

Projet de création d'un GDR
"Phénomènes cosmiques de haute énergie"

11 avril 2000

Ce document a été rédigé principalement par B. Degrange (LPNHE-Ecole Polytechnique) et G. Pelletier (Observatoire de Grenoble) avec l'aide de: M. Boratav (LPNHE-Paris), G. Fontaine (IN2P3), I. Grenier (DAPNIA/SAp Saclay), J.-M. Hameury (Observatoire de Strasbourg), L. Moscoso (DAPNIA/SPP Saclay), J. Paul (DAPNIA/SAp Saclay), P. Peter (DARC Meudon) G. Vedrenne (CESR Toulouse) et D. Vignaud (PCC Collège de France). Les auteurs ont repris certains passages de la demande d'action spécifique rédigée en 1996 par T. Montmerle (DAPNIA/SAp Saclay).

1 Introduction historique

L'astrophysique des hautes énergies fait son apparition dans l'immédiat après-guerre et concerne tout d'abord les particules chargées et les processus d'émission non thermiques. L'essor de la radio-astronomie entraîne de multiples travaux sur les électrons (accélération, propagation), quand Shklovsky montre dans les années 1950 que le rayonnement de la nébuleuse du Crabe est dû au rayonnement synchrotron d'électrons relativistes (d'énergies supérieures au GeV) dans des champs magnétiques de l'ordre d'une fraction de Gauss. En même temps, les physiciens posent la question de l'origine des particules chargées de très haute énergie (supérieure au TeV) qu'ils détectent indirectement sous forme de grandes gerbes de particules secondaires dans l'atmosphère. La France s'illustre particulièrement dans ce domaine (Louis Leprince-Ringuet, Pierre Auger).

Les années 1960 voient naître la physique spatiale, d'abord aux Etats-Unis où des physiciens embarquent des détecteurs de rayons X à bord de fusées et découvrent la première source X: Scorpius X1 (R. Giacconi 1962). En revanche, les interactions de particules à haute énergie étant désormais étudiées auprès des grands accélérateurs, l'activité sur les grandes gerbes décroît — elle disparaît presque complètement en France — et l'étude du rayonnement cosmique galactique (composition élémentaire et spectre), bénéficiant des nouvelles techniques spatiales (ballons, satellites) est pris en charge par les laboratoires spatiaux. Cependant, les particules cosmiques chargées, déviées par les champs magnétiques galactiques, ne montrent aucune anisotropie dans leur direction d'arrivée et ne peuvent être rattachées à aucun objet astronomique défini. Dès 1960, K. Greisen préconise le recours aux particules neutres et stables, γ et neutrinos, pour accéder aux sources de rayons cosmiques. Il faut cependant attendre la fin des années 1960 (avec le satellite OSO III) pour que naisse l'astronomie gamma, qui progresse surtout dans les années 1970 avec les missions spatiales SAS-II et COS-B. Grâce à ce dernier satellite, la France est présente dans ce nouveau domaine, mais, faute d'un nombre suffisant de sources, cette activité reste le fait d'une faible part de la communauté astrophysique française. Il faut noter cependant les travaux sur les corrélations entre l'émission γ galactique et les traçeurs de la matière interstellaire. Par ailleurs, les sources radio (galaxies actives, restes de supernovæ et pulsars), bientôt reconnues comme sources de particules relativistes, font l'objet de nombreux travaux théoriques.

Au cours de la décennie 1980, certains physiciens des particules se réintéressent aux rayons cosmiques de très haute énergie. Cela tient à l'apparition de nouveaux détecteurs, (par exemple les expériences souterraines sur la stabilité du proton qui détectent les groupes de muons à grande profondeur et sur une grande surface), et aux progrès réalisés dans l'instrumentation. Ce regain d'intérêt affecte aussi bien les Etats-Unis (expérience CASA-MIA de James Cronin) que l'Europe. En particulier, en France, un premier contact entre physiciens des particules et astrophysiciens des rayons cosmiques est renoué avec l'expérience du tunnel du Fréjus. En 1986 et 1987, sont lancées deux expériences-prototypes d'astronomie gamma à partir du sol: ASGAT (CEA) au-dessus de 600 GeV et THEMISTOCLE (IN2P3) au-dessus de 2 TeV; toutes deux mettent en évidence le rayonnement gamma de la nébuleuse du Crabe à très haute énergie, confirmant le premier résultat obtenu par l'équipe de Trevor Weekes à l'observatoire Whipple aux Etats-Unis en 1989 avec

la technique d'imagerie Tcherenkov. Les installations d'ASGAT et de THEMISTOCLE sont depuis 1996 intégrées dans l'ensemble CAT (« Cherenkov Array at Thémis») avec un télescope d'imagerie Tcherenkov performant.

La décennie 1990 apporte une importante moisson de résultats et voit naître de nombreux projets, donnant à l'astrophysique des hautes énergies une nouvelle stature: c'est d'abord le succès des missions spatiales: SIGMA (télescope construit par le CEA et le CERN, apte à localiser avec précision les sources actives dans la bande de 35 keV à 1,3 MeV) et surtout COMPTON Gamma-Ray Observatory qui porte le nombre de sources γ connues entre 20 MeV et 10 GeV à plus de 300 (dont une bonne partie d'objets extragalactiques). Les progrès récents dans la compréhension des sursauts γ lui doivent beaucoup, de même qu'aux satellites X (Beppo-SAX et Rossi-XTE) qui ouvrent la voie à la découverte de leurs contreparties optiques. Au sol, la technique d'imagerie Tcherenkov permet à divers groupes (observatoire Whipple, expérience HEGRA, expérience CAT dans l'hémisphère nord; expérience CANGAROO dans l'hémisphère sud) de découvrir et confirmer plusieurs sources γ émettant jusqu'à plus de 15 TeV. Les expériences CELESTE en France et STACEE aux États-Unis cherchent enfin à explorer la dernière zone inconnue du spectre électromagnétique, de 10 à 200 GeV.

En parallèle, apparaissent de nouveaux projets (à participation française) pour la décennie à venir. Les satellites γ INTEGRAL (de 20 keV à 10 MeV) et GLAST (de 10 MeV à 300 GeV) auront une sensibilité accrue et de meilleures résolutions angulaire et spectrale que les instruments actuels. Le domaine du TeV sera exploré plus systématiquement par de grands réseaux de télescopes Tcherenkov (en particulier le projet européen HESS). Parallèlement, la détection de neutrinos cosmiques de très haute énergie devrait, dans un avenir proche, compléter utilement celle des γ . Malgré l'échec du projet américain DUMAND, les développements des expériences exploratoires Baïkal et AMANDA ont encouragé des groupes du CEA, de l'IN2P3 et de l'INSU à lancer le projet ANTARES. Enfin, l'énigme posée par les énergies extrêmes (10^{20} eV ou plus) atteintes par certaines particules est à l'origine du projet d'observatoire «Auger», lancé à l'échelle mondiale par James Cronin.

Jusqu'à ces dernières années, la communauté astrophysique française (en dehors des laboratoires spatiaux) est restée peu engagée dans l'astrophysique des hautes énergies. Cette situation est en train de changer très rapidement en raison des développements et des engagements que nous venons d'évoquer. La compréhension d'objets astrophysiques par des suivis à différentes longueurs d'onde nécessite la collaboration de divers spécialistes. C'est pourquoi il est nécessaire d'unir les efforts et les compétences de plusieurs communautés au sein d'un groupement de recherche: astrophysiciens observateurs et théoriciens et physiciens des particules, ces groupes étant de plus répartis entre le DAPNIA du CEA (SAP et SPP) et le CNRS (IN2P3, INSU et SPM).

2 Enjeux physiques

Ces développements instrumentaux récents ont redonné un nouvel essor à l'astrophysique des hautes énergies, ouvrant de nouvelles problématiques, notamment: origine et

conséquences des émissions intenses et très variables de certains noyaux actifs de galaxies (AGN, Active Galactic Nuclei) dans le domaine γ ; origine et conséquences des sursauts gamma (GRB, Gamma-Ray Bursts) dont l'origine extragalactique semble avérée pour la plupart. Dans ces deux exemples majeurs l'émission gamma serait due soit à des processus purement électrodynamiques, soit aux désintégrations de mésons π^0 , eux-mêmes produits par l'interaction de protons ou noyaux sur le rayonnement ambiant. Dans cette dernière hypothèse, les protons d'énergies les plus élevées du rayonnement cosmique (10^{20} eV ou plus) pourraient être responsables de certaines émissions γ et produire en même temps un flux de neutrinos de haute énergie comparable au flux de γ . L'astronomie gamma aux très hautes énergies vient donc renforcer l'intérêt du nouveau projet «Auger» sur les rayons cosmiques aux énergies extrêmes. Elle encourage également une nouvelle aventure scientifique, l'astronomie des neutrinos de haute énergie. L'origine des rayons cosmiques les plus énergétiques est recherchée dans divers types d'objets ou de milieux: l'environnement proche ou périphérique des noyaux actifs de galaxie (AGN), les sources des sursauts γ (GRB), les produits de désintégration ou d'interconnexion de défauts topologiques, les chocs de grandes structures cosmologiques. En outre, les GRB pourraient être la manifestation de coalescences d'objets compacts ou d'effondrements éventuellement accompagnés d'émission d'ondes gravitationnelles. Ces nouvelles fenêtres d'observation concernent donc directement la physique de l'environnement des objets compacts (trous noirs, étoiles à neutrons, défauts topologiques), part importante de l'astrophysique relativiste, et ouvrent également la thématique nouvelle de la physique des «astroparticules». Elles mettent en rapport deux cultures scientifiques différentes, ce qui laisse présager des collaborations fécondes.

2.1 Accrétion et environnement des objets compacts

L'environnement des objets compacts (naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs) est généralement modélisé comme un écoulement de plasma en grande partie accrété par l'objet compact; une classe particulière de ces environnements présente également des jets très puissants (d'une puissance comparable à celle qui est rayonnée sous forme de corps noir par le disque d'accrétion). Ces jets sont le siège de rayonnements de haute énergie résultant de l'accélération des particules.

