028 \text{ (statistique)} \pm 0,027 \text{ (systématique)}$$

C'est une confirmation de la première publication de 1998, avec une statistique doublée et des erreurs systématiques diminuées. Ce nouveau résultat réduit encore l'espace disponible pour une oscillation entre ν_e et ν_μ , et élimine cette hypothèse pour expliquer la disparition des ν_μ observée par SUPERKAMIOKANDE. Il est considéré comme très solide. Les expériences en construction à l'heure actuelle privilégient la recherche d'une oscillation entre ν_μ et ν_τ (qui ne pouvait être observée par le détecteur de CHOOZ).

Le résultat atteint est meilleur que celui annoncé dans la proposition d'expérience. Les erreurs statistiques sont maintenant équivalentes aux erreurs systématiques, et celles-ci ne peuvent plus guère être réduites. La décision d'arrêter l'expérience a donc été prise à la fin de 1998.

Durant l'année 1999, le Laboratoire a assuré le démontage des installations fixes. Comme durant toute l'expérience, ses services techniques ont organisé et assuré la plus grande partie du travail.

Au total, l'expérience de CHOOZ aura duré 5 ans, et rempli parfaitement ses buts. L'excellent rapport signal/bruit (supérieur à 10) en a fait l'expérience de référence dans ce domaine de l'étude des neutrinos de réacteurs, à la fois par la qualité expérimentale et par la portée scientifique de son résultat.

Ont participé aux diverses phases de l'expérience de CHOOZ au Laboratoire : *H. Ahamada, F. Bauer, M. Ben Jaber, J. Boucher, G. Calvayrac, B. Courty, P. Courty†, G. Desplancques, E. Duverney, P. Guillouët, A. Guimard, H. de Kerret, S. Khaloutsev, D. Kryn, B. Lefièvre, F. Lelong, D. Marchand, A. Martemyanov, D. Monnot, M. Obolensky, J.-P. Rény, C. Robert, F. Roger, A. Sabelnikov, P. Salin, S. Selmane, M. Skorokhvatov, O. Sokolsky, S. Soukhotine, Ph. Tardy, J. Vergne, D. Véron, F. Vinchon, V. Vyrodov*, ainsi que de nombreux collègues russes de l'Institut Kurchatov de Moscou, dans le cadre du PICS 209.

4.2. BOREXINO — LENS

Les deux détecteurs européens, BOREXINO et LENS, utilisent des photomultiplicateurs et du liquide scintillant, comme CHOOZ. Plusieurs des techniques employées sont les mêmes, et cela a conduit naturellement le groupe à se placer au point de convergence de ces deux expériences. Parmi les nombreux problèmes qu'elles ont en commun, la reconnaissance des formes d'impulsion a retenu particulièrement l'attention. En effet, le groupe a une expérience des flash ADC, puisqu'il a conçu et mis en œuvre avec succès le flash ADC à 166 MHz de CHOOZ. Reprenant la version étudiée dans le CROP (Contrat de recherches à objectifs partagés) pour commercialiser cette carte, il s'est avéré aisé de l'utiliser pour LENS et BOREXINO.

Dans LENS, cette reconnaissance de forme est un problème essentiel, car la signature d'un événement de neutrino est la détection de deux particules séparées avec une constante de temps de 70 ns. Il faut donc analyser la forme de toutes les impulsions, pour distinguer les impulsions du bruit de fond distordues et les

vrais événements de neutrino. Dans BOREXINO, il s'agit d'une séparation par « Pulse Shape Discrimination » (PSD) entre les impulsions longues produites par des particules lourdes, très ionisantes (tels les alphas, les protons de recul...), et les signaux courts des électrons (cette séparation réduit le bruit de fond, et est particulièrement utile pour rejeter ce dernier lors de la détection des neutrinos de réacteurs nucléaires émis en France, à 700 km du détecteur).

La simulation de ces impulsions est un deuxième axe de travail du groupe, qui a repris pour cela les outils qu'il avait développés pour l'expérience de CHOOZ, et qui ont été utilisés par toute la collaboration.

Ce programme de travail permet d'avoir une place bien identifiée dans les deux expériences.

Divers budgets, notamment une aide américaine, ont permis de faire fabriquer le flash ADC à 400 MHz par la société italienne CAEN. Le prototype de flash ADC est aujourd'hui complètement testé, et sera utilisé en juin 2000 pour calibrer le PSD sur le détecteur prototype de BOREXINO appelé « Counting Test Facility ». En même temps, ces données permettront de fournir les premières mesures du taux de rejet d'impulsions pour LENS, et de les comparer à la simulation.

Ont participé au programme BOREXINO au Laboratoire dans l'année : *T. Beau, A. de Bellefon, J. Boucher, B. Courty, G. Desplancques, J.-J. Jaeger, H. de Kerret, D. Kryn, D. Monnot, M. Obolensky, S. Selmane, Ph. Tardy, J. Vergne, D. Vignaud, J. Waisbard.*

4.3. Projet HELLAZ : la mesure du spectre des neutrinos solaires

4.3.1. Principe de HELLAZ

Aucune des expériences mesurant des neutrinos solaires ne peut mesurer de spectres en énergie du neutrino en dessous de 5 MeV (SUPERKAMIOKANDE au Japon). La comparaison avec les spectres théoriques pour les neutrinos de la chaîne pp (en dessous de 420 keV) est fondamentale car le flux pp est connu à mieux que 1 % par la mesure de la luminosité du soleil, en désaccord avec les mesures intégrées des expériences GALLEX et SAGE. C'est pourquoi la mesure du spectre lui-même est indispensable pour lever les ambiguïtés entre les diverses solutions d'oscillations.

Il faut donc construire un spectromètre à neutrinos solaires sensible à partir de 200 keV et de résolution meilleure que 10 %. Cette dernière pourra être contrôlée par l'élargissement de la raie des neutrinos issus du ${}^7\text{Be}$.

Le détecteur envisagé, qui joue en même temps le rôle de cible, est une chambre à projection temporelle (TPC) de 2000 m³ remplie d'hélium à 20 bar, permettant l'acquisition par jour d'une dizaine d'événements de diffusion élastique de neutrino solaire sur électron.

La condition pour obtenir la précision souhaitée est de déterminer la direction de l'électron de recul avec une précision meilleure que 5°, ce qui est possible

si l'on mesure chaque électron d'ionisation de la trace. Ceci suppose un gain du détecteur en fin de dérive supérieur à 10^6 .

4.3.2. État de la R & D : HELLAZ-1

Poursuivant la R & D sur la chambre Micromegas (voir le rapport de l'année dernière), nous avons construit une enceinte de petit volume (2 l) permettant la mise en équilibre rapide de mélanges gazeux jusqu'à 20 bar.

Utilisant comme « quencher » du méthane la proportion méthane/hélium optimale baisse de 25 % à 1 bar à 2 % à 20 bar.

Les impulsions sont toujours propres et de moins de 10 ns de largeur en temps. Le problème est actuellement le gain. À 1 bar, nous avons une bonne efficacité (gain de $5 \cdot 10^6$) avec l'isobutane. Par contre, à 20 bar, avec 2 % de méthane, nous avons longtemps été limités à $10^{4.5}$. Mais l'utilisation de simulations avancées indique que le pourcentage optimal d'isobutane à 20 bar est 0,5 %, où il reste gazeux. Or l'isobutane donne un gain d'une centaine de fois supérieur à celui donné par le méthane.

Parallèlement, nous avons engagé un important travail de simulation, avec le programme GEANT du CERN : génération de traces d'électrons de 100 keV à 1 MeV, ionisation de l'hélium, production du nuage d'électrons et dérive. Différents algorithmes permettent de reconstituer énergie et direction de l'électron. Dans une deuxième phase, on simule aussi les chambres de lecture, afin d'évaluer les diverses configurations et leur effet sur la précision des mesures. Une efficacité de 90 % est obtenue sur des pistes séparées par 1,5 mm. La reconnaissance de l'angle, variable avec l'énergie et la distance de dérive, est actuellement assez bonne pour distinguer nettement les neutrinos *pp* de ceux du ${}^7\text{Be}$.

Enfin, une importante part de la simulation est celle du bruit de fond radioactif dans les données et leur séparation au moyen de l'algorithme dit du « soleil tournant ».

