

« Executive Summary »

Groupe de travail :

« Physique et astrophysique des sources énergétiques: des photons aux particules »

La très grande richesse et la variété des phénomènes violents observés dans l'Univers ont montré que l'étude de ces phénomènes ne pouvait pas se limiter à un seul type d'observation. La compréhension des mécanismes sous-jacents implique de "sonder" ces phénomènes à travers tous les "messagers" qu'ils sont susceptibles d'émettre : photons (rayons X aux rayons gamma), particules chargées et neutrinos. Cette constatation a permis à ces observations "multi messagers" de connaître un remarquable essor lors de ces dernières années.

Ces messagers pourront nous renseigner sur le fonctionnement des accélérateurs cosmiques d'énergies extrêmes tels que les noyaux actifs de galaxies (AGN) souvent associés à des trous noirs massifs, les sursauts gamma ou les étoiles à neutrons. Parallèlement à ces études de type "astronomie", ces particules et rayonnements de haute énergie pourraient également indiquer l'existence de particules encore inconnues qui pourraient constituer la matière noire de l'univers ou témoigner de ses premiers instants. Ils peuvent peut-être aussi nous renseigner sur l'antisymétrie matière antimatière. Dans ce domaine il existe donc un potentiel important de découvertes et peut être une nouvelle physique.

La variété de ces messagers implique des propriétés fort différentes quant à leur mode de production et à leur propagation. Les particules chargées sont accélérées dans les objets astrophysiques. Ces particules chargées sont soumises à l'effet de champs magnétiques et leur capacité de pointer les sources est réduite à basse énergie. De ce fait, elles peuvent donner des contraintes importantes sur l'intensité des champs magnétiques galactique et extragalactique encore mal connus aujourd'hui. Le rayonnement gamma et les neutrinos sont produits dans les réactions de ces particules avec la matière environnante et constituent une contre partie importante de l'observation. La propagation des rayons gamma ne peut être affectée que par le fond micro-onde et infrarouge. Les neutrinos peuvent se propager sans perturbation dans l'univers mais à cause de cette probabilité faible d'interaction, les neutrinos sont aussi les particules les plus difficiles à détecter. Ainsi, les rayons gamma et les neutrinos sont des observables privilégiées pour l'étude des sources.

Pour comprendre ces sources de haute énergie il est important de poursuivre en parallèle et d'une manière corrélée les observations des particules chargées, des rayons gamma sur un vaste domaine spectral, des neutrinos et éventuellement la détection des ondes gravitationnelles. La distribution des sources potentielles est différente dans les deux hémisphères. Le centre galactique est visible dans l'hémisphère sud. On peut observer également une plus grande partie du halo galactique dans le sud. En contrepartie, il y a localement plus d'AGN dans l'hémisphère nord. Il est donc important d'assurer une couverture globale du ciel.

Les rayons gamma

Le présent : L'observation des rayons gamma se fait soit par des télescopes au sol soit par des détecteurs embarqués.

Les 4 télescopes Cherenkov de HESS, en Namibie, prennent des données depuis fin 2003. La prospective porte d'une part sur une extension vers les basses énergies pour assurer un recouvrement avec les missions spatiales et d'autre part une augmentation des surfaces efficaces de détection (de l'ordre de plusieurs hectares) que permettent les télescopes Tcherenkov.

Concernant les missions spatiales en cours, INTEGRAL a pour objectif principal l'exploration approfondie des sites célestes émissifs dans la bande spectrale de 15 keV à 10 MeV. Cette mission a déjà donné des résultats marquants sur l'émission des gamma du centre de notre galaxie. Cette mission sera décrite plus en détail dans la partie Astrophysique Nucléaire.

Les projets futurs : Dans un futur à court terme, le projet de télescope HESS2 pourrait assurer une meilleure couverture spectrale avec les missions spatiales (GLAST,AMS). A plus long terme un site en haute altitude pourrait alors être envisagé pour maximiser la quantité de lumière reçue. D'autre part, l'extension ultérieure des installations en cours de construction est une option intéressante permettant de réaliser un relevé systématique dans certaines régions du ciel. Une demande de « Design study » au niveau européen est envisagée. Le télescope MAGIC, situé dans l'hémisphère nord (pas de participation française) complète les observations par HESS.