L'étude des disques d'accrétion est la clé pour élucider la nature de l'objet compact; de grands progrès ont été accomplis récemment, notamment grâce à l'astronomie X et à l'astronomie γ à basse énergie et les prochaines missions spatiales (Chandra, XMM, INTEGRAL) vont probablement confirmer l'hypothèse de trous noirs au cœur des AGN et de certains objets compacts galactiques. L'analyse des raies du fer (figure 1) a déjà permis de sonder le voisinage immédiat du trou noir (soit un ou deux rayons gravitationnels); les observations futures (XMM, Chandra) devraient permettre d'obtenir une certitude sur la présence d'un trou noir et d'en déterminer le moment cinétique (trou noir de Schwarzschild ou de Kerr). La physique des disques d'accrétion, de plus en plus contrainte par les observations dans toute la gamme électromagnétique, est un thème important de l'astrophysique fondamentale dont dépend la compréhension des phénomènes

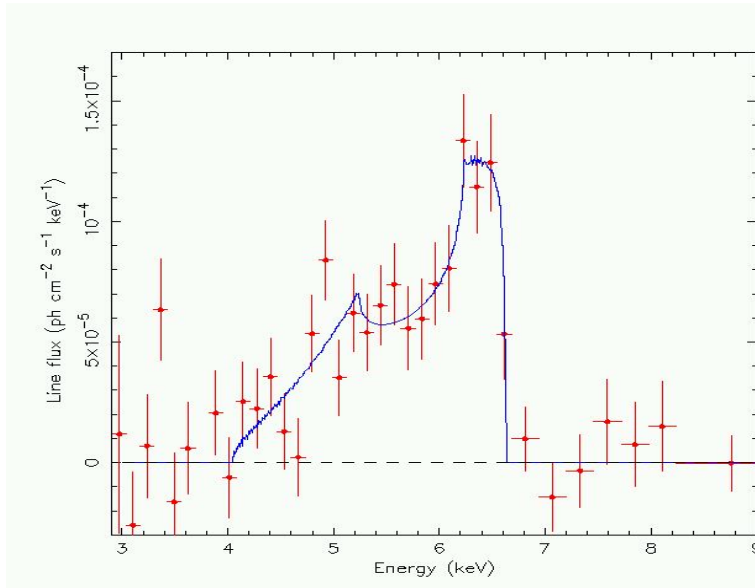


FIG. 1 – *Le profil de la raie $K\alpha$ du fer de la galaxie MCG-6-30-15 observée par le satellite ASCA [1]. La grande largeur de la raie d’émission implique des vitesses de l’ordre du tiers de la vitesse de la lumière. On constate une asymétrie marquée vers les énergies inférieures à celle de la raie d’émission au repos (6,4 keV). Cette asymétrie est très probablement provoquée par les décalages — gravitationnel et Doppler relativiste — à proximité du trou noir central de la galaxie. La courbe en trait plein montre le profil attendu pour un disque de matière orbitant autour du trou noir et s’étendant entre 3 et 10 rayons de Schwarzschild. Les futures missions spatiales en rayons X (Chandra, XMM) permettront de réduire fortement les erreurs expérimentales et par suite de mieux tester les modèles.*

de haute énergie dans les AGN¹ et les candidats trous noirs galactiques. Cette physique comporte des études d’hydrodynamique et de magnétohydrodynamique, non seulement pour la description des écoulements laminaires, mais aussi et surtout maintenant pour résoudre les problèmes importants de transport du moment angulaire, du champ magnétique et des particules suprathermiques. Ce transport est conditionné par le développement de la turbulence ou de phénomènes non linéaires globaux engendrés par des instabilités. Le champ magnétique est actuellement considéré comme un agent essentiel du déclenchement de ces instabilités. En outre, une ou plusieurs instabilités magnétohydrodynamiques (MHD) sont probablement à l’origine des phénomènes éruptifs observés dans toute la gamme électromagnétique et notamment dans le domaine γ .

On constate que la majorité des trous noirs accrétants répertoriés de la Galaxie se re-

1. Ce thème est d’autant plus important qu’il concerne tous les AGN et pas seulement les 10 % d’entre eux qui forment des jets. Dans l’étude de ces derniers, il est important de bien connaître la contribution du disque à l’émission.

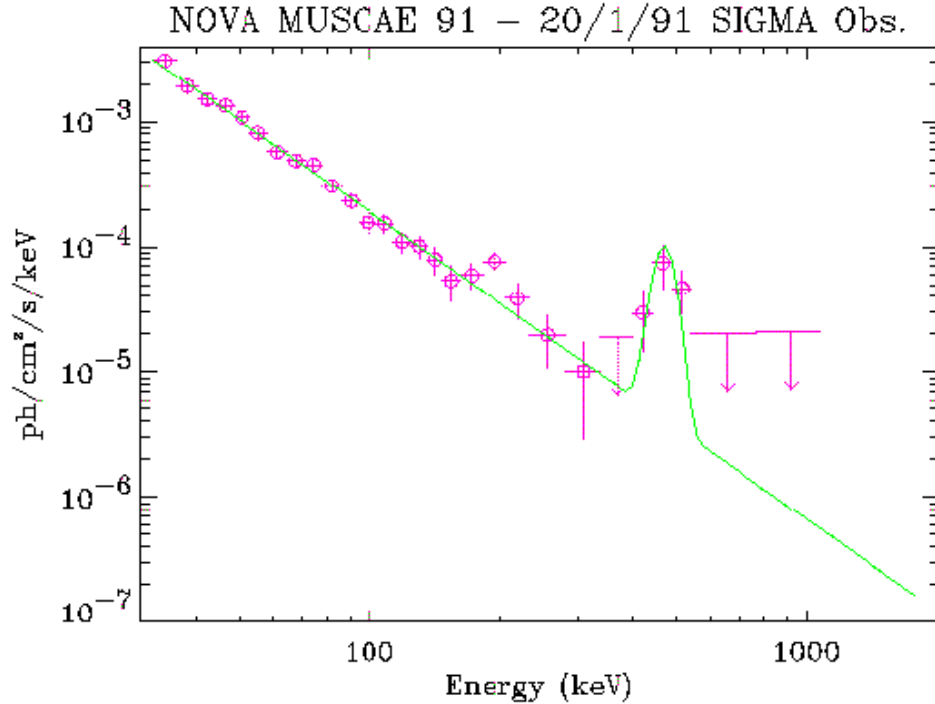


FIG. 2 – Spectre en photons de Nova Muscae 1991 enregistré par Sigma le 20 Janvier 1991 au cours des 13 dernières heures d’observation. La ligne continue représente le modèle spectral qui s’ajuste le mieux aux données d’observation en combinant une loi de puissance d’indice spectral -2.4 et une raie de profil gaussien centrée à 480 keV avec une largeur à mi-hauteur de 55 keV.

trouve dans des systèmes à émission transitoire dans les X et les γ de basse énergie (novæ X à trou noir). Ces sources, dont la physique s’apparente à celle des AGN sont plus facilement observables, avec en particulier des temps caractéristiques plus courts; XMM va permettre des suivis temporels à la milliseconde, apportant des diagnostics cruciaux des régions les plus proches du trou noir. Les ressemblances et différences avec les AGN sont riches d’enseignements. Nova Muscae 1991 [6] est l’un des spécimens les plus représentatifs de la famille des novæ X à trou noir. Dans les jours qui suivirent sa découverte, la luminosité X de la source s’accrut de plus d’un ordre de grandeur pour atteindre $\sim 3 \times 10^{38}$ erg s^{-1} , valeur très proche de la luminosité d’Eddington. Le spectre de son émission au-delà de 100 keV, mesuré par SIGMA (figure 2), était bien représenté par une loi de puissance. Peu après le paroxysme, la source fut le siège d’un excès d’émission présentant l’aspect d’une raie centrée vers 473 keV, structure spectrale pouvant s’interpréter comme une raie d’annihilation $e^+ - e^-$ décalée vers le rouge par l’intense champ gravitationnel régnant à proximité de l’astre accrétant. La valeur obtenue pour la masse, environ $3,1 M_{\odot}$, confirme la nature «trou noir» de Nova Muscae 1991 [7] [8]. Les variables cataclysmiques sont aussi concernées par cette physique. Leur étude est particulièrement intéressante pour mettre à jour les propriétés des disques d’accrétion à travers leurs phénomènes transitoires. Ces objets semblent présenter également les deux types d’écoulement d’accrétion, soit de type

Shakura-Sunyaev [2], soit de type advectif [3].

Outre l'hydrodynamique et la magnétohydrodynamique, la théorie du transfert de rayonnement sur l'ensemble du domaine électromagnétique dans ces environnements nécessite encore bien des développements et la mise en œuvre de codes numériques lourds.

2.2 Les jets des noyaux actifs de galaxies et des micro-quasars

Les AGN, par leur puissance (10^{44} à 10^{46} erg s⁻¹) et leur compacité (taille inférieure à 100 unités astronomiques), et notamment, pour certains d'entre eux, par la capacité à concentrer des champs magnétiques (de l'ordre du kGauss), sont des machines à haute énergie par excellence. Ils font partie des meilleurs candidats pour la production des rayons cosmiques de très haute énergie, tout comme leurs extensions (jets, points chauds ou «hot spots», lobes étendus). La théorie qui fait l'objet d'un très large consensus explique cette puissance par la conversion de l'énergie mécanique (gravitation + rotation) de la matière accrétée (transport du moment angulaire) en rayonnement et/ou en jets [4]; en outre, il est aussi possible d'extraire de l'énergie de rotation d'un trou noir plongé dans un champ magnétique sous la forme d'un flux de Poynting susceptible, par couplage à la matière, de produire du rayonnement non thermique et de l'éjection [5]. Les jets sont des écoulements MHD très puissants (de puissance comparable à la luminosité du noyau) et très collimatés (les «points chauds» des régions terminales sont de quelques kpc pour des longueurs de jets de plusieurs centaines de kpc) dont le lancement fait l'objet de travaux théoriques et numériques considérables qui demanderont encore des années d'effort. Avec des champs magnétiques devant probablement atteindre quelques kilogauss dans des régions de quelques unités astronomiques, les AGN peuvent produire des forces électromotrices considérables pour accélérer des particules.

Les «blazars» [15], noyaux actifs de galaxies dont le spectre électromagnétique s'étend des ondes radio jusqu'au domaine γ (parfois jusqu'au TeV) manifestent une variabilité, notamment aux hautes énergies, sur une échelle de temps inférieure à la journée. La brièveté de leurs éruptions plaide fortement en faveur de l'existence de trous noirs supermassifs, dont la formation à partir des fluctuations primordiales n'est pas encore expliquée. Les nouveaux instruments γ , mettant en évidence des cassures et des coupures dans les spectres de ces objets, fournissent des informations très précieuses pour contraindre les modèles physiques. De plus, les délais entre les manifestations d'un phénomène éruptif dans les diverses gammes spectrales sont des informations cruciales pour la physique de ces environnements. En outre, les informations découlant des études faites en radio avec la technique d'interférométrie à très longue base (VLBI) — cartes et polarisation — associées aux observations γ permettent d'analyser le contenu en paires $e^+ - e^-$ [16]. L'effet de collimation relativiste et d'amplification Doppler sélectionne les sources dont le jet pointe sous un angle faible par rapport à la direction d'observation. Le modèle unifié des AGN propose de rendre compte de l'ensemble de la phénoménologie par des effets d'orientation; cette hypothèse a remporté des succès indéniables et fait l'objet d'importantes investigations. Dès lors, l'étude des blazars (et en particulier des lacertides) à haute énergie peut avoir des répercussions sur un vaste ensemble d'AGN.

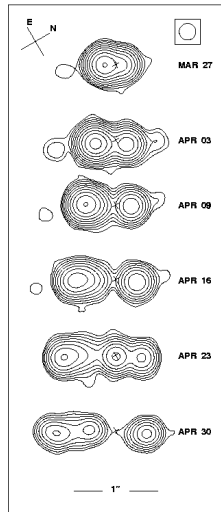


FIG. 3 – *Observations successives en radio (VLA, $\lambda = 3,5$ cm) des éjections de plasma dans le micro-quasar GRS 1915+105 en Avril 1994 [13]; on observe des condensations radio qui s'éloignent de la source à des vitesses apparentes super-luminiques ; cette illusion relativiste implique des vitesses d'éjection de l'ordre de $0,9 c$.*

L'étude de la contribution des AGN aux rayonnements de fond à haute énergie est également importante pour contraindre les modèles.