Ont contribué à HELLAZ pendant la période de référence du présent rapport : *A. de Bellefon, D. Broszkiewicz, O. Danard, A. Diaczek, G. Dournes, J. Dolbeau, M. Gladieux, Ph. Gorodetzky, P. Guilloët, M. Hamidouche, J.-J. Jaeger, A. Joinet, K. Medjoubi, N. Miletic, M. Pairat, B. Pigeyre, P. Salin, A. Sarrat, S. Selmane, J.-C. Vanel, J. Waisbard.*

5. Cosmologie Observationnelle

Les sujets de recherche du groupe de Cosmologie Observationnelle sont axés sur la recherche d'objets massifs et compacts constituant la matière cachée baryonique, et sur la mesure des anisotropies du fond diffus cosmologique, qui vont bientôt constituer l'essentiel du programme.

L'année 1999-2000 a été marquée :

— par la poursuite du programme de la collaboration AGAPE de recherche d'effet de microlentille gravitationnelle sur des étoiles non-résolues de la galaxie d'Andromède ;

— par une activité dans la physique des anisotropies du rayonnement à 3 K :

- pour ARCHEOPS : exploitation du vol technique à Trapani en juillet 1999.

- pour PLANCK : modélisation, analyse de données et mise en place du banc d'étalonnage global de l'instrument HFI en collaboration avec l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay - IAS.

5.1. Recherche de matière noire baryonique : AGAPE

L'identification de la matière noire des halos des galaxies reste un des problèmes cosmologiques majeurs : même si la quantité de matière noire dans ces halos est assez bien estimée, sa nature est encore incertaine.

5.1.1. Effet de microlentille

L'une des hypothèses possibles est que cette matière noire soit de la matière ordinaire, qui doit être alors organisée de façon à ne pas s'effondrer, par exemple sous forme d'objets compacts sombres ou MACHOS.

Un tel objet est détectable par l'effet de lentille gravitationnelle produit lorsqu'il passe devant une étoile d'arrière-plan. L'amplification du flux lumineux est alors mesurable. De tels effets sont très rares et il faut surveiller des millions d'étoiles pour avoir une chance raisonnable d'en observer. Un groupe français (EROS) et un groupe américano-australien (MACHO) ont recherché et trouvé de tels effets en direction des Nuages de Magellan. Cependant, la nature et la position des lentilles ne sont pas encore bien comprises.

5.1.2. La méthode des pixels

Nous avons tenté d'effectuer le même type de recherche en direction de la galaxie d'Andromède (M31), qui contient un très grand nombre d'étoiles, non résolues depuis le sol pour la plupart ; notre groupe a donc imaginé et mis en œuvre au sein de la collaboration AGAPE une méthode appropriée à ce cas.

Cette méthode a d'abord été appliquée au Pic du Midi, sur le télescope de 2 m Bernard Lyot, de 1994 à 1998. L'analyse des données a fait l'objet de la thèse d'Y. Le Du (12/5/00). Nous y avons détecté 7 événements compatibles avec des effets de microlentille. L'analyse de courbes de lumière obtenues à Kitt Peak a permis de rejeter 5 de ces candidats parce qu'ils présentaient de nouvelles variations importantes au cours de l'année 1999. L'un des 2 événements retenus est extrêmement court (largeur à mi-hauteur de 5,3 jours), et la seule interpréta-

tion connue est un effet de microlentille ; il a fait l'objet d'une publication séparée.

De nombreux stages de maîtrise ont été proposés sur l'analyse de ces données (*F. Baron, D. Louapre, N. Iro*).

Ayant montré la validité de la méthode des pixels, nous réunissons une collaboration internationale pour l'exploiter sur des instruments à plus grand champ, en vue de réunir la statistique indispensable.

Ainsi, nous avons obtenu, en 1999, des observations sur 56 nuits, réparties sur 5 mois, avec la caméra à grand champ WFC montée sur le télescope de 2,5 m Isaac Newton (INT), à La Palma aux îles Canaries. L'ensemble INT/WFC a un champ de $33' \times 33'$ (50 fois le champ du Pic du Midi). Chaque nuit, les images de 2 champs sont prises, couvrant la quasi-totalité de la galaxie d'Andromède, en 3 couleurs. Le volume de données est important, et l'analyse n'a encore commencé que sur un sous-ensemble restreint. De nombreuses étoiles variables ont pu être détectées, ainsi que des candidats microlentilles.

S. Paulin-Henriksson analyse ces premières données pour sa thèse de doctorat. Cette campagne d'observations est coordonnée avec le groupe MEGA, avec qui nous partageons les données, tout en menant en parallèle deux analyses complètement indépendantes. La demande d'une seconde campagne d'observations en 2000, indispensable pour éliminer les étoiles variables qui constituent l'essentiel du bruit de fond, vient d'être acceptée. Ce programme constitue l'essentiel de notre activité AGAPE.

Par ailleurs, nous collaborons, pour optimiser l'ensemble de la chaîne, avec des chercheurs américains et italiens, sur des données du télescope de 1,3 m « Michigan-Dartmouth-MIT » à Kitt Peak (Arizona) dont le champ est de $17' \times 17'$ (16 fois le champ que nous avons au Pic du Midi).

Cette collaboration dispose de données prises sur M31 en 1998 et 1999, analysées par nos collaborateurs italiens. Un étudiant en thèse de Salerne, *S. Calchi-Novati*, a passé plusieurs mois au Laboratoire pour se familiariser avec nos méthodes.

Nous nous sommes aussi associés à une demande de temps auprès du *Hubble Space Telescope* (HST) pour surveiller la galaxie M87, au centre de l'amas de la Vierge, et y détecter des événements de microlentille. Cette demande, pilotée par Joseph Silk de l'université de Californie à Berkeley et de l'université d'Oxford, a été retenue avec une attribution de 30 orbites à partir de juillet 2000.

C. Lamy contribue à ce programme pour le traitement des données.

5.2. Anisotropies du fond diffus cosmologique de rayonnement micro-onde : les programmes PLANCK de l'ESA et ARCHEOPS

La mesure précise des fluctuations de température du fond cosmologique de rayonnement micro-onde (FCRM - acronyme anglais : CMB) est devenu un enjeu

majeur de la cosmologie observationnelle : la détermination des propriétés statistiques de ces fluctuations permettra de limiter la variété des descriptions de notre Univers, et en particulier de déterminer avec précision des constantes fondamentales.

Des observations au sol et en ballon permettent maintenant d'explorer la zone du spectre multipolaire des anisotropies où sont attendus les premiers « pics Doppler », dont la position et l'amplitude sont des informations capitales pour comprendre les fluctuations primordiales et mesurer les paramètres cosmologiques.

La mesure des anisotropies du fond de rayonnement cosmologique nécessite des détecteurs extrêmement sensibles : il faut mesurer les fluctuations à la dizaine de μK près, avec une résolution angulaire de l'ordre de la dizaine de minutes, sur une large fraction du ciel. Pour atteindre ce niveau de sensibilité, il faut effectuer les observations depuis des ballons stratosphériques ou, mieux, depuis l'espace.

Deux projets de satellites sont maintenant en chantier, un projet américain, MAP, destiné à voler bientôt (2001) mais qui n'atteindra qu'une sensibilité restreinte et une résolution angulaire moyenne (sensibilité de l'ordre de $50 \mu\text{K}$ sur $13'$), et un projet européen piloté par l'ESA, PLANCK, qui volera en 2007, mais devrait atteindre $5 \mu\text{K}$ sur $7'$. Ceci devrait permettre de déterminer H_0 , Ω_p , Ω_b à quelques % près et de détecter un $\Omega_\Lambda > 0,02$, contrôlant ainsi les résultats obtenus par l'observation des supernovæ lointaines.

L'équipe de cosmologie observationnelle du Laboratoire participe à l'instrument haute fréquence (HFI) du projet PLANCK :

- en collaboration avec l'IAS, étalonnage au sol et en vol ;
- traitement des données et simulations, dans le cadre du centre français de traitement des données de PLANCK, POSDAC (Paris-Orsay-Saclay Data Analysis Center).

5.2.1. Étalonnage global de l'instrument PLANCK-HFI

Pour la calibration du détecteur HFI (*High Frequency Instrument*), il faut mettre en place un cryostat d'étalonnage (cuve Saturne modifiée) à l'IAS en vue d'accueillir dès avril 2002 le modèle de démonstration, puis le modèle de vol en juillet 2003.