Les micro-quasars sont des sources compactes possédant des jets semblables à ceux des AGN, mais de taille stellaire; quelques-uns ont été découverts dans notre Galaxie, notamment dans les régions centrales. Ils constituent des maquettes fort intéressantes, proches de nous, des monstres extragalactiques (figure 3).

L'accélération de particules, et par suite les rayonnements synchrotron et Compton inverse des jets, dépendent de la génération de perturbations (turbulence et chocs) en leur sein. L'étude des instabilités des jets et de leur interaction avec le milieu ambiant est un thème en plein développement.

2.3 Phénomènes explosifs

Les phases explosives de certains types d'étoiles peuvent engendrer toutes sortes de phénomènes de haute énergie. Par exemple, dans une étoile double dont l'une des composantes est une naine blanche, la matière éventuellement accrétée par l'astre compact peut s'échauffer et se comprimer au point de déclencher des réactions thermonucléaires explosives. Quand elles n'affectent que la périphérie de la naine blanche (cas des novæ), une masse d'environ $10^{-5} M_{\odot}$ est éjectée à des vitesses de l'ordre de 1000 km s^{-1} . Pour peu que la masse de la naine blanche soit voisine de la limite de Chandrasekhar, le même mécanisme peut conduire à une conflagration thermonucléaire générale débouchant sur l'explosion de l'étoile dont toute la matière est éjectée à plus de 10^4 km s^{-1} (cas des supernovæ de type Ia). D'autres types de supernovæ résultent de l'explosion d'une étoile massive consécutive à l'effondrement du cœur. Tout en se refroidissant par l'émission de

neutrinos, le cœur hyperdense engendre, en se détendant, une onde de choc qui rallume les réactions nucléaires dans les couches profondes du manteau, produisant tout un cortège d'éléments, jusqu'aux plus lourds, parmi lesquels les isotopes radioactifs qui intéressent l'astronomie γ nucléaire. L'onde de choc, à laquelle les neutrinos impriment une impulsion supplémentaire, disperse le manteau et les couches supérieures de l'étoile tout en les portant à haute température. L'intense émission lumineuse qui s'ensuit ($\sim 10^9 L_{\odot}$) est le signe évident d'une supernova. Compte-tenu de la rareté de telles explosions dans notre Galaxie, leur détection directe reste peu probable, mais l'émission γ de ^{44}Ti à 1,15 MeV peut servir de traceur : la demi-vie de ce noyau, de l'ordre de 70 ans, permet de le chercher dans les vestiges de supernovæ vieux de plusieurs centaines d'années. Cette raie a été détectée par COMPTEL (à bord du satellite Compton-GRO) en provenance de Cas A et d'un reste récent de supernova découvert par ROSAT dans la région de Vela. Avec INTEGRAL, en raison de la sensibilité accrue due à la résolution du spectromètre SPI, on s'attend à découvrir plusieurs restes de supernovæ. Il est important de déterminer la masse de ^{44}Ti éjectée pour affiner les modèles d'explosion qui viennent d'être évoqués.

Les vestiges de supernova sont aussi des sites propices à l'accélération de particules chargées. Notons d'abord le fait que les pulsars isolés qui résultent de l'effondrement de certains progéniteurs de supernova sont susceptibles d'injecter des électrons relativistes au-delà de leur cylindre de lumière. Plus généralement, l'onde de choc créée par la propagation des vestiges de supernova est en mesure d'accélérer protons et noyaux. Les particules accélérées sont ensuite amenées à interagir avec les matériaux éjectés et avec la matière interstellaire proche. S'agissant des seuls électrons, des interactions sont également possibles avec les champs magnétiques et les champs de photons confinés dans les vestiges de supernova. L'onde de choc en expansion est susceptible d'accélérer aussi bien les particules du matériau éjecté que celles de la matière interstellaire qu'elle a balayée ; elle peut également réaccélérer le rayonnement cosmique incident. La densité de particules accélérées au voisinage du vestige de supernova s'accroît tout au long de la phase d'expansion libre, puis culmine lors de la phase d'expansion adiabatique qui débute quand la quantité de matière balayée équivaut à celle qui a été éjectée lors de l'explosion ; cette phase dure environ 10^4 ans. La densité de particules décroît enfin lors de la phase de refroidissement radiatif, qui s'établit quand les pertes d'énergie par transfert radiatif sont du même ordre que les pertes d'énergie cinétique, phase qui se poursuit jusqu'à dissipation complète du vestige dans le milieu interstellaire. Irradiés par les particules ainsi accélérées, le vestige de supernova lui-même ainsi que les zones les plus denses du milieu interstellaire proche sont le site d'interactions $p - p$. On s'attend donc à détecter les photons γ provenant de la décroissance des π^0 issus des interactions $p - p$. Une étude portant sur des sources γ du catalogue EGRET associées avec des vestiges de supernova a ainsi permis d'estimer qu'environ 10% de l'énergie libérée par les supernovæ se retrouve sous forme de particules accélérées. L'interaction de ces rayons cosmiques (protons, particules α) avec la matière des grands nuages de gaz peut aussi produire des raies γ nucléaires. L'excitation des raies de ^{12}C et ^{16}O à 4,4 MeV et 6 MeV a été largement étudiée ces dernières années et l'estimation des flux de telles émissions permet d'envisager leur détection par le satellite INTEGRAL.

Les sursauts γ (GRB) représentaient depuis des décennies une importante énigme pour

l'astrophysique des hautes énergies. Les résultats de ces dernières années ont bouleversé notre compréhension de ces phénomènes; en effet, la détection des contreparties optiques (ROTSE, Robotic Optical Transient Search Experiment) et X (satellite italo-néerlandais Beppo-SAX) de certains d'entre eux, notamment l'exemple spectaculaire de GRB990123, ont confirmé leur origine extragalactique. Ces explosions, une par jour en moyenne, réparties de façon isotrope dans l'Univers sont distribuées selon un diagramme $\{\log N - \log P\}$ (N étant le nombre de sursauts dont le pic d'intensité est supérieur à P) qui présente un déficit à faible intensité par rapport à une droite de pente $-3/2$. L'histogramme des durées est bimodal indiquant une famille de GRB très courts, de durées de l'ordre de 0.1s, et une autre de durées plus longues, de l'ordre de 10s. L'énergie libérée s'échelonne entre 10^{51} et 10^{53} erg, soit 10^{-3} à 10^{-1} fois l'énergie d'une masse solaire.

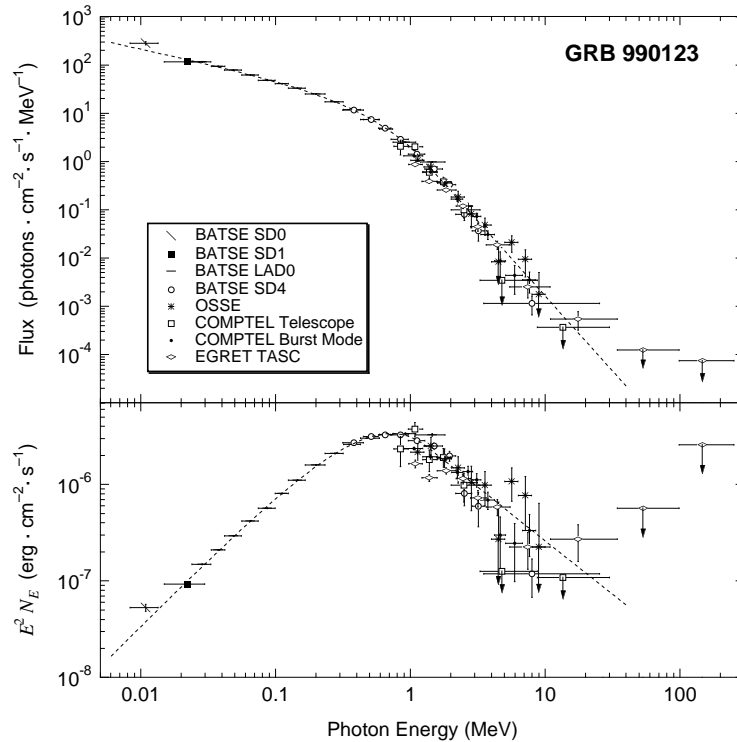


FIG. 4 – Sursaut γ du 23 Janvier 1999 : spectres obtenu par les détecteurs à bord du satellite Compton GRO [45]. La figure du haut donne directement le flux de photons par intervalle d'énergie; celle du bas donne la puissance reçue par cm^2 et par intervalle logarithmique d'énergie ($\nu F(\nu)$).

L'interprétation des spectres (figure 4) et de leur évolution auto-similaire selon le modèle de la «boule de feu» [9] a remporté beaucoup de succès; il est fondé sur la généralisation de la théorie de Sedov (modélisation de l'expansion d'une supernova) à une hydrodynamique ultrarelativiste impliquant des facteurs de Lorentz de $10^2 - 10^3$. De grandes questions restent cependant en suspens: l'expansion ultra-relativiste est-elle isotrope ou collimatée? Le rayonnement est-il, comme dans le cas des blazars, le reflet de processus purement électrodynamiques ou de processus hadroniques? Sont-ils générateurs des rayons cosmiques ultimes et de neutrinos [11] [12]? Si oui, est-ce à travers le choc ex-

terne avec le milieu interstellaire qui produit ce qu'on appelle l'«afterglow», ou à travers les chocs ou les perturbations internes? Enfin quelle est la nature de l'événement déclencheur, coalescence de deux objets compacts, effondrement d'un objet d'une centaine de masses solaires ou phénomène plus exotique? La mise en mouvement initiale semble devoir impliquer une accrétion-éjection avec champ magnétique très intense (pouvant dépasser le champ de claquage du vide de 10^{13} Gauss) autour d'un trou noir dans un régime extrême. L'étude multi-spectrale des «afterglows» est une clé importante de cette exploration, car elle permet de tester toutes les conséquences du modèle de la «boule de feu» et d'en raffiner les hypothèses. Les GRB sont aussi le signe probable de coalescences et/ou d'effondrements générateurs d'ondes gravitationnelles. Enfin, l'étude de la contribution des GRB aux rayonnements de fond diffus de haute énergie est importante pour contraindre les modèles.

2.4 Accélération de particules

Pour tous les objets connus susceptibles d'être sources de rayons cosmiques de très haute énergie parce qu'ils peuvent produire une grande force électromotrice (fort produit BR , R étant la taille caractéristique de la source), les processus d'accélération de Fermi doivent être considérés dans un régime d'efficacité extrême pour rendre compte des énergies ultimes. Le produit BR ne dépasse guère la valeur de 1 Gauss \times parsec qui serait nécessaire pour atteindre ces énergies; toutefois cette condition est en elle-même insuffisante, le facteur limitatif le plus sévère étant le temps de résidence dans la zone accélératrice. Cette constatation conduit soit à étudier les processus de Fermi dans des conditions inhabituelles (chocs relativistes ou perturbations MHD relativistes) qui nécessitent des développements théoriques nouveaux, soit d'imaginer de nouveaux processus d'accélération.

Si le flux de rayons cosmiques et la forme du spectre sont assez bien compris jusqu'à $10^{15} eV$ en supposant que les sources principales sont les restes de supernovæ, au-delà de cette énergie aucune interprétation n'est vraiment satisfaisante et l'origine de ces particules est un enjeu fondamental. Une autre question importante reste sans réponse: les spectres en lois de puissance sont-ils produits localement dans les sources ou résultent-ils d'une superposition au sein de chaque source ou sur leur ensemble?

Dans sa version la plus en vogue, la théorie du processus de Fermi du 1^{er} ordre dans un choc non relativiste présente encore des lacunes, ce qui justifie de maintenir les efforts en cours. En particulier, l'injection des divers constituants du rayonnement cosmique dans les processus de Fermi dont le seuil en énergie est élevé, n'a pas reçu à ce jour d'explication complète. La contribution de processus d'accélération basés sur une composante de champ électrique parallèle au champ magnétique a certainement son importance à basse énergie.

2.5 Rayonnement cosmique d'énergie extrême

Les réalisations du projet «Auger» [44] et des projets de télescopes à neutrinos [40] [41] devraient faire progresser significativement la recherche de l'origine des rayons cosmiques

aux énergies les plus élevées, énigme importante de l’astrophysique moderne. Les rayons cosmiques sont diffusés par le champ magnétique galactique jusqu’à $10^{15} eV$; au-delà, leur distribution est néanmoins isotrope, ce qui suggère une origine extragalactique. Les protons issus d’une telle source interagissent avec le fond radio cosmologique à $2,7K$ en produisant des pions par photo-production au-delà d’une énergie de seuil voisine de $5 \times 10^{19} eV$ (effet Greisen-Zatsepin-Kuzmin ou GZK). Il en résulte qu’aucun proton d’énergie supérieure à ce seuil ne peut provenir d’une source située à plus de 100 Mpc [14]. Sur cette distance, les protons de cette énergie, diffusés par les irrégularités du champ magnétique, subissent une déviation angulaire estimée grossièrement à 1° . Cette incertitude sur la direction d’origine croît comme la racine carrée de la distance — du moins dans l’hypothèse de diffusion, qui reste à vérifier. Ainsi, dans le projet «Auger» [44], le gain en statistique d’événements observés au-delà de la limite GZK — on sait déjà qu’il en existe — permettra des investigations plus poussées, pouvant conduire à des conclusions inattendues.

Outre les AGN et leurs structures étendues (lobes et points chauds) [10], les GRB et les nébuleuses de pulsar, d’autres candidats à la production des rayons cosmiques ultimes ont été proposés : les défauts topologiques et les grandes structures cosmologiques (si un champ magnétique proche du microgauss est engendré au cours de la formation de ces structures).

Le transport de ces rayons cosmiques ultimes et leurs interactions avec le milieu interstellaire devront faire l’objet d’études approfondies. Les mêmes études à plus basse énergie sont encore incomplètes et les nouvelles données qui seront fournies par le spectromètre magnétique AMS [20] sur la station orbitale internationale à partir de 2003, vont permettre de progresser.

Par ailleurs, l’étude des gerbes atmosphériques aux énergies les plus élevées, engendrant un nombre de particules de l’ordre de 10^{11} , nécessite encore d’importants développements de simulation pour interpréter les observations, la difficulté principale étant ici l’imbrication entre la nature de la particule primaire et la physique hadronique à des énergies non couvertes par les accélérateurs ou collisionneurs actuels.

2.6 Astrophysique relativiste

Divers aspects importants de l’astrophysique relativiste relèvent de la thématique du GDR proposé. Un gros effort théorique devra être consacré à l’électrodynamique des trous noirs en rotation, compte tenu de leur environnement. Ceux-ci n’ayant pas de champ magnétique propre, leur énergie de rotation ne peut être extraite que par le maintien d’un champ magnétique par l’environnement, notamment par le disque d’accrétion. En outre la nature du couplage du flux de Poynting qui en résulte avec la matière environnante demeure inconnue.

Le pulsar est un objet particulier de l’astrophysique relativiste dont l’astronomie γ a renouvelé l’intérêt, d’une part en observant des signaux γ pulsés provenant vraisemblablement de la magnétosphère du pulsar, d’autre part en observant des flux continus de γ attribués à une nébuleuse associée. La puissance provenant du ralentissement de la rotation du pulsar par sa structure magnétosphérique est transportée par le vent ultra-

relativiste de paires $e^+ - e^-$. L'étude de ces vents (leur formation dans la magnétosphère avec haute magnétisation et leur dissipation jusqu'au choc relativiste de basse magnétisation) est un thème important de l'astrophysique relativiste, y compris dans la perspective de l'accélération des particules cosmiques.

Le rayonnement des défauts topologiques est encore sujet à bien des hypothèses qui vont, on l'espère, se préciser dans les années à venir, notamment par des progrès en physique des particules ; (par exemple, existe-t-il une échelle de masse intermédiaire entre l'unification électro-faible et la grande unification?).

Instabilités, chocs, perturbations magnétiques et accélération de particules dans les plasmas relativistes sont des phénomènes importants pour cette thématique, tant pour les AGN que pour les GRB et les nébuleuses de pulsars. Ils n'ont été que très peu étudiés jusqu'à présent.

2.7 Les particules cosmiques exotiques

Les théories les plus simples de supersymétrie prédisent l'existence d'une nouvelle particule stable (et supersymétrique) : le neutralino. Les neutralinos d'origine cosmologique sont donc des candidats naturels pour expliquer la matière cachée de l'Univers. Particules de Majorana, elles s'annihilent mutuellement quand elles sont en concentration suffisante, produisant *in fine* diverses particules stables (γ , neutrinos) dont le spectre est prédit. En particulier, le Soleil et la Terre — d'où peuvent s'échapper les neutrinos — sont des sites possibles de concentration de ces particules massives à interaction faible (ou «WIMP» Weakly Interacting Massive Particles). La détection des neutrinos des WIMP [17] [18] est un objectif majeur des futurs télescopes à neutrinos comme ANTARES [41]. Le Centre Galactique, autre site possible de concentration de neutralinos, présente en outre l'avantage de laisser passer le rayonnement γ [19], observable par une expérience telle que HESS dans l'hémisphère sud. L'annihilation des WIMP produit aussi des antiparticules (\bar{p} , e^+) dont on peut déceler la présence en mesurant avec précision leur spectre dans le rayonnement cosmique ; c'est l'un des objectifs de l'expérience AMS [20] dont la résolution en énergie sera de 2 à 3% et qui pourra mesurer les électrons et identifier leur signe jusqu'à 5 TeV. La découverte du neutralino, constituant essentiel de la matière noire, serait un événement considérable, à la fois pour la physique des particules et pour la cosmologie.

3 Instruments, méthodes et perspectives

Dans cette section, nous nous restreignons aux instruments directement couverts par le groupement de recherche proposé, mais il est clair que l'étude des objets émetteurs à haute énergie implique toute la gamme du rayonnement électromagnétique².

2. Ainsi, une mission à fonctions multiples comme XMM ne figure pas dans la liste qui suit, bien que certains de ses objectifs soient étroitement reliés aux sujets évoqués plus haut.

3.1 L'astronomie gamma en satellite et au sol

3.1.1 Techniques

Bien que les phénomènes astrophysiques de haute énergie se manifestent dans tout le domaine du spectre électromagnétique, leur signature la plus directe se situe au-delà de quelques dizaines de keV. Si l'on se limite aux photons les plus énergétiques détectés et identifiés comme tels (15 TeV environ), ce domaine couvre 9 ordres de grandeur en énergie et se subdivise en plusieurs régions caractérisées par une ou plusieurs techniques instrumentales :

- Les détecteurs γ en satellite ont dès les années 1970 ouvert cette nouvelle discipline de l'Astronomie. Ils couvrent aujourd'hui le domaine jusqu'à quelques dizaines de GeV, cette dernière limitation étant liée à la rapide décroissance des flux aux hautes énergies tant que les surfaces efficaces de détection sont inférieures au m^2 . Le prochain satellite GLAST de la NASA apportera un progrès significatif sur ce plan, puisqu'il pourra pousser l'exploration au-delà de 100 GeV. La technique de détection varie également avec la gamme d'énergie :
 - A basse énergie, où dominant l'absorption photo-électrique et la diffusion Compton, la finesse des images produites de 1990 à 1998 par le télescope SIGMA [21] à bord du satellite russe GRANAT a démontré que les dispositifs à ouverture codée sont les plus performants. Il ne faut donc pas s'étonner que des appareils à ouverture codée, dont le principe s'inspire de celui de SIGMA, se retrouvent à bord du satellite INTEGRAL [24], la prochaine mission d'astronomie γ à basse énergie de l'Agence Spatiale Européenne. L'innovation se situera au niveau des détecteurs sensibles à la position qui équiperont les instruments. Cette nouvelle génération d'appareils généralisera aussi l'usage des détecteurs semi-conducteurs, pour obtenir une meilleure résolution spectrale tout en conservant une bonne résolution angulaire.
 - Au-dessus du GeV, on convertit le γ en une paire e^+e^- qu'on détecte dans un trajectographe (chambre à étincelles pour SAS-2, COS-B et EGRET [28] ; trajectographe à micro-pistes de silicium pour le futur détecteur GLAST [34]). La résolution angulaire est actuellement de l'ordre du degré à 1 GeV (0,25° pour GLAST) et se dégrade à plus basse énergie. L'énergie de la cascade électromagnétique non déposée dans le trajectographe est mesurée dans un calorimètre (constitué de cristaux d'iode de césium pour GLAST) ; la résolution en énergie est de l'ordre de 10%.
- Les détecteurs γ au sol couvrent le domaine des très hautes énergies, limité inférieurement aujourd'hui à une centaine de GeV, la technique pouvant potentiellement atteindre quelques dizaines de GeV (expériences CELESTE [32] et STACEE [33]). Il est ici nécessaire de disposer de très grandes surfaces de détection, de l'ordre de 10^4 m^2 en raison de la faiblesse des flux de γ ; d'où la nécessité de travailler au sol en utilisant comme calorimètre l'atmosphère où le γ incident développe

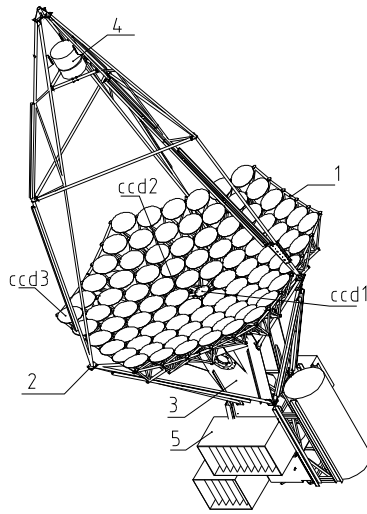


FIG. 5 – Le télescope d'imagerie de l'expérience CAT.