Ce travail implique fortement les ingénieurs du Bureau d'Études, pour l'implantation du système optique dans la cuve. Une partie du dispositif, la roue porte-polariseurs, est réalisée en collaboration avec une équipe de cinq étudiants de l'École Centrale de Lille dans le cadre de leur projet d'études sur une période de deux ans. Le pilotage de tout le système optique est à la charge de notre service informatique.

Une sphère intégratrice travaillant dans le domaine des longueurs d'onde millimétriques sera mise au point sur un banc optique dont la réalisation s'achève

sous le pilotage de *J.-C. Vanel*. Les premières mesures de diffusion sont prometteuses quant aux capacités de ce banc optique.

Contributions de *D. Broszkiewicz, A. Faye, L. Guglielmi, P. Guillouët, D. Imbault* et *B. Yoffo* au Laboratoire, et de *E. Artarit, D. Caretti, T. Guglielmi, G. Lorgeron, D. Tanguy* à l'École centrale de Lille.

5.2.2. Simulations et mise au point de méthodes de traitement de données

Le traitement des données de mesure des anisotropies du FCRM est un problème complexe.

À l'émission due aux fluctuations de température du fond cosmologique viennent en effet se superposer des émissions parasites d'origines très diverses. À ces fluctuations d'origine astrophysique viennent s'ajouter, le cas échéant, les émissions géophysiques, et des bruits instrumentaux, comme l'émission propre de l'instrument, les effets de lobes secondaires des antennes ou les effets de dérive à basse fréquence des capteurs.

Cette année, notre groupe a poursuivi un travail de fond sur les méthodes de traitement des données, et notamment sur la simulation d'observations astrophysiques et l'étude de la séparation de ces composantes en présence d'effets de dérives systématiques à basse fréquence corrélées, dues par exemple à des fluctuations de température des miroirs dans PLANCK, ou à l'émission de l'atmosphère dans ARCHEOPS (objet du stage de DEA de *G. Patanchon*).

La méthode mise au point étend les méthodes existantes basées sur le filtrage de Wiener dans l'espace des échelles angulaires et des fréquences du rayonnement. Elle ne présuppose pas d'isotropie locale des propriétés spectrales, ce qui permet de prendre en compte les effets dus à la géométrie du balayage. Par contre, elle tient compte des modalités d'échantillonnage des cartes et de leurs séquences temporelles pour la modélisation des effets et l'optimisation du filtre à appliquer. Ce travail est une étape importante dans la mise au point de méthodes globales s'appuyant sur les propriétés statistiques bi-dimensionnelles des émissions astrophysiques et mono-dimensionnelles des effets systématiques variables dans le temps, en utilisant les redondances temporelles caractéristiques de l'acquisition.

La mesure de la polarisation du FCRM

Depuis 1999, le travail sur la préparation des mesures de polarisation du FCRM continue, en vue des missions ARCHEOPS et PLANCK. Ces travaux se font en collaboration avec des chercheurs du LAL à Orsay, de l'ISN et de l'Observatoire à Grenoble.

La polarisation - Les fluctuations du rayonnement cosmologique produisent une polarisation lors des dernières interactions dans la surface de dernière diffusion. L'observation de cette polarisation fournit donc une information indépen-

dante sur ces fluctuations. La distribution spatiale de la polarisation autour des points chauds et froids du FCRM, et en particulier sa parité, permet de caractériser la nature multipolaire des fluctuations, ce qui est très important pour en identifier l'origine. On pourra ainsi identifier la contribution des ondes gravitationnelles aux fluctuations primordiales. La connaissance de la polarisation sera aussi une aide importante pour caractériser et séparer les bruits d'avant-plan.

Soustraction des bruits de basse fréquence - Le travail sur l'élimination des bruits de basse fréquence des données polarisées, déjà entrepris l'année précédente a été poursuivi et finalisé. Il a donné lieu à une publication et constitue l'essentiel du travail de thèse de *B. Revenu* (15/5/00).

On soustrait les bruits de basse fréquence ($1/f$ et $1/f^2$), d'origine thermique et électronique, pour se ramener au niveau du bruit blanc, à condition que la « fréquence charnière » soit comparable ou inférieure à la fréquence de balayage du ciel. Ce travail constituera la base de l'extraction des bruits des données polarisées que fournira la mission PLANCK.

Calibration et effets instrumentaux - Une étude est en cours pour déterminer les contraintes que doivent satisfaire les polarimètres pour permettre de mesurer les polarisations attendues. Il semble actuellement qu'une connaissance de l'orientation des polarimètres à quelques degrés près suffit, et qu'un taux de polarisation croisée de 10 % reste tolérable.

Dans le but d'appliquer à de vraies données les méthodes développées, nous nous sommes impliqués dans l'analyse des données prises avec l'instrument COSMOSMAS, expérience hispano-anglaise installée sur le site de Tenerife aux Canaries. Ce travail, qui a fait l'objet d'une partie de la thèse de *B. Revenu*, a contribué à améliorer la soustraction d'effets parasites dans les données de COSMOSMAS.

Dans le cadre général de la mise au point de méthodes de traitement de données pour les anisotropies du CMB, nous avons déposé auprès du Ministère une proposition d'ACI, en collaboration avec deux chercheurs de l'ENST (École Nationale Supérieure des Télécommunications) et un chercheur du CEA-DAPNIA.

5.2.3. ARCHEOPS : cryostat d'étalonnage et mémoire de masse

Parallèlement à la préparation de PLANCK, le groupe contribue à la mission sur ballon ARCHEOPS, qui reprend d'ailleurs un nombre d'éléments préparés pour PLANCK. Le premier vol technique a eu lieu en juillet 99 depuis la base de lancement de Trapani, en Sicile, et un premier vol scientifique de 24 heures dans la nuit arctique est prévu à partir de décembre 2000 depuis la base de Kiruna en Suède. Le groupe est impliqué dans la préparation de ce vol scientifique — avec notamment la mise au point d'une télécommande du ballon par satellite — dans la réalisation de la mémoire de masse embarquée et dans la préparation de l'analyse en temps réel et du traitement des données.

La contribution du Laboratoire à la construction de l'instrument ARCHEOPS s'est faite sur trois points :

— Participation à l'étalonnage de l'instrument, avec notamment modification du cryostat d'étalonnage et réalisation d'une table XY devant supporter un système optique d'étalonnage des polariseurs en vue du prochain vol en décembre 2000 (contributions de *D. Imbault* et *P. Repain*).

— Fabrication (en sous-traitance) de polariseurs, dont les caractéristiques ont été établies à partir de simulations numériques (contributions de *D. Imbault* et *P. Repain* ainsi que des étudiants de l'École Centrale de Lille.)

— Conception et réalisation de l'enregistreur de bord, avec un microcontrôleur IBM-PowerPC 403 GA et des mémoires flash de 8 Mo. Cet enregistreur s'est avéré d'une importance cruciale pour la réussite du vol technique de juillet 1999 à Trapani (contributions de *C. Boutonnet*, *B. Courty*, *G. Desplancques*, *J. Vergne* sous la responsabilité de *L. Guglielmi*).

— afin de disposer d'une télémétrie fiable pendant toute la durée du vol, ce qui n'est pas possible avec la télémétrie terrestre standard, le Laboratoire a étudié l'utilisation de la téléphonie mobile par satellite INMARSAT MINIM. Deux tests réalisés en mars et mai 2000 ont permis de vérifier la souplesse et la fiabilité de ce système, qui sera utilisé lors des vols de physique. L'antenne fournie par le constructeur, malgré un fonctionnement correct, n'est pas idéale pour nos besoins. Avec un laboratoire de l'Université de Rennes nous étudions la réalisation d'une antenne mieux adaptée (contributions de *L. Guglielmi* et de *C. Dufour*).

Parallèlement, la calibration des polarimètres embarqués sur le ballon ARCHEOPS est à l'étude. En vue de construire des polariseurs de calibration, des simulations numériques permettent de déterminer avec précision les caractéristiques requises pour différentes longueurs d'onde. Leur construction par des méthodes du type photolithographie sont actuellement envisagées. Un protocole permettant de calibrer à la fois les polariseurs de calibration et les polarimètres de l'instrument a été mis au point.

5.2.4. Analyse des données du vol technique d'ARCHEOPS

Notre groupe s'implique fortement dans la réduction des données prises durant le vol technique du ballon ARCHEOPS : estimation des effets atmosphériques, soustraction des effets systématiques, suppression dans les données des effets dus à l'énergie déposée par les cosmiques.