une grande gerbe électromagnétique. Cependant, les gerbes atmosphériques sont, dans leur immense majorité, produites par les rayons cosmiques chargés, protons et noyaux surtout, les électrons cosmiques dont le spectre en énergie est très pentu n'étant vraiment gênants qu'au-dessous de 100 GeV. Bien qu'on sache depuis les années 1960 détecter les gerbes atmosphériques par la lumière Tcherenkov qu'elles émettent, il a fallu attendre près de 30 ans pour réduire le bruit de fond de plus de 2 ordres de grandeur et extraire un signal γ crédible. La technique la plus efficace à ce jour est celle de l'imagerie Tcherenkov, mise au point à l'observatoire Whipple [29] aux Etats-Unis entre 1986 et 1989 et améliorée depuis avec l'imagerie stéréoscopique (expérience germano-espagnole HEGRA [30] aux Canaries) et l'imagerie à très haute définition (télescope CAT dans les Pyrénées Orientales [31], figure 5). Ces détecteurs ont une résolution angulaire de l'ordre de $0,1^\circ$ mais leur champ de vue est limité à moins de 5° et ils ne fonctionnent que par nuit claire en l'absence de lune ; aussi n'ont-ils détecté à ce jour qu'un petit nombre de sources de très haute énergie. Au-delà de quelques dizaines de TeV, les grands réseaux de détecteurs de particules chargées au sol utilisés surtout pour l'étude des rayons cosmiques n'ont pas une capacité de rejet du bruit de fond comparable et n'ont pu jusqu'à maintenant mettre en évidence de signal γ , à l'exception d'un résultat préliminaire récent³. Par ailleurs, le domaine spectral situé entre les énergies couvertes par EGRET et celles des télescopes d'imagerie Tcherenkov devrait bientôt être exploré par les expériences utilisant des centrales solaires pour capter la lumière Tcherenkov sur de grandes surfaces ; cette technique permet d'atteindre des seuils de 20 à 30 GeV. C'est le cas de l'expérience CELESTE [32] en France — sur le même site que CAT — et de l'expérience STACEE [33] aux Etats-Unis qui ont toutes deux commencé à prendre des données (figure 6) ; une autre centrale solaire (SOLAR II en Californie)

3. A la conférence internationale sur les rayons cosmiques de Salt Lake City (Août 1999), la collaboration sino-japonaise exploitant le réseau du Tibet à 4300 m d'altitude, dont le seuil est de 3 TeV, a annoncé la détection de la nébuleuse du Crabe à 5σ .

fait l'objet d'un projet semblable. Signalons enfin le projet de très grand télescope d'imagerie Tcherenkov MAGIC (17 m de diamètre), dont le seuil serait de 30 GeV (MPI Munich et groupes espagnols) et qui devrait commencer à fonctionner en 2002 aux Canaries.

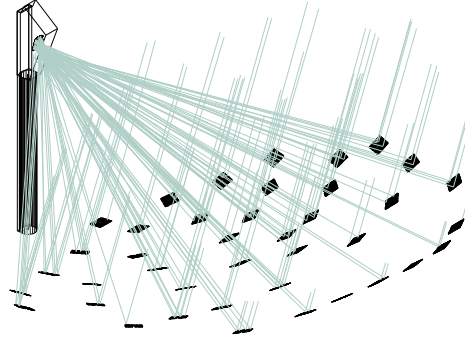


FIG. 6 – *Expérience CELESTE; utilisation d'une ancienne centrale solaire pour l'Astronomie Gamma à partir de 30 GeV.*

3.1.2 Résultats et perspectives

L'astronomie gamma en satellite a pris une dimension nouvelle en 1991 avec le lancement de l'observatoire Compton-GRO comportant 4 instruments: BATSE [25] spécialisé dans la recherche de phénomènes sporadiques comme les sursauts gamma, OSSE [26] et COMPTEL [27] à basse énergie et EGRET [28] à haute énergie. L'expérience OSSE a ainsi permis de tracer la carte de l'émission à 511 keV de notre Galaxie [22] et COMPTEL a fourni la distribution de l'émission diffuse de notre Galaxie dans la raie de ^{26}Al [23]; l'origine de ces émissions reste un objectif ouvert et primordial pour la mission INTEGRAL [24]. Toujours à basse énergie, le télescope SIGMA [21] construit par le CEA et le CERN, a localisé une trentaine de sources avec précision grâce à la technique du masque codé. Parmi ses découvertes les plus importantes, on peut citer la mise en évidence de l'émission dure de certains types d'étoile à neutrons accrétante, l'étude des novæ X à trou noir, notamment Nova Muscæ 1991, montrant la présence de trou noir stellaire dans un système binaire et la découverte de trois des quatre « micro-quasars » galactiques répertoriés. On lui doit également l'estimation de limites supérieures très contraignantes quant à l'émission de Sgr A*, l'éventuel trou noir supermassif au centre dynamique de la Galaxie. Les résultats les plus spectaculaires du domaine de basse énergie concernent les sursauts γ , phénomènes non répétitifs durant de quelques secondes à quelques minutes ou plus; BATSE en a enregistré plus de 2000 et a montré que leur distribution angulaire est isotrope mais sa médiocre résolution angulaire (5°) ne permettait pas de localiser chaque sursaut avec une précision suffisante pour identifier des contreparties à d'autres longueurs d'onde. La percée suivante en 1997 est venue des astronomies X et optique et nous y reviendrons dans le paragraphe suivant. Le domaine des hautes énergies a été complète-

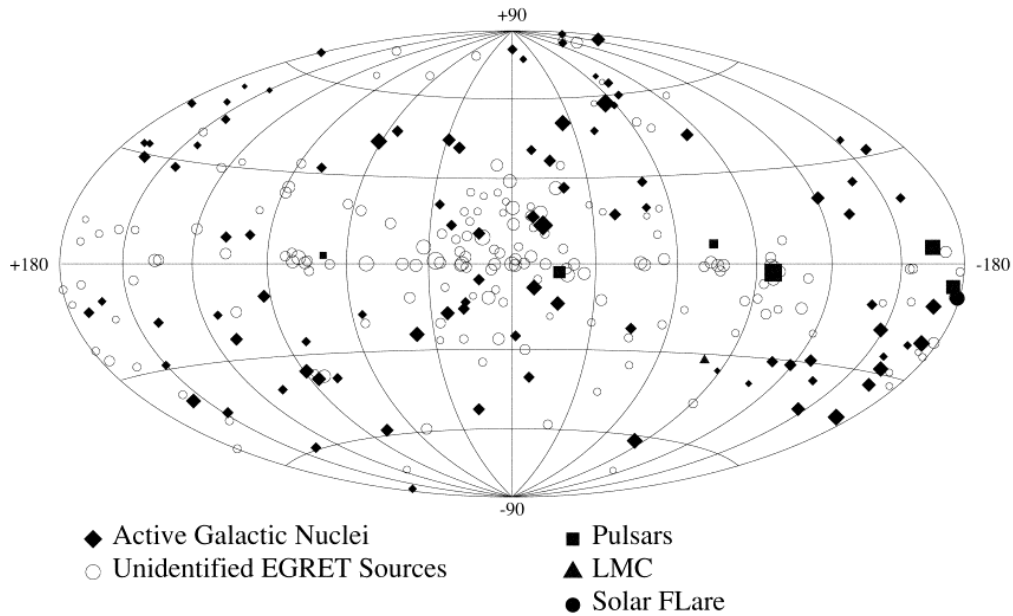


FIG. 7 – Sources ponctuelles du troisième catalogue d'EGRET.

ment renouvelé par les découvertes d'EGRET : le 3^{ème} catalogue d'EGRET contient plus de 300 sources (figure 7), dont une cinquantaine sont des noyaux actifs de galaxie de type «blazar» ; un seul AGN, le quasar 3C273, était connu comme source γ auparavant. Dans la Galaxie, 8 pulsars connus ont été détectés en γ par Compton-GRO et l'on soupçonne que de nombreuses sources non identifiées du catalogue d'EGRET sont des pulsars non détectés en radio.

Aujourd'hui, les équipes françaises sont très engagées dans le programme INTEGRAL à basse énergie (lancement prévu à la fin de 2001) et dans le projet GLAST à haute énergie (lancement prévu en 2005 par la NASA). La mission INTEGRAL [24] repose sur la mise en œuvre simultanée du télescope IBIS, apte à fournir des images à haute résolution angulaire (pouvoir séparateur ~ 10 minutes d'angle), et du spectromètre SPI chargé de la spectroscopie fine (pouvoir de résolution $E/\Delta E$ d'environ 600 à 1,33 MeV, de plus d'un ordre de grandeur meilleur que celui du spectromètre OSSE à bord de Compton-GRO). La mission INTEGRAL inclut également les moniteurs JEM-X et OMC opérant respectivement dans la bande des rayons X, au-delà de 2-3 keV, et dans le domaine visible, de 550 à 850 nm. Le caractère «observatoire» de la mission repose sur le centre des données d'INTEGRAL («INTEGRAL Science Data Center» ou ISDC), dont la tâche principale sera de permettre aux non-spécialistes de mener des observations avec ce satellite. A noter que plus des deux tiers du temps d'observation sera ouvert sur la base d'un appel d'offre annuel, le premier devant être lancé au début de 2000. A noter également la capacité d'INTEGRAL à détecter et à localiser en temps réel avec une précision inférieure à une minute d'angle de 10 à 30 sursauts γ par an. Quant à l'instrument GLAST (20 MeV - 300 GeV) [34], compte-tenu de sa surface efficace de détection (8000 cm²), de son champ de vue (2 stéradians), de sa résolution angulaire (0,15° à 10 GeV) et de sa résolution en énergie, il représente un gain en sensibilité d'un facteur 30 au moins par rapport à EGRET, ce qui permet d'envisager des catalogues beaucoup plus fournis (environ 1000

AGN et 50 pulsars par exemple). Son très faible temps mort lui permettra de prolonger l'étude spectrale des sursauts γ dans le domaine des hautes énergies.

Parallèlement, au sol, les télescopes à effet Tcherenkov atmosphérique ont mis en évidence des sources émettant dans le domaine des très hautes énergies jusque vers 15 TeV au moins. Dans notre Galaxie, c'est le cas de plérions identifiés comme la nébuleuse du Crabe et Vela ou présumés comme PSR 1706-44. Les résultats les plus étonnants ont été obtenus sur deux noyaux actifs de galaxie de type BL Lacertæ, Markarian 421 et Markarian 501, en particulier sur la seconde, non détectée par EGRET, mais siège d'intenses éruptions en 1997 aux très hautes énergies [38] (figure 8), très corrélées aux variations d'intensité observées par les satellites X comme Beppo-SAX ou Rossi-XTE. Les équipes françaises des expériences CAT (IN2P3 et CEA) et CELESTE (IN2P3) ont pris une part importante à ces études. Vers 2003, doivent entrer en service des réseaux de télescopes d'imagerie permettant des observations stéréoscopiques au-dessus de 100 GeV environ, dans les deux hémisphères : au Nord, le projet américain VERITAS dans l'Arizona [35]; au Sud, le projet européen HESS (Allemagne et France essentiellement) en Namibie [36]. Ces réseaux devraient gagner un ordre de grandeur de sensibilité en flux sur les instruments actuels. Leur souplesse d'utilisation leur permettra de surveiller simultanément plusieurs sources, voire de cartographier certaines régions.

3.2 Les suivis multi-longueurs d'onde

L'émission γ relève de processus non thermiques, soit d'origine électromagnétique (rayonnements synchrotron et Compton inverse), soit d'origine nucléaire (désintégrations de π^0). Pour comprendre le mécanisme d'émission et contraindre la modélisation de l'objet étudié, il est essentiel de mesurer l'ensemble du spectre électromagnétique par des campagnes d'observations conjointes de différents instruments, si possible simultanées. Voici quelques exemples de sources ayant fait l'objet de suivis multi-longueurs d'onde :

- L'observation simultanée et pratiquement continue pendant 30 jours de la galaxie de Seyfert 1 NGC 7469 dans les domaines UV (IUE) et X (RXTE) a permis d'invalider l'interprétation courante selon laquelle le rayonnement X serait principalement dû à la comptonisation des photons UV par des électrons énergétiques.
- L'observation conjointe en radio, en infra-rouge, et en rayons X du micro-quasar GRS 1915+105 [37] a permis de comprendre la séquence temporelle au cours de laquelle le disque d'accrétion se vide périodiquement et où une partie de la matière est éjectée à des vitesses ultra-relativistes.
- Le blazar Markarian 501 a montré en 1997 une très nette corrélation entre les intensités et les distributions spectrales X et γ [38] (figure 8), qui favorise l'interprétation de l'émission γ à très haute énergie par l'effet Compton inverse et non par la désintégration des π^0 .
- Les progrès dans la compréhension des sursauts γ depuis 1997 est venue de leur détection dans le domaine X d'abord — ce qui a permis de réduire considérablement

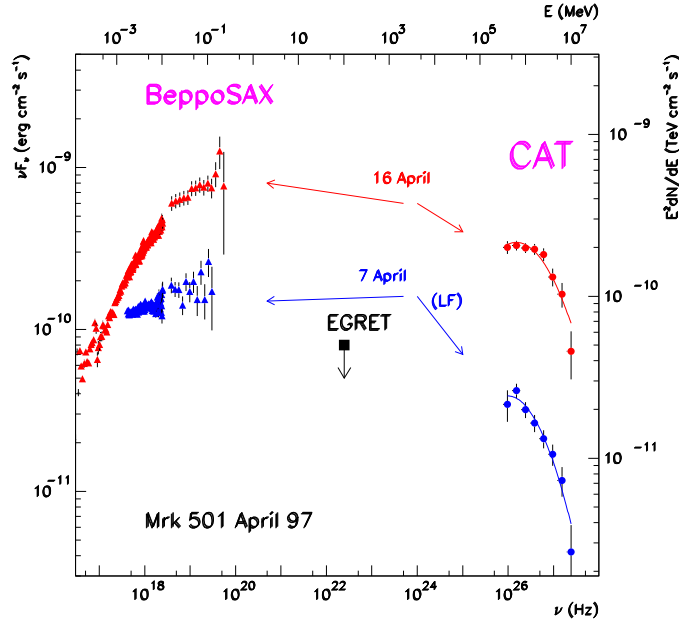


FIG. 8 – Distributions spectrales en énergie $\nu F(\nu)$ du blazar Markarian 501 en Avril 1997 en rayons X (satellite Beppo-SAX) et en γ de très haute énergie (télescope CAT, [38]). Les données simultanées des deux instruments illustrent la corrélation entre les domaines X et γ . La bosse de gauche, due au rayonnement synchrotron, culmine dans le domaine des X durs et la partie droite, interprétée naturellement par l'effet Compton inverse, culmine au-dessus du seuil de CAT. La borne supérieure donnée par EGRET confirme la structure en double bosse, typique des blazars.

la boîte d'erreur, ouvrant ainsi la voie à des recherches efficaces de contreparties optiques — puis dans les domaines optique (figures 9 et 10) et radio. La mesure de raies spectrales de la galaxie-hôte ou d'objets situés sur la ligne de visée a mis en évidence des redshifts cosmologiques pour plusieurs sursauts. En France, l'expérience TAROT (Télescope à Action Rapide pour les Objets Transitoires) à l'Observatoire de la Côte d'Azur [39], dispose d'un télescope optique pouvant pointer rapidement sur la zone où un sursaut vient d'être détecté par satellite (BATSE). La future mission spatiale HETE2 devrait localiser chaque sursaut à une précision de quelques minutes d'arcs (contre quelques degrés pour BATSE) en quelques secondes.

3.3 Vers une astronomie des neutrinos

Les neutrinos sont, après les photons, les seuls «messagers» neutres et stables qui permettent d'obtenir une information directe sur les sources de rayons cosmiques de haute énergie. Ils sont particulièrement utiles pour nous renseigner sur les régions opaques aux γ , par exemple la zone centrale de noyaux actifs de galaxie où la haute densité de photons UV ou X du disque d'accrétion provoque la conversion des γ en paires. Par ailleurs,

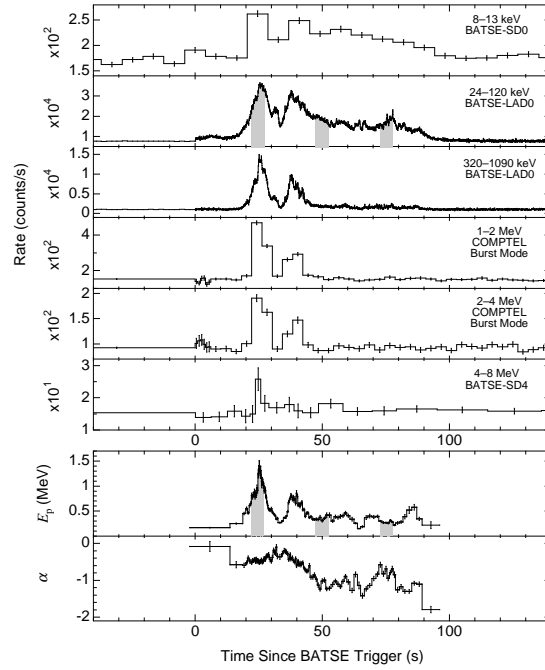


FIG. 9 – Courbe de lumière du sursaut GRB 990123 en γ dans diverses bandes d'énergie de BATSE et COMPTEL à bord du satellite Compton GRO [45]. Les deux graphes du bas montrent l'évolution temporelle de l'énergie du maximum du spectre en $\nu F(\nu)$ et de l'indice spectral à basse énergie du sursaut (cf. figure 4).

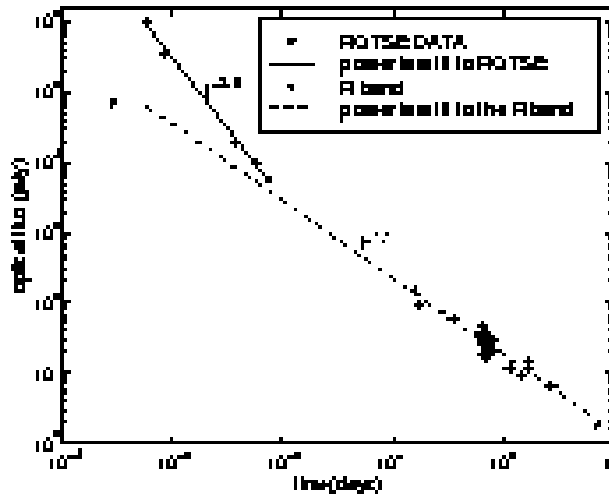


FIG. 10 – Courbe de lumière optique du sursaut GRB 990123. Les premiers points, obtenus grâce au télescope ROTSE, ont été obtenus 22 s seulement après l'alerte de BATSE.

l'Univers lointain devient de plus en plus inaccessible à l'astronomie gamma entre le TeV et le PeV par suite de l'absorption des γ par les rayonnement de fond dans les domaines visible, infra-rouge et micro-onde. De plus, la question de l'origine — électromagnétique ou hadronique — des γ peut être résolue si l'on sait détecter un éventuel signal associé en neutrinos : ces derniers sont en effet produits par la désintégration des mésons (π^\pm et K^\pm) produits avec les π^0 dans les cascades hadroniques.

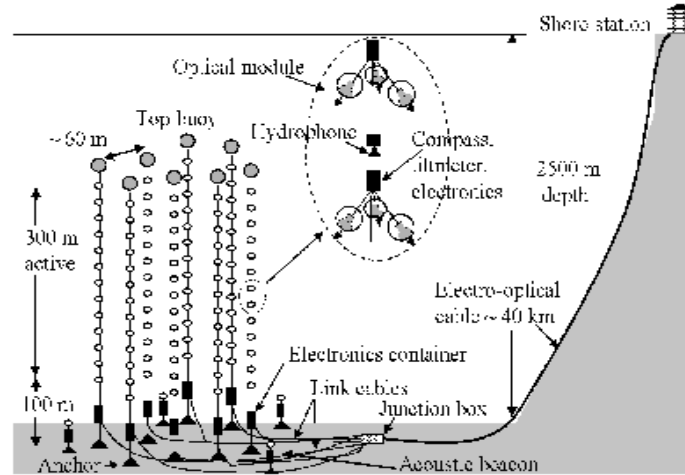


FIG. 11 – *Le projet ANTARES de 0.1 km². La zone agrandie montre deux étages de modules optiques et un hydrophone sur une ligne de détection*

Toutefois, à la faiblesse des flux aux très hautes énergies s'ajoute la très faible section efficace d'interaction des neutrinos, ce qui en rend la détection très difficile. Dès la fin des années 1970, le projet américain DUMAND envisageait la possibilité d'un détecteur sous-marin instrumentant un grand volume océanique. On se place à grande profondeur afin de réduire autant que possible le flux de muons cosmiques « descendants » issus des désintégrations des cascades atmosphériques et l'on cherche à détecter des muons « montants » produits par des neutrinos muoniques ($\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + \dots$ ou $\bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \mu^+ + \dots$) ayant traversé la plus grosse partie de la Terre et interagissant près de la zone instrumentée. Le muon est détecté par la lumière Tcherenkov qu'il émet dans l'eau et qui signe son sens de parcours. La taille de la cible efficace augmente avec le parcours potentiel du muon, donc avec son énergie, elle-même liée à celle du neutrino. Par ailleurs la section efficace d'interaction des neutrinos augmente elle-même avec l'énergie. Les projets d'astronomie de neutrinos se sont donc intéressés en priorité au domaine situé au-delà de 100 TeV, inaccessible à l'astronomie gamma, où les possibilités de détection sont plus favorables et où le bruit de fond des neutrinos produits dans les gerbes atmosphériques des antipodes (neutrinos atmosphériques montants) est plus faible.