En particulier, à partir de l'observation des planètes Jupiter et Saturne, nous avons réalisé la géodésie des observations (dispositions relatives des directions de pointage des différents détecteurs), ainsi que la calibration des différents canaux à partir de ces mêmes observations, étape importante de la première phase d'analyse des données.

En parallèle, nous travaillons à la soustraction des dérives de basse fréquence et des effets systématiques synchrones avec la rotation de la nacelle, par des méthodes de décorrélation multi-canaux. Ce travail a permis de réaliser un étalonnage préliminaire à partir de l'observation du terme dipolaire du FCRM, qui doit être comparé aux valeurs obtenues en utilisant les planètes, pour comprendre la forme des lobes proches de nos antennes. L'analyse du niveau de sensibilité finale, obtenu à partir de l'étalonnage et de premières versions de la chaîne de traitement, montre qu'ARCHEOPS a la sensibilité requise pour contraindre le spectre des anisotropies à toutes les échelles angulaires entre $15'$ et 20° .

5.3. Automatisation du télescope de 55 cm au Pic du Midi

Les travaux de restauration de l'observatoire du Pic du Midi poursuivis et achevés cette année ont considérablement ralenti les travaux de remise en état du télescope de 55 cm (T55).

Le programme de recherche automatique avec le T55 de supernovæ proches n'a pu être entrepris, et l'utilisation du télescope sera réorientée sur d'autres programmes : il pourrait par exemple contribuer au suivi de la variation lumineuse des noyaux actifs de galaxies (AGN) en concomitance avec les variations d'émission gamma observées en continu par les expériences CAT et CELESTE.

Une caractéristique du T55 est d'être largement ouvert aux astronomes amateurs ; il pourrait également servir de matériel de travaux pratiques réalistes pour des étudiants de licence et maîtrise.

L'adaptation du télescope a porté cette année sur trois points principaux :

- construction et mise en œuvre d'un nouveau système d'entraînement en ascension droite, pour corriger les oscillations constatées ;
- mise en place d'une raquette de réglage manuel permettant une mise en station visuelle déportée de la commande informatique ;
- fin de l'écriture des programmes de contrôle et de pointé automatique ainsi qu'enregistrement des données de caméra CCD. Ceci est réalisé par deux PC couplés, reliés au réseau Renater, en vue d'une exploitation, à terme, entièrement automatisée.

Le télescope entre maintenant dans la phase terminale de mise au point et calibrage : mise en station, corrections des déformations mécaniques, corrections de suivage... et sera opérationnel dans les mois à venir ; l'achèvement des travaux de réhabilitation du Pic du Midi et de son moyen d'accès rendent son exploitation possible.

Contributions de *A. Faye, L. Guglielmi, D. Marchand, D. Monnot, J.-P. Rény* et *J. Waisbard*.

Les physiciens, étudiants, post-doctorants et visiteurs qui ont participé dans l'année aux travaux du groupe de cosmologie observationnelle du Laboratoire sont : *A. Amblard, P. Bareyre, A. Bouquet, S. Calchi-Novati, J. Delabrouille,*

K. Ganga, C. Ghesquière, Y. Giraud-Héraud, J.-C. Hamilton, J. Kaplan, A. Kim, Y. Le Du, M. Crézé, S. Paulin-Henriksson, B. Revenu et J.-C. Vanel.

6. Expérience DELPHI au LEP

Le changement d'orientation scientifique du Laboratoire nous conduit à nous désengager graduellement de nos responsabilités dans l'expérience DELPHI au LEP ; notre activité s'y concentre maintenant sur le suivi du fonctionnement du matériel construit au Laboratoire.

Le détecteur de vertex au silicium installé au printemps 1997, le système d'acquisition de données du grand détecteur de rayonnement Cerenkov à imagerie annulaire (« barrel RICH ») ainsi que le système de calibration automatique réalisés au Laboratoire, ont parfaitement fonctionné tout au long de l'année.

J.-M. Brunet et G. Tristram consacrent une partie de leur temps pour permettre au Laboratoire d'honorer ses engagements jusqu'à la fin de l'expérience.

S. Lantz a assuré la diffusion de la documentation DELPHI au sein du Laboratoire.

7. Activités en mécanique

Le service de mécanique s'est investi, ou continue de s'impliquer, dans les expériences qui suivent :

CHOOZ L'expérience, qui a duré cinq ans au total et a donné d'excellents résultats, a été démontée en 1999.

(P. Guillouët, F. Lelong, D. Marchand, J.-P. Rény, P. Salin)

T55 La phase de mise au point du télescope est terminée.

(D. Marchand, J.-P. Rény)

LIDAR Le travail qui était à réaliser sur cet appareil est en voie d'achèvement.

(F. Lelong, D. Marchand)

Astronomie gamma

HESSE : un banc de test servant à déterminer les propriétés optiques des cônes de Wilson a été étudié et réalisé.

(F. Lelong, D. Marchand, J.-P. Rény, B. Yoffo)

GLAST : un banc de test permettant d'optimiser la liaison des cristaux de CsI et des diodes qui collectent le signal est en cours d'étude.

(M. Gladieux, D. Imbault)

HELLAZ Après la construction de l'enceinte permettant la mise en équilibre des mélanges gazeux, un ingénieur continue à fournir actuellement un travail conséquent de R & D.

(A. Diaczek, M. Gladieux, P. Guillouët, M. Pairat, P. Salin)

ARCHEOPS Étude et réalisation, en collaboration avec un technicien du LPNHE de Jussieu (Ph. Repain), d'une table *XY* permettant d'effectuer l'étalonnage des polariseurs (*D. Imbault*). Le travail sur cet appareil, ainsi que notre contribution à **PLANCK**, est réalisé en étroite collaboration avec *J.-C. Vanel*.

PLANCK Le bureau d'études, en interaction avec des étudiants de l'École Centrale de Lille en ce qui concerne le polariseur et l'IAS d'Orsay, est fortement impliqué dans l'étude de la réalisation et de l'implantation des éléments du système optique de la cuve cryogénique. Des simulations par éléments finis permettent d'optimiser les éléments (sphère intégratrice, miroir, système porte-polariseurs). Un banc de test dédié à l'étude des surfaces dans le domaine des ondes millimétriques est opérationnel.

(*P. Guillouët, D. Imbault, B. Yoffo*)

Pour les études, le service utilise essentiellement les logiciels **EUCLID** pour la CAO, **ACORD** et **SYSTUS** pour les calculs.

Les prototypes sont usinés sur les machines classiques et sur la fraiseuse à commande numérique de l'atelier.

Pour accompagner la réorientation du Laboratoire dans le domaine des astroparticules et pour préparer l'implantation sur le site de Paris-rive Gauche à Tolbiac, un effort important de formation est entrepris et va se poursuivre, notamment pour les salles propres, le calcul, la cryogénie, le vide ainsi que dans le domaine de l'assurance-qualité et la gestion de projet.

Les mécaniciens du Laboratoire présents dans la période de référence sont : *A. Diaczek, M. Gladieux, P. Guillouët, D. Imbault, F. Lelong, D. Marchand, M. Pairat, J.-P. Rény, P. Salin et B. Yoffo*.

8. Activités en électronique

En raison de la baisse des effectifs du service, il est impossible de créer les binômes souhaitables pour un bon suivi des multiples projets qui lui sont confiés. Les ingénieurs concepteurs manquent d'assistants pour les seconder dans la réalisation et le suivi de leurs projets : globalement le nombre d'électroniciens demeure sous-critique par rapport aux besoins des développements demandés par les expériences.

8.1. Participations récentes aux expériences

T55 : Participation aux installations sur site des systèmes électromécaniques de commande du télescope **T55** au Pic du Midi.

CELESTE : Rénovation totale des commandes des héliostats sur le site de Thémis : modifications des commandes de puissance des moteurs ; étude du système numérique de contrôle/commande et d'asservissement de ces moteurs (microprocesseur 68332) ; mise au point d'un système de télécommunications par liaison

hertzienne à 433 MHz entre les divers détecteurs de CELESTE, afin de remplacer les liaisons filaires actuelles ; test du premier prototype de ces deux ensembles sur le site ; fabrication de 20 unités prévue en 2000 ; installation électrique et câblage de l'ensemble.