La mise en œuvre d'une telle expérience oblige cependant à relever des défis techniques considérables, comme en témoignent l'échec et l'abandon du projet américain DUMAND en 1994. La première démonstration de principe a été apportée par l'expérience du Lac Baïkal en Sibérie à profondeur modérée (1,1 km) avec 8 lignes portant 192 « modules

optiques» contenant chacun un gros photomultiplicateur. La seconde percée est venue de l'expérience AMANDA (Etats-Unis, Suède) qui, au lieu de l'eau, utilise la glace du Pôle Sud comme milieu détecteur entre 1500 et 2000 m de profondeur [40]. L'avantage de la glace tient à la relative facilité de déploiement des lignes de modules optiques et à la meilleure transparence du milieu, qui, en revanche, est plus diffusif que l'eau, d'où une moindre résolution angulaire. L'installation actuelle, AMANDA B, avec une surface efficace de 10^4 m^2 a obtenu des résultats sur les neutrinos atmosphériques montants qui constituent le bruit de fond irréductible d'une telle expérience. L'installation s'agrandit progressivement (AMANDA II) et vise à terme une surface de km^2 (projet ICE CUBE). Les groupes français de l'IN2P3, du CEA et de l'INSU ont depuis 3 ans entrepris un important travail de R&D en liaison avec des professionnels de la mer (Océanographie-INSU, IFREMER, France Télécom etc.) pour mettre au point le projet ANTARES [41]. Après avoir acquis la maîtrise des techniques de déploiement et caractérisé un site au large de Toulon à la profondeur de 2400 m, la collaboration à laquelle se sont joints des groupes européens passe maintenant à l'étape d'un détecteur de $0,1 \text{ km}^2$ comportant 1000 modules optiques (figure 11). Bien qu'il soit difficile de faire des prédictions précises sur les flux de neutrinos de haute énergie, il est généralement admis qu'une surface efficace de 1 km^2 est nécessaire pour avoir de fortes chances de détection. De bonnes surprises sont cependant possibles à plus court terme, par exemple en cas d'observation de quelques événements en coïncidence temporelle et directionnelle avec un sursaut γ et l'astronomie des neutrinos de haute énergie pourrait bien démarrer dans la prochaine décennie.

3.4 Composition des rayons cosmiques et antiparticules

L'expérience AMS [20] prévue vers 2003 dans la station orbitale internationale a pour but principal la recherche d'antiparticules et particulièrement d'anti-noyaux. Ce sera la seule expérience spatiale à disposer d'un spectromètre magnétique ; combiné à un trajectographe à haute résolution et à des identificateurs de particules, cette expérience permettra d'affiner notre connaissance du spectre et de la composition des rayons cosmiques à moyenne énergie. Par ailleurs, des anomalies dans le spectre d'antiprotons pourraient signer la présence de particules de matière noire (WIMP).

3.5 Observation de gerbes cosmiques d'énergies extrêmes

Aux énergies proches de la coupure GZK, soit $5 \times 10^{19} \text{ eV}$ ou plus, (voir section 2.5 page 12), les rayons cosmiques sont extrêmement rares ; les observations des dernières décennies permettent d'évaluer leur flux selon la formule empirique :

$$I(E > E_0) \approx \left(\frac{10^{19} \text{ eV}}{E_0} \right)^2 \text{ km}^2 \text{ sr}^{-1} \text{ an}^{-1} .$$

Les expériences dans ce domaine doivent donc combiner une grande acceptance angulaire avec une très grande surface efficace, soit une «ouverture» de plusieurs milliers de $\text{km}^2 \text{sr}$. Du fait de la faible statistique d'événements observés, de nombreuses questions restent

aujourd'hui sans réponse; on ignore la nature des particules primaires, leur provenance, les mécanismes responsables de leur production. Ces rayons cosmiques étant chargés, donc déviés par les champs magnétiques galactiques ou extragalactiques, leur direction d'arrivée ne peut donner d'indication sur leur source qu'aux énergies les plus élevées et, jusqu'à maintenant, on n'a pas trouvé d'association claire avec des objets connus émettant dans les domaines radio, optique, X ou γ . Il est possible que ces particules ne proviennent pas d'accélérateurs cosmiques mais d'objets exotiques d'origine cosmologique comme des défauts topologiques (monopôles, cordes cosmiques etc.).

Il existe deux techniques reposant toutes deux sur l'observation des gerbes atmosphériques créées par la particule primaire. La première est une méthode optique analysant le profil longitudinal de la gerbe par le biais de la fluorescence atmosphérique créée par les particules chargées secondaires: le détecteur est appelé «Fly's Eye» («œil de mouche»), car la lumière est focalisée sur un grand nombre de photomultiplicateurs, chacun observant un secteur du ciel analogue aux facettes d'un œil de mouche. Cette technique, qui nécessite des nuits claires et sans lune, souffre d'un faible cycle efficace (10% environ) mais fournit une mesure assez directe de l'énergie. La seconde méthode consiste à échantillonner les particules secondaires de la gerbe au niveau du sol par un réseau de détecteurs balisant une surface adaptée au domaine d'énergie étudié (donc aux flux incidents correspondants); elle permet d'acquérir une bien meilleure statistique mais la mesure d'énergie est plus indirecte.

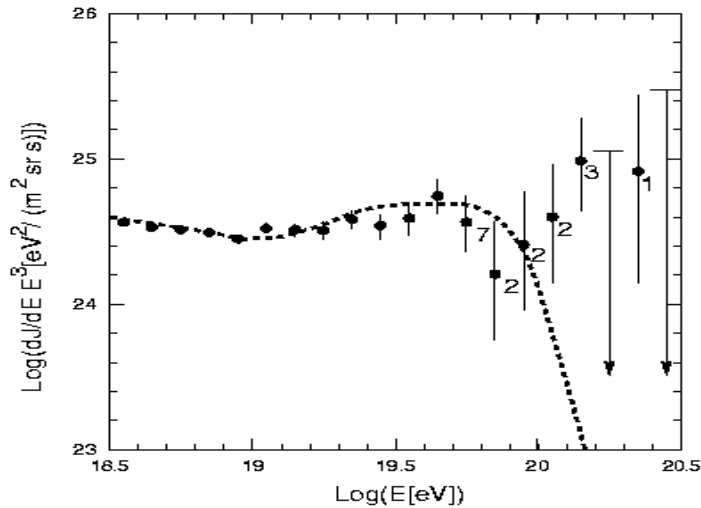


FIG. 12 – *Spectre des rayons cosmiques au-dessus de 10^{18} eV mesuré dans l'expérience AGASA (Japon) [43]. Le spectre différentiel est ici multiplié par le cube de l'énergie; la rupture de pente à 10^{19} eV est la «cheville». La courbe en pointillés donne le spectre attendu de sources réparties uniformément dans l'Univers, compte-tenu des erreurs sur la mesure de l'énergie; cette hypothèse implique la coupure GZK.*

Quatre réseaux et un télescope à fluorescence ont, au cours des trois dernières décennies, observé des événements autour ou au-dessus de la coupure spectrale, dont seulement une douzaine au-dessus de 10^{20} eV (figure 12): l'exposition cumulée des premiers (Volcano

Ranch aux USA, Haverah Park en Grande-Bretagne, Yakutsk en Russie et AGASA au Japon) est d'environ $1000 \text{ km}^2 \text{ sr an}$. S'y ajoute l'exposition de plus de $600 \text{ km}^2 \text{ sr an}$ du Fly's Eye original de Dugway (Utah, USA) [42]. Actuellement, les détecteurs actifs sont AGASA [43] (réseau de 100 km^2 avec une ouverture d'environ $230 \text{ km}^2 \text{ sr}$) et une version améliorée du Fly's Eye (HiRes) qui, une fois achevée, aura une ouverture de 350 à $1000 \text{ km}^2 \text{ sr}$ entre 10^{19} et 10^{20} eV.

Le projet d'observatoire «Auger» [44], dont la construction commence prochainement, est conçu pour explorer le domaine de 5×10^{19} à 10^{21} eV. L'expérience combine les deux techniques précédentes : réseau de surface de 3000 km^2 et ensemble de télescopes à fluorescence couvrant la surface totale du réseau. Son ouverture est de $7000 \text{ km}^2 \text{ sr}$ au-dessus de 10^{19} eV avec une efficacité et un cycle utile proches de 100% . Les 10% d'événements détectés en mode hybride permettront une calibration croisée des deux détecteurs et fourniront des conditions optimales pour l'identification des particules incidentes grâce à une excellente résolution en énergie (meilleure que 10%) et en angle d'incidence (une fraction de degré). Pour obtenir une couverture complète du ciel, il est prévu de construire deux installations d'ouvertures identiques, une dans chaque hémisphère. Le site Sud est situé en Argentine et sa construction commence avant la fin de l'année 1999. Le second site sera situé dans l'Utah (USA), à proximité du Fly'Eye HiRes.

S'il s'avère que le spectre s'étend au-delà de 10^{21} eV, ce que l'observatoire Auger devrait pouvoir confirmer en quelques années, il est envisagé de détecter les gerbes atmosphériques non pas à partir du sol mais depuis l'espace (projet Airwatch/OWL) par une technique de type Fly's Eye. Ce projet, qui vise une ouverture de $10^5 \text{ km}^2 \text{ sr}$ à l'aide d'une caméra constituée de 10^6 pixels ultra-sensibles, nécessite cependant des développements technologiques très importants.

4 Objectifs du groupement de recherches

La création d'un GDR interdisciplinaire et orienté «objets» aussi bien que «projets» semble être la meilleure façon de rassembler et de structurer l'ensemble des chercheurs français travaillant sur les phénomènes cosmiques de haute énergie. Le GDR regroupe des physiciens de l'IN2P3 et du CEA, des astrophysiciens (observateurs et théoriciens) de l'INSU et du CEA, des théoriciens du département SPM, mettant ainsi en contact un grand nombre de compétences scientifiques: astrophysique, physique des plasmas, physique nucléaire, physique des particules et instrumentation (spatiale ou au sol) aux hautes énergies. Nous proposons que ce nouveau GDR s'intitule: «Phénomènes Cosmiques de Haute Energie» (PCHE). Il devra définir une stratégie globale dans ce domaine, y développer l'animation scientifique (ateliers, école) et établir les contacts avec diverses spécialités voisines.

4.1 Stratégie générale : instruments et observations

L'objectif principal de cette nouvelle structure est d'apprécier les projets et les collaborations dans un contexte global du domaine des hautes énergies plutôt qu'au coup par coup. Cela implique :

- Le suivi des expériences approuvées (en construction ou en cours d'analyse), à la demande des directions scientifiques.
- L'évaluation des nouveaux projets expérimentaux.
- La définition d'une stratégie observationnelle pour les objets évoqués plus haut.

Le rôle d'évaluation du Conseil Scientifique du GDR ne fait pas double emploi avec celui des instituts de tutelle par lesquels il pourra être saisi : le projet est ici replacé dans une stratégie d'ensemble incluant tous les instruments disponibles permettant de modéliser les objets intéressants (quelle que soit la longueur d'onde ou la nature des particules détectées). La coordination entre théorie et expérience sur chaque type d'objet permettra de définir des stratégies d'observation (campagnes multi-longueurs d'onde, priorités etc.). Le GDR aura enfin l'avantage de présenter globalement l'effort des équipes françaises dans le domaine des hautes énergies.