HELLAZ : Mise en service et participation aux tests de plusieurs types de chambres différents pour HELLAZ (MGWC, MICROMEGAS...) ; R & D sur l'électronique de lecture de chambres type MICROMEGAS ; conception et mise au point d'amplificateurs de courant très rapides ($T_m = 1$ ns) ; adaptation à divers types de signaux, etc. ; préparation de la chaîne d'acquisition (128 voies de discrimination et de TDC de résolution temporelle 1 ns).

LENS — BOREXINO : Finalisation de la carte flash ADC réalisée en partenariat avec CAEN.

PLANCK : Démarrage des activités induites par les prises de participation du Laboratoire dans les expériences PLANCK et ARCHEOPS ; pour ARCHEOPS : après le succès d'un vol d'essai en mars 2000, fabrication d'une seconde génération du système embarqué de stockage des données (mémoires flash à semi-conducteurs de 4 Go). Ce système est conçu autour d'un micro-contrôleur du type POWERPC 403.

AUGER : Le Laboratoire prend une charge de plus en plus importante dans les définitions et/ou les réalisations connexes des stations locales : étude et réalisation d'une carte d'acquisition et de dialogue à base de micro-contrôleur POWERPC 403, pour le contrôleur de station locale ($2 \times 1\,600$ exemplaires prévus), évolution des premiers prototypes, liaison avec la carte de « time-tagging » de Besançon, avec le « slow-control » ; étude d'un second prototype de carte time-tagging, avec des FPGA plus performants ; participation à la définition de la partie « front-end » ; fabrication de 40 prototypes prévus pour la fin 2000 ; conception d'un ASIC en collaboration avec l'Observatoire de Besançon, pour remplacer les FPGA dans les versions définitives ; établissement d'un cahier des charges pour la soumission auprès d'industriels de la fourniture et de l'installation sur site d'une liaison hertzienne à fort débit.

8.2. Activités d'intérêt général

Le service tient un séminaire interne d'information, par exemple « Introduction au langage VHDL » (*M. Abbès*).

Un AI informaticien, assure — à temps partiel — pour l'ensemble du groupe électronique le fonctionnement et la mise à jour des logiciels des 5 postes d'IAO/CAO électronique : implantation de circuits imprimés (ALLEGRO), simulation logique (Verilog) et analogique, PIC designer, SYNOPSIS, ALTERA, etc.

Un TP électronicien assure la gestion du magasin : stock courant, commandes, maintenance, documentation, etc., pour l'ensemble du groupe, tout en participant sur site à l'installation des expériences : T55 (Pic du Midi) — mise en place.

Deux personnes (un TP et un T) assurent la Conception Assistée par Ordinateur (ALLEGRO) de toutes les cartes de circuits imprimés multicouches nécessaires aux diverses activités précitées, en relation directe avec les ingénieurs.

Les électroniciens du Laboratoire sont : *M. Abbès, C. Boutonnet, D. Broszkiewicz, B. Courty, G. Desplancques, J.-J. Jaeger, D. Monnot, S. Selmane, P. Tardy, J. Vergne, J. Waisbard.*

9. Activités en informatique

L'informatique est un outil indispensable à tous les stades d'avancement d'une expérience : simulation, conception et construction des détecteurs, acquisition et analyse des données. Une partie est fournie par les centres de l'IN2P3 et (de moins en moins) du CERN, mais tout un ensemble de fonctionnalités nouvelles a sa place au sein même du Laboratoire.

9.1. Évolution des infrastructures

9.1.1. Le réseau local

L'infrastructure de base est articulée autour d'un réseau local Ethernet, maintenant complet, et d'un réseau Apple-Talk entre MacIntosh. Ces réseaux assurent les communications et connexions internes au Laboratoire, ainsi que l'accès au réseau de l'IN2P3.

Le protocole de communication TCP/IP s'est imposé comme standard de fait dans notre environnement informatique fortement inhomogène.

9.1.2. Les matériels et leurs systèmes d'exploitation

Sont actuellement connectés au réseau local Ethernet un ensemble de machines de puissances et de marques diverses :

5 stations puissantes et modernes assurent les services généraux (service aux terminaux X et postes de travail, infrastructure logicielle, bibliothèques générales, impressions diverses, sauvegarde des données et des programmes) ainsi que la mise au point des programmes d'analyse. Une d'entre elles, dotée de 1 Go de mémoire, sert de support aux applications de traitement d'images ;

7 stations sont dédiées à la CAO : 2 pour la mécanique et 5 pour l'électronique ; 2 stations de travail HP sont utilisées par certaines expériences pour des tâches spécifiques ;

environ 50 postes de travail (PC sous LINUX), environ 30 terminaux X donnent un accès individuel au réseau, plus une trentaine de Macintosh d'âges divers ;

6 imprimantes laser noir et blanc et 1 imprimante couleur à jet d'encre solide sont directement connectées au réseau Ethernet, des serveurs d'impression spécialisés permettant l'accès aux imprimantes non directement connectées ;

plusieurs machines sous système Os9 servent pour le développement de logiciels d'acquisition de données.

9.1.3. La politique d'équipement et les réalisations cette année

L'ensemble du réseau supporte, en moyenne, une trentaine d'utilisateurs simultanés.

En raison des baisses de prix constantes, nous avons abandonné l'équipement en terminaux X au profit de PC sous LINUX. Ces PC sont utilisés en priorité comme terminaux X, mais peuvent également servir de postes de travail autonomes. L'équipement s'est poursuivi avec des PC de plus en plus puissants, pour un prix toujours plus bas.

Le grand nombre d'appareils connectés à ce réseau (calculateurs, imprimantes, terminaux X, postes de travail) rendant sa fiabilité cruciale, nous nous sommes équipés d'un analyseur de réseau.

Le Laboratoire a adopté pour toutes ses unités (DEC/ALPHA, APOLLO, SUN, HP et PC), le système UNIX sous toutes ses variantes (LINUX pour les PC) comme ailleurs dans notre discipline, aussi bien pour les calculateurs des expériences que pour ceux des grands centres de calcul (CERN et CCIN2P3 notamment).

Dans le domaine de l'acquisition de données et du contrôle, le service informatique est fortement impliqué dans les expériences, utilisant la chaîne de développement croisé (FasTrak) pour microprocesseurs POWERPC sous OS9 acquise en 1996 (et mise à jour régulièrement) ou la chaîne de développement OS9 pour microprocesseurs MOTOROLA utilisée depuis déjà plusieurs années.

9.2. Assistance aux utilisateurs

Plus de la moitié des informaticiens est affectée directement à une ou plusieurs expériences, où leur rôle est de développer et d'exploiter les logiciels ou de gérer les données spécifiques à ces expériences : programmes de simulation et/ou d'analyse, acquisition et visualisation de données, mise en place et utilisation de bases de données et de programmes de service.

Le Laboratoire a apporté un soutien important à l'installation au Collège de France d'un serveur Web (<http://www.college-de-france.fr>), toujours temporairement accueilli sur le serveur du Laboratoire, dont l'adresse propre est <http://cdfinfo.in2p3.fr>.

L'organisation de l'informatique en service facilite la maintenance des outils généraux et a permis de consacrer davantage d'efforts au développement d'applications originales d'usage commun. Le service s'est renforcé en 1999 par un CDD pour un an et une mutation sur AFIP. En revanche un ingénieur a quitté le Laboratoire pour un autre domaine.

L'effort important consacré l'année passée à l'harmonisation et la standardisation des logiciels sur les différentes plate-formes disponibles au Laboratoire,

ainsi qu'à la documentation (mise en ligne sur le WEB) s'est poursuivi cette année encore.

C'est en particulier le cas dans le domaine de l'acquisition de données, où de nombreux développements, regroupant plusieurs informaticiens, électroniciens et physiciens, sont en cours pour les expériences dans lesquelles le laboratoire est engagé :

AUGER : acquisition de données des stations locales (microcontrôleur POWERPC 403 sous OS9000).

CELESTE : contrôle des héliostats (microcontrôleur MC68332 sous OS9).

Supernovæ : automatisé du télescope T55 (PC sous LINUX).

ARCHEOPS : enregistreur de vol (POWERPC 403 sous OS9000).

HELLAZ : acquisition (POWERPC 604 sous OS9000).

PLANCK : pilotage et acquisition de la calibration (PC sous LINUX).

En outre, quelques informaticiens se sont portés volontaires pour donner, à l'intérieur du Laboratoire, quelques cours d'initiation et/ou de perfectionnement à des logiciels largement utilisés dans notre discipline (UNIX, Temps Réel, C, X11, réseaux, ...).

Plusieurs ont participé à des conférences ou écoles de formation.

Les informaticiens du Laboratoire sont :

J. Boucher, C. Dufour, M.-G. Espigat, A. Faye, L. Guglielmi, C. Lamy, C. Poutot, D. Poutot, D. Vallée et J.-P. Villain.

10. Services généraux

Sans l'action efficace et discrète des services généraux du Laboratoire, celui-ci serait dans l'incapacité de fonctionner. Le Directeur du Laboratoire, *D. Vignaud*, se fait un plaisir de citer :

Secrétariat administratif et scientifique :

K. Boulhouchat, C. Bréon-Hussenot, F. Cardoso, D. Cerverra, H. Le Bihan, C. Masson, M. Piochaud et S. Poulain.

Bibliothèque et Documentation :

J. Come-Garry, J.-C. Couillard, S. Lantz.

Service intérieur :

H. Ahamada, E. Demange, J. Le Fur et S. Néchal.

Sécurité :

O. Sokolsky, au Laboratoire et pour l'ensemble du site de THEMIS.

11. L'effort de formation au Laboratoire

Dans les années 1970, après l'utilisation des chambres à bulles, les techniciens qui traitaient les clichés ont dû être reconvertis. Un travail important a été fait à cette époque avec l'aide du CNRS. Au Laboratoire, il a orienté vers des professions variées : informatique, documentation, administration.

L'IN2P3 a ensuite développé son Service de Formation, notamment ses Écoles thématiques. Puis le Collège de France a organisé la formation continue pour ses propres personnels, parfois (hygiène et sécurité) pour l'ensemble des agents travaillant sur place.

Les ingénieurs ont reçu en premier des formations techniques, puis les techniciens, qui ont bien des possibilités. Pour l'année qui vient de s'écouler on constate un fléchissement très net de notre participation aux écoles de l'IN2P3 ; cela peut s'expliquer par le très faible nombre de recrutements sur concours ou en CDD. Il reste que 58 % des ITA sont allés en formation.

La grande mutation qui concerne tous les ITA, quelle que soit leur spécialité, est évidemment le recours croissant à l'informatique, à tous les niveaux. On distinguera cependant la formation des utilisateurs de l'informatique et celle des informaticiens eux-mêmes, qui représentent des niveaux et des objectifs bien différents.

Pour l'ensemble du Laboratoire on peut recenser **200 journées de stages ou écoles**, et **au total 1 611 heures** car il y a aussi les cours de langues à raison de 2 à 4 heures par semaine (débutants ou perfectionnement) pour faciliter les collaborations internationales ou tout simplement l'accueil de visiteurs étrangers.

Il est toujours difficile d'aborder le sujet de la formation pour les chercheurs car celle-ci est inhérente à leur métier et certains ont quelques réticences devant le désir de la quantifier... Pourtant, les Rencontres de Moriond, les Écoles Thématiques organisées par les Départements mais aussi l'animation des équipes ou un apprentissage plus rapide de l'utilisation de nouveaux langages informatiques les motivent de plus en plus et la moitié des chercheurs (Statutaires + Visiteurs + Thésards) a suivi une formation dans les 12 derniers mois.

Le Plan Triennal de Formation du CNRS a été prolongé d'un an et court donc jusqu'à la fin de l'année 2001. Pour l'année prochaine il faudra, en étroite corrélation avec le programme scientifique, réexaminer les grands axes en tenant compte des Ressources Humaines disponibles et c'est un travail pour la Direction du Laboratoire.

12. Accueil de chercheurs

19 stagiaires de niveaux divers, puis :

Thésards

Nom	Groupe	Directeur de thèse
<i>M. Alexandre Amblard</i>	Cosmologie	<i>Y. Giraud-Héraud</i>
<i>M. Tristan Beau</i>	Neutrinos solaires	<i>H. de Kerret</i>
<i>M. Sebastiano Calchi Novati</i>	Cosmologie	<i>Y. Giraud-Héraud</i>
<i>M. Bruno Khelifi</i>	Astronomie gamma	<i>M. Punch</i>
<i>M. Yann Le Du</i>	Cosmologie	<i>Y. Giraud-Héraud</i>
<i>M. Filip Münz (Co-tutelle)</i>	Astronomie gamma	<i>P. Espigat</i>
<i>M. Stéphane Paulin-Henriksson</i>	Cosmologie	<i>J. Kaplan</i>
<i>M. Benoît Revenu</i>	Cosmologie	<i>J. Kaplan</i>
<i>M. Antony Sarrat</i>	Neutrinos solaires	<i>J. Dolbeau</i>
<i>M. Régis Terrier</i>	Astronomie gamma	<i>A. Djannati-Ataï</i>

Post-Doctorants et visiteurs

Nom	Groupe	Dates
<i>M. Alexandre Chekhtman</i>	Astronomie gamma	1/2/00-2001
<i>M. Alexandre Etenko</i>	CHOOZ	5/4-11/5/00
<i>M. Kenneth Ganga</i>	Cosmologie	1/9/99-2000
<i>M. Jean-Christophe Hamilton</i>	Cosmologie	14/4/99-2000
<i>M. Alex Kim</i>	Cosmologie	1/11/97-30/10/99
<i>M. Yuri Kozlov</i>	CHOOZ	16/11/99-15/1/00
<i>Mme Isabella Kurp</i>	AUGER	18/7/99-28/7/99
<i>M. Corentin Le Gall</i>	AUGER	15/4-11/9/99
<i>M. Conor Masterson</i>	Astronomie gamma	22/11/99-2000
<i>M. Andrei Sabelnikov</i>	CHOOZ	20/3-3/4/00
<i>M. Serguei Sukhotine</i>	CHOOZ	1/10-30/11/99
<i>M. Jacek Szabelski</i>	Cosmologie	11-19/12/99, 11-25/6/00
<i>M. Alejandro Veiga</i>	AUGER	13/9-15/11/99
<i>M. Tadasz Wibig</i>	AUGER	11-19/12/99

Savants visiteurs

<i>M. Pierre Bareyre</i>	Cosmologie	Conseiller scientifique permanent
<i>M. James W. Cronin</i>	AUGER	Chaire Internationale du Collège de France (99-00)
<i>M. Thomas Ypsilantis</i>	HELLAZ	Conseiller scientifique permanent

13. Séminaires du Laboratoire

Les séminaires du Laboratoire sont organisés de façon conjointe avec ceux du LPNHE de Paris 6 & 7, et se tiennent alternativement dans les deux laboratoires, avec une insertion mensuelle de séminaires des quatre laboratoires parisiens : laboratoires de physique théorique de Jussieu et de l'ENS, LPNHE, et PCC.

Le responsable de l'organisation en est pour le Laboratoire *Ph. Gorodetzky*. On peut retrouver les listes de ces séminaires, avec plus de détails, sur le site Web du Laboratoire. La liste de ceux qui se sont tenus au Collège de France, dans la période de référence est la suivante :

Julio Gallegos (Instituto de Astrofísica de Canarias)

L'expérience COSMOSOMAS (Mardi 14/9/99)

Paolo de Bernardis (Université La Sapienza - Rome)

Premiers résultats du vol du ballon BOOMERANG (Jeudi 16/12/99)

Juan Collar (Université Paris VII, Denis Diderot)

SIMPLE and SATAN : two emerging projects in Astroparticle Physics (Jeudi 17/2/00)

Paul Baillon (CERN)

L'oscillation entre les différentes espèces de neutrinos est-elle la seule explication aux résultats de Kamiokande ? (Jeudi 24/2/00)

Arnold Wolfendale (Physics Department, Durham University, GB)

Cosmic Ray Origin : What's New ? (Jeudi 30/3/00)

Maurice Jacob (CERN)

Physique fondamentale dans l'espace (Jeudi 13/4/00)

Sebastian White (Brookhaven)

Mesures avec cibles internes sur l'anneau RHIC de Brookhaven (Mardi 25/4/00)

Stéphane Le Bohec (Astronomy Department, Iowa State University)

La recherche des trous noirs primordiaux (Jeudi 27/4/00)

Daniel Denegri (Saclay)

L'expérience CMS et recherche de la supersymétrie au LHC (Jeudi 4/5/00)

Ken Ganga, Lloyd Knox (Collège de France et University of Chicago)

Anisotropies in the Cosmic Microwave Background radiation (Jeudi 11/5/00)

Ulrich Heinz (CERN/TH)

« The Little Bang » (Jeudi 18/5/00)

Thomas Patzak (Tufts University)

Les Neutrinos atmosphériques, la masse des neutrinos et l'expérience MINOS (Lundi 22/5/00)

Danièle Imbault (Saclay)

Regards sur le pilotage de projets scientifiques... (Jeudi 25/5/00)

Michel Crézé (Université de Bretagne-Sud)

Astrométrie Spatiale et Matière Noire : d'Hipparcos à Gaia (Jeudi 29/6/00)

14. Publications

Les listes suivantes reprennent les productions du Laboratoire qui n'ont pas été mentionnées dans les listes de publications des rapports précédents, et ce jusqu'au 15/5/00. Seuls sont mentionnés le premier auteur et les auteurs membres du Laboratoire (en caractères obliques).