4.2 Organisation d'ateliers et d'écoles thématiques

Afin d'assurer le meilleur retour scientifique des projets spatiaux ou au sol couverts par le GDR, ce dernier organisera des groupes de travail ou des ateliers spécialisés, et mettra en place une école sur les thèmes décrits précédemment. Ces actions doivent en particulier favoriser l'accès aux instruments ouverts à la communauté internationale (mise au point des propositions, utilisation de bases de données) et les échanges entre théoriciens et observateurs. La réunion générale annuelle du GDR pourrait être ouverte, soit au niveau international, soit en s'inscrivant dans un contexte plus large, par exemple dans des journées sur l'astrophysique des particules.

4.3 Interfaces avec les structures existantes

L'étude des phénomènes cosmiques de haute énergie touche souvent des sujets couverts par d'autres communautés, d'où la nécessité d'interfaces avec d'autres structures. Il faut d'abord mentionner le cas particulier de l'actuel GDR «Accrétion disques et jets» dont les thèmes sont intégrés dans la présente proposition et dont les membres rejoindront pour la plupart le nouveau GDR ; cette évolution a été proposée en concertation avec le comité scientifique du GDR «Accrétion disques et jets».

Le GDR «Phénomènes cosmiques de haute énergie» sera en contact :

- avec des programmes nationaux : Cosmologie (PNC), Soleil-Terre (PNST) ;

- avec d’autres GDR : Galaxies, Physico-chimie du milieu interstellaire, Gravitation, Supersymétrie ;
- avec l’action spécifique de physique stellaire (ASPS) ;
- avec les astrophysiciens nucléaires.

4.4 Budget

Il paraît raisonnable de tenir deux réunions annuelles du Conseil Scientifique du GDR et une réunion générale ; on peut envisager de mettre sur pied deux ateliers et une école. Pour cette dernière, où l’intervention de physiciens étrangers est très souhaitable, la participation d’autres organismes (formation permanente du CNRS par exemple) sera nécessaire. Le budget annuel du GDR proprement dit (couvrant essentiellement les missions des participants pour les ateliers, les rencontres inter-groupes, la réunion du GDR et les séances de son conseil scientifique et des participations à quelques conférences) devrait être de l’ordre de 300 kF.

5 Annexe: Equipes concernées

On trouvera ci-dessous la liste des équipes souhaitant participer au GDR proposé. Pour les groupes importants, le nom du responsable ou du correspondant est en italiques.

5.1 CNRS/IN2P3

- CENBG-Bordeaux : Groupe d’Astronomie γ ; *D. Smith*, D. Dumora, J. Procureur, T. Reposeur.
- CSNSM-Orsay : Groupe d’Astrophysique nucléaire ; *A. Lefebvre*, G. Bogaert, A. Coc, J. Kiener, B. Tatischeff, J.-P. Thibaud.
- CPPM-Marseille : Groupe ANTARES ; *J. Carr*, E. Aslanides, S. Basa, V. Bertin, J. Brunner, F. Montanet, P. Payre, C. Tao.
- ISN-Grenoble : Groupe AMS ; *M. Buenerd*, A. Barrau, F. Malek-Ohlsson.
- IReS Strasbourg et GPHE Mulhouse : Groupe ANTARES ; *C. Racca*, Y. Benhammou, F. Drouhin, D. Huss, A. Pallares.
- LAL-Orsay : Groupe d’Astronomie γ ; *P. Eschstruth*, H. Bergeret, A. Cordier, B. Merkel.
- LAPP-Annecy :
 - Direction ; *M. Yvert*.

- Groupe AMS ; *J.-P. Vialle*, G. Coignet, J. Favier, R. Flaminio, R. Kossakowski.
- LPNHE-Paris 6 & 7 :
 - Groupe d’Astronomie γ ; *M. Rivoal*, Y. Pons, C. Renault, J.-P. Tavernet, P. Vincent.
 - Groupe Auger ; *M. Boratav*, P. Billoir, S. Dagoret-Campagne, A. Letessier-Selvon.
- LPNHE-X : Coordination Astrophysique : *P. Fleury*
 - Groupe d’Astronomie γ ; *B. Degrange*, Ph. Bruel, L.-M. Chounet, G. Fontaine.
 - Groupe Antimatière : *M. Urban*, F. Plouin.
- PCC Collège de France :
 - Direction ; *D. Vignaud*.
 - Groupe d’Astronomie γ ; *P. Espigat*, A. Djannati-Ataï, C. Ghesquière, M. Punch, A. Volte.
 - Groupe Auger ; *J.-M. Brunet*, G. Tristram, J.-N. Capdevielle, P. Frenkiel.

5.2 CEA/DSM/DAPNIA

- SPP : Groupe ANTARES ; *L. Moscoso*, F. Blondeau, N. de Botton, F. Feinstein, J. R. Hubbard, H. Lafoux, S. Loucatos, N. Palanque-Delabrouille, Y. Sacquin, J.-P. Schuller, T. Stolarczyk, D. Vilanova.
- SAp :
 - Groupe d’Astronomie γ ; *J. Paul*, P. Goret, I. Grenier et al.
 - Groupe X ; *P. Ferrando*, A. Decourchelle et al.
 - Groupe Théorique ; *M. Tagger*, F. Mirabel et al.

5.3 CNRS/INSU

- CESR-Toulouse : *G. Vedrenne*, F. Alberhne, J.-L. Atteia, C. Barat, D. Barret, A.R. Bazer-Bachi, M. Boer, V. Borrel, J.-P. Dezalay, P. Jean, E. Jourdain, I. Malet, A. Marcowith, J.-P. Roques, R. Talon, P. von Ballmoos.
- DARC-Meudon : *H. Sol*, S. Bonazzola, M. Lemoine.
- DAEC-Meudon : *S. Collin*, C. Boisson, A.-M. Dumont, J.-M. Huré, M. Joly, M. Mouchet, D. Pelat, C. Sauty.
- DEMIRM : *M. Signore*.

- IAP : *R. Mochkovitch*, J. Audouze, M. Cassé, E. Flam, M. Friedjung, J.-P. Lasota, N. Prantzos, B. Rocca, J. Roland.
- LAS et observatoire de Marseille : *A. Mazure*, J. Boulesteix et al.
- Observatoire de Besançon : *P. Tuckey* et al.
- Observatoire de Bordeaux : *J.-L. Masnou*, J. Braine, P. Charlot.
- Observatoire de Grenoble : *G. Pelletier*, J. Ferreira, D. Fraix-Burnet, G. Henri, P.-Y. Longaretti.
- Observatoire de Strasbourg : *J.-M. Hameury*, J. Heyvaerts, C. Motch, M. Pakull.

5.4 CNRS/SPM

- CPT-Ecole Polytechnique : E. Asseo.
- CPT-Marseille : R. Triay et al.
- DARC-Meudon : B. Carter, N. Deruelle, D. Langlois, J. Martin, P. Peter, A. Gangui, G. Sigl.
- LPT-LAPP-Annecy : P. Salati et al.
- LPT-Orsay : P. Binétruy.
- Mathématiques et Physique Théorique, Univ. de Tours : C. Barrabes, D. Polarski, R. Parentani.
- Physique mathématique et théorique, Univ. de Montpellier : A. Djouadi.

Références

- [1] Y. Tanaka, *et al.*, Nature **375**(1995)659.
- [2] N.I. Shakura & R.A. Sunyaev, Astron. & Astrophys. **24**(1973)337.
- [3] R. Narayan & I. Yi, ApJ. **444**(1995)231.
- [4] R. Blandford & D. Payne, MNRAS **199**(1982)883
- [5] R. Blandford & R. Znajek, MNRAS **179**(1977)433.
- [6] A. Goldwurm, *et al.*, ApJ. Lett. **389**(1992)L79.
- [7] J. A. Orosz, *et al.*, ApJ. **468**(1996)380.
- [8] D. Barret *et al.*, ApJ. **473**(1996)963.
- [9] M. Rees & P. Meszaros, MNRAS **258**(1992)41P.
- [10] C. Norman *et al.*, ApJ. **454**(1995)60.
- [11] M. Vietri, ApJ. **453**(1995)883.
- [12] E. Waxman, ApJ Lett. **452**(1995)L1.
- [13] F. Mirabel & L.F. Rodriguez, Nature **371**(1994)46.
- [14] F.A. Aharonian & J.W. Cronin, Phys. Rev. D **50**(1994)1892.
- [15] C. von Montigny, *et al.*, ApJ. **440**(1995)525.
- [16] J.F.C. Wardle, *et al.*, Nature **395**(1998)457.
- [17] G. Jungmann, H. Kamionkowski & K. Griest, Phys. Rep. **267**(1996)195.
- [18] A. Bottino *et al.*, Astropart. Phys **3**(1995)65.
- [19] L. Bergström, P. Ullio & J.H. Buckley, Astropart. Phys. **9**(1998)137.
- [20] R. Battiston, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **65**(1998)19.
- [21] J. Paul *et al.*, Adv. Space Res. **11** (8)(1991)289.
- [22] W.R. Purcell, *et al.*, ApJ. **491**(1997)725.
- [23] J. Knödseder, *et al.*, A&A **345**(1999)813.
- [24] Proc. of the Second International INTEGRAL Workshop, 16-20 Septembre 1996, Saint-Malo (France), publication ESA-SP382.
- [25] G.J. Fishman, *et al.*, Proc. Gamma-Ray-Observatory Science Workshop (W. N. Johnson ed.) 39-50 (NASA/GFSC, Greenbelt,1989).

- [26] W. N. Johnson, *et al.*, ApJ Sup. **86**(1993)693.
- [27] V. Schönfelder *et al.*, ApJ Sup. **86**(1993)657.
- [28] D.J. Thompson, *et al.*, ApJ Sup. **86**(1993)629.
- [29] M.F. Cawley, *et al.*, Exper. Astron. **1**(1990)173.
- [30] A.Daum, *et al.*, Astroparticle Phys.,**8**(1997)1.
- [31] A. Barrau, *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. **A 416**(1998)278.
- [32] B. Giebels, *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. **A 412**(1998)329.
- [33] R. Ong, *et al.*, Astropart. Phys. **5**(1996)353.
- [34] N. Gehrels & P. Michelson, Astropart. Phys. **11**(1999)277.
- [35] Veritas Workshop on TeV Astrophysics, Cambridge, MA (USA),Oct. 23-24 1998, Astropart. Phys. **11**(1999)1.
- [36] A. Kohnle, *et al.*, Proc. of 26th International Cosmic-Ray Conference, Salt Lake City, Utah (USA) (1999), à paraître.
- [37] R. Bandyopadhyay, *et al.*, MNRAS **295**(1998)623.
- [38] A. Djannati-Ataï, *et al.*, à paraître dans A&A, prépublication astro-ph/9906060.
- [39] M. Boër, *et al.*, prépublication astro-ph/9711185.
- [40] F. Halzen, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **77**(1999)474.
- [41] E. Aslanides, *et al.*, A Deep Sea Telescope for High Energy Neutrinos, rapport de projet soumis à l'IN2P3, Mai 1999.
- [42] D.J. Bird, *et al.*, ApJ **441**(1995)144.
- [43] T. Takeda, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81**(1998)1163.
- [44] M. Boratav, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **48**(1996)488.
- [45] M.S. Briggs, *et al.*, ApJ **524**(1999)82.