14.1. Articles

- C. Afonso *et al.*, EROS Coll. (*P. Bareyre, A. Bouquet, J.-C. Hamilton*) : Combined analysis of the binary lens caustic... [ApJ. **532** (2000) 340A]
- T. Lasserre *et al.*, (*P. Bareyre, A. Bouquet, J.-C. Hamilton*) : Not enough stellar mass machos in the... [A. & A. **355** (2000) L39-L42]
- P. Abreu *et al.*, Delphi Coll. (*J.-M. Brunet, J. Dolbeau, G. Tristram*) : Limits on Higgs Boson Masses and $\tan \beta$ from... [Acc. par Phys. Lett. **B**]
- W* pair production cross-section and *W* branching... [Acc. par Phys. Lett. **B**]
- A Study of the Lorentz Structure in Tau Decays... [Acc. par Eur. Phys. J. **C**]
- Search for supersymmetric particles in scenarios... [Acc. par Eur. Phys. J. **C**]
- Hadronization properties of b quarks compared to... [Acc. par Phys. Lett. **B**]
- Determination of $|V_{ub}/V_{cb}|$ with DELPHI at LEP. [Acc. par Phys. Lett. **B**]
- Search for Heavy Stable and Long-Lived Particles... [Acc. par Phys. Lett. **B**]
- Inclusive Σ^- and Λ (1520) production in... [Phys. Lett. **B475** (2000) 429-447]
- Search for charginos in e^+e^- interactions at... [Acc. par Phys. Lett.]
- Identified Charged Particles and Resonances... [Soumis à Eur. Phys. J. **C**]
- Measurement of the $\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \pi l \bar{\nu}_l$ branching... [Acc. par Phys. Lett. **B**]
- Upper Limit for the Decay $\bar{B} \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau$ and... [Soumis à Phys. Lett. **B**]
- A precise measurement of the τ pol.... [Soumis à Eur. Phys. J. **C**]
- Two-dimensional analysis of the B.-E. correlations... [Acc. par Phys. Lett. **B**]
- Λ_b polarization in Z decays at LEP. [Soumis à Phys. Lett. **B**]
- Measurement of the gluon fragmentation function... [Acc. par E. Phys. J. **C**]
- Measurement of the strange quark f.-b.... [Acc. par E. Phys. J. **C**]
- Consistent measurements of α_s from precise... [Acc. par E. Phys. J. **C**]
- Measurements of the Z partial dec. w. into $c\bar{c}$... [E. Phys. J. **C12** (2000) 225-241]
- Det. of $P(c \rightarrow D^{*+})$ and $BR(c \rightarrow l^+)$ at LEP-1. [E. Phys. J. **C12** (2000) 209-224]
- Search for the Higgs boson in events... [Phys. Lett. **B458** (1999) 431-446]
- Search for chargino pair production in... [Phys. Lett. **B466** (1999) 61-70]
- Measurement of the rate of $b\bar{b}b\bar{b}$ events... [Phys. Lett. **B462** (1999) 425-439]
- Measurement of the mass of the W boson... [Phys. Lett. **B462** (1999) 410-424]

- Search for charged Higgs Bosons at LEP2. [Phys. Lett. **B460** (1999) 484-497]
 Meas. of the Trilinear Gauge Boson... [Phys. Lett. **B459** (1999) 382-396]
 A search for invisible Higgs bosons... [Phys. Lett. **B459** (1999) 367-381]
 Energy Dependence of Inclusive Spectra... [Phys. Lett. **B459** (1999) 397-411]
 Multiplicity Fluctuations in 1- and 2-D... [Phys. Lett. **B457** (1999) 368-382]
 — *J.-N. Capdevielle et al., (C. Le Gall)* :
 Simulation of EAS at ultra-high... [Astroparticle Physics **13** (2000) 259-275]
 — *A. Benoit et al., (J. Delabrouille)* :
 Cal. and first light of the Diabolo... [A.& A. Supp. Series **141** (2000) 523-532]
 — *P. de Bernardis et al., (K. Ganga)* :
 A flat universe from high-resolution maps of... [Nature **404**, 27/4/00, 955-959]
 — *J.-B. Peterson et al., (K. Ganga)* :
 First results from VIPER : detection of small-scale an. at 40 GHz. [Soumis à ApJ.]
 — *A. Melchiorri et al., (K. Ganga)* :
 A measurement of Ω from the N. am. test flight of BOOMERANG. [Soumis à ApJ.]
 — *P.-D. Mauskopf et al., (K. Ganga)* :
 Measurement of a peak in the CMB power... [Soumis à ApJ.]
 — *E. Kerins et al., (Y. Le Du)* :
 Theory of pixel lensing towards M31. I: the density contribution... [Soumis à MNRAS]
 — *B. Degrange, M. Punch* :
 Gamma-ray astronomy at H. and VHE [CRAS **1** IV, 1 (2000) 189-198]
 — *B. Revenu et al., (A. Kim, J. Delabrouille, J. Kaplan)* :
 Destriping of polarized data in a CMB... [A.& A. Supp. Series **142** (2000) 499R-509R]
 — *F. Derue et al., EROS Coll. (P. Bareyre, A. Bouquet, J.-C. Hamilton, A. Kim)* :
 Observation of microlensing towards the galactic... [A.& A. **351** (1999) 87]
 — *B. Goldman et al., EROS Coll. (P. Bareyre, A. Bouquet, J.-C. Hamilton, A. Kim)* :
 EROS 2 proper motion survey : a field brown... [A.& A. **351** (1999) L5-L9]
 — *J.-N. Capdevielle et al.* :
 Inverse muon charge ratio induced... [Astroparticle Physics **11** (1999) 335-346]
 — *E. Pointecouteau et al. (J. Delabrouille)* :
 A Sunyaev-Zel'dovich map of the massive... [ApJ **519**, 2 (1999) L115-L118]
 — *E. Andersen et al., WA97 Coll. (A. Diaczek, M. Sené, R. Sené, S. Szafran, A. Volte)* :
 Strangeness enh. at mid-rapidity in Pb-Pb... [Phys. Lett. **B449** (1999) 401-406]
 — *A. Djannati-Ataï et al. (M. Punch, P. Espigat, C. Ghesquière)* :
 VHE Gamma-ray spectral properties of Mrk 501... [A.& A. **350** (1999) 17-24]
 — *M. Apollonio et al., CHOOZ Coll. (H. de Kerret, D. Kryn, B. Lefèvre, M. Obolensky, D. Véron, V. Vyrodov)* :
 Det. of neutrino incoming direction in... [Phys. Rev. **D61** (2000) 012001]
 Limits on ν oscillations from CHOOZ... [Phys. Lett. **B466** (1999) 415-430]

- *T. Patzak, P. Gorodetzky, K. Medjoubi, J.-C. Vanel* :
Generator of two single electrons separated in time... [NIM **A434** (1999) 358-361]
- *C. Hoffman et al. (M. Punch)* :
Gamma-ray astronomy at high energies. [RMP **71** (1999) 897-936]
- *F. Antinori et al., WA85 Coll. (M. Sené, R. Sené, A. Volte)* :
Enh. of strange and multi-strange baryons... [Phys. Lett. **B447** (1999) 178-182]
- *M. Spiro, D. Vignaud* :
Neutrino physics and astrophysics. [CRAS, **327** II b, (1999) 1047-1070]

14.2. Communications aux conférences

— *J.-C. Hamilton* : Preliminary Results and Perspectives in the ARCHEOPS Experiment.

Rencontres de physique de la vallée d'Aoste : Results and perspectives in particle physics — La Thuile, Vallée d'Aoste, France, 27 février - 4 mars 2000.

— *K. Ganga* : CMB Foregrounds.

XXXV^{es} Rencontres de Moriond - Les Arcs, France, 23-30 janvier 2000.

— *H. de Kerret* : CHOOZ final results. — (*ibid.*)

— *Y. Le Du* : AGAPE : résultats pour la recherche de MACHOS par effet de microlentilles gravitationnelles en direction de M31. — (*ibid.*)

— *B. Revenu et al., (A. Kim, J. Delabrouille, J. Kaplan)* : Destriping of polarized and unpolarized CMB data. — (*ibid.*)

— *J. Dolbeau et al., HELLAZ Coll. (A. de Bellefon, A. Diaczek, P. Gorodetzky, P. Guilloët, J.-J. Jaeger, P. Salin, A. Sarrat, S. Selmane, J.-C. Vanel, J. Waisbard)* : The solar neutrino project HELLAZ : status report on the hardware and the simulation.

LP99 (Lepton-Photon 99) — XIX International Symposium on Lepton and Photon Interaction at High Energies — Stanford, California, USA, 9-13 août 1999.

— *J.-N. Capdevielle* : Topological aspects of μ^+/μ^- abundances in cosmic ray events.

First Arctic Workshop on cosmic ray muons — CosmoLep, Sodankylä, Finlande, avril 1999.

— *J.-N. Capdevielle et al.* : Investigation of EAS lateral characteristics at Agarads altitude (3 200 m a.s.l.).

Conférence sur les rayons cosmiques, Yerevan, Arménie, juin 1999.

— *J.-N. Capdevielle, C. Le Gall et al.* : Energy determination in giant EAS. Proc. 26th International Cosmic Ray Conference, 437-440 — Salt Lake City, Utah, USA, 17-25 août 1999.

— *J.-N. Capdevielle, C. Le Gall* : Multiproduction at UHE and simulation of giant EAS. — *ibid.*, 482-485.

— *J.-N. Capdevielle* : Coplanar events and multiproduction event generators in the knee region. — *ibid.*, 111-114.

— *J.-N. Capdevielle et al.* : Significance of inverse μ^+/μ^- charge ratio correlated with neutrino-antineutrino abundance. — *ibid.*, 131-134.

- G. Mohanty *et al.*, CAT Coll. (A. Djannati-Ataï, P. Espigat, M. Punch) : Large zenith-angle observations with the CAT Cherenkov imaging telescope. — *ibid.*, Vol. 3, 452.
- P. Goret *et al.*, CAT Coll. (A. Djannati-Ataï, P. Espigat, M. Punch) : Search for > 400 GeV gamma-rays from the SNR Cas A with the CAT telescope. — *ibid.*, Vol. 3, 496.
- A. Musquère *et al.*, CAT Coll. (A. Djannati-Ataï, P. Espigat, M. Punch) : Search for VHE pulsed emission from the Crab with the CAT telescope. — *ibid.*, Vol. 3, 460.
- F. Piron *et al.*, CAT Coll. (A. Djannati-Ataï, P. Espigat, M. Punch) : Observations of gamma-ray emission from the blazar Markarian 421 above 250 GeV with the CAT Cherenkov imaging telescope. — *ibid.*, Vol. 3, 326.
- J.-P. Tavernet *et al.*, CAT Coll. (A. Djannati-Ataï, P. Espigat, M. Punch) : VHE spectral properties of Mrk 501 with the CAT telescope. — *ibid.*, Vol. 3, 322.
- F. Piron *et al.*, CAT Coll. (A. Djannati-Ataï, P. Espigat, M. Punch) : Search for VHE gamma-ray emission of selected BL-Lac objects with the CAT telescope. — *ibid.*, Vol. 3, 397.
- A. Kohne *et al.*, HESS Coll. (P. Espigat, M. Punch) : Astrophysics with HESS. — *ibid.*, Vol. 5, 271.
- A. Kohne *et al.*, HESS Coll. (P. Espigat, M. Punch) : HESS - The high-energy spectroscopic system. — *ibid.*, Vol. 5, 239.
- M. de Naurois *et al.*, CELESTE Coll. (P. Espigat, F. Münz, B. Giebels, A. Volte) : First results & future prospects for 30 GeV gamma rays from CELESTE. — *ibid.*, Vol. 5, 211.
- P. Goret *et al.*, CAT Coll. (A. Djannati-Ataï, P. Espigat, M. Punch) : Pseudo-stereo analysis as applied to CAT data.
GeV/TeV Gamma-Ray Astrophysics toward a major Atmospheric Cherenkov Telescope VI - Snowbird, Utah, USA, 13-16 août 1999.
- M. Punch *et al.*, HESS Coll. (P. Espigat) : Use of GHz analogue memories in ground-based gamma-ray astronomy. — (*ibid.*)
- C. Ghesquière *et al.*, CAT Coll. (A. Djannati-Ataï, P. Espigat, M. Punch) : VHE gamma ray observation of AGN by the CAT telescope.
TAUP 99 — Paris, France, 6-10 septembre 1999.
- J. Kaplan : Pixel lensing : present and future.
Workshop on Gravitational lensing — Capri, Italie, 28/9-20/10/1999.
- A. Sarrat : Efficacité de détection des électrons d'un nuage d'ionisation avec un détecteur Micromégas à deux dimensions.
5^{es} Rencontres avec les jeunes chercheurs — Aussois 6-10 décembre 1999.
- J.-C. Vanel : Signal processing techniques.
Proc. Third Rencontres du Vietnam, 251-256 — Hanoi, Vietnam, 4-10 janvier 1999.

14.3. Orateurs aux conférences

— *J.-C. Hamilton* : Preliminary Results and Perspectives in the ARCHEOPS Experiment.

Rencontres de physique de la vallée d'Aoste : Results and perspectives in particle physics — La Thuile, Vallée d'Aoste, France, 27/2-4/3/00.

— *K. Ganga* : CMB Foregrounds. — (*ibid.*)

— *H. de Kerret* : CHOOZ final results. — (*ibid.*)

— *Y. Le Du* : AGAPE : résultats pour la recherche de MACHOS par effet de microlentilles gravitationnelles en direction de M31. — (*ibid.*)

— *B. Revenu* : Destriping of polarized and unpolarized CMB data. — (*ibid.*)

— *A. de Bellefon* : Status report on TPC for solar neutrinos.

The 17th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN 99) — Cape Town, Afrique du Sud, 24-30 janvier 1999.

— *A. de Bellefon* : Forthcoming solar neutrino experiments.

Abingdon, Royaume-Uni, 8-9 mai 1999.

— *J.-N. Capdevielle* : Topological aspects of μ^+/μ^- abundances in cosmic ray events.

First Arctic Workshop on ray muons — CosmoLep, Sodankylä, Finlande, avril 1999.

— *J.-N. Capdevielle* : Coplanar events and multiproduction event generators in the knee region.

26th International Cosmic Ray Conference, proc. 111-114 — Salt Lake City Utah, USA, 17-25 août 1999.

— *J.-N. Capdevielle* : Energy determination in giant EAS. — *ibid.*, 437-440.

— *J. Dolbeau* : The solar neutrino project HELLAZ : status report on the hardware and the simulation.

LP99 (Lepton-Photon 99) — XIX International Symposium on Lepton and Photon Interaction at High Energies — Stanford, California, USA, 9-13 août 1999.

— *C. Ghesquière* : VHE gamma ray observation of AGN by the CAT telescope. TAUP 99 — Paris, France, 6-10 septembre 1999.

— *J. Kaplan* : Pixel lensing : present and future.

Workshop on Gravitational lensing — Capri, Italie, 28/9-20/10/99.

— *M. Punch* : Use of GHz analogue memories in ground-based gamma-ray astronomy.

GeV/TeV Gamma-Ray Astrophysics toward a major Atmospheric Cherenkov Telescope VI — Snowbird, Utah, USA, 13-16 août 1999.

— *A. Sarrat* : Efficacité de détection des électrons d'un nuage d'ionisation avec un détecteur Micromegas à deux dimensions.

5^{es} Rencontres avec les jeunes chercheurs — Aussois, 6-10 décembre 1999.