L'autre grande mission devant entrer en service dans la décennie en cours est la mission américaine GLAST, dont le lancement doit intervenir en 2007. GLAST se propose d'observer le ciel gamma de haute énergie (10 MeV – 300 GeV). Prévue pour durer au moins cinq ans la mission GLAST sera en mesure de détecter et de localiser avec précision des milliers de sources gamma, des blazars, pour l'essentiel.

La mission ECLAIRs, qui pourrait être lancée en 2008, sera en mesure de pratiquer une étude multi longueurs d'onde de l'émission prompte d'une centaine de sursauts gamma par an. L'autre voie qui s'ouvre est celle des satellites en formation. SIMBOL-X, une mission qui, en s'appuyant sur deux satellites en formation, affiche une sensibilité et une résolution angulaire améliorées de plus de deux ordres de grandeur par rapport à INTEGRAL. SIMBOL-X pourrait entrer en service en 2011.

Les rayons cosmiques de haute et ultra haute énergies

Le présent : Le site sud de l'Observatoire Pierre Auger (OPA) a commencé la prise de données au début de cette année. Il observera des rayons cosmiques d'énergie d'extrême, au-delà de 10^{19} eV. L'existence de la coupure du spectre des rayons cosmiques à très haute énergie due à des réactions avec le fond micro-ondes (la coupure GZK) est une question controversée qui peut révéler une déviation des lois de Physique connues actuellement. L'observatoire Pierre Auger pourra détecter aussi des neutrinos de haute énergie grâce à des gerbes horizontales issues des neutrinos traversant soit l'atmosphère soit la terre. Actuellement, l'Observatoire Pierre Auger est la seule expérience des rayons cosmiques de très haute énergie ayant une acceptance nécessaire pour mesurer le spectre énergétique avec une statistique suffisante. De plus, l'utilisation des deux techniques expérimentales, réseau de surface et télescopes à fluorescence, permettra d'évaluer les erreurs systématiques et d'avoir des données fiables. La construction du site sud devrait être finie vers la fin de 2005.

Les projets futurs :

Le site nord de l'OPA est à l'étude aux USA et actuellement deux sites, dans le Colorado et en Utah, sont considérés. Un développement intéressant est engagé pour la détection des gerbes atmosphérique par des ondes radio.

L'expérience AMS doit être installée sur la Station Spatiale Internationale (ISS) en 2007. Elle permettra de mesurer avec une précision jamais atteinte la composition et le spectre des rayons cosmiques (e^- , e^+ , p , $\text{anti-}p$ et noyaux légers identifiés en masse jusqu'à des $A < 13$ et en charge jusqu'à des $Z < 30$) dans la gamme d'énergie allant du GeV à quelques TeV. Ces mesures sont importantes en elle mêmes et utiles, en particulier pour mieux modéliser la propagation des rayons cosmiques. AMS effectuera également des recherches : d'antimatière primordiale, avec une sensibilité améliorée par trois ordres de grandeur; de nouvelles formes de matière comme les strangelets et de matière noire recherchée dans ses produits d'annihilation simultanément avec plusieurs types de particules ($\text{anti-}p$, $\text{anti-}D$, $e^- e^+$, γ).

Le projet spatiale EUSO a terminé sa phase A qui a été jugée satisfaisante au niveau des ambitions de la physique et au niveau technique. Des objections ont été soulevées concernant le transport vers l'ISS, l'attente des données issues de l'OPA et le financement par la direction de la Science de L'ESA. Des solutions de transport sont à l'étude via l'utilisation de l'HTV (transporteur japonais) et une plus grande participation financière de la direction des vols habités (D/MSM) de l'ESA est proposée. A plus long terme une proposition d'un détecteur encore plus efficace que EUSO à été déposée dans le cadre du programme Cosmic Vision de l'ESA (2015-2025).

Les neutrinos

Le présent : En raison de la très faible section efficace des neutrinos, un détecteur efficace devrait avoir une masse sensible de l'ordre de 10^9 tonnes (1 km^3 d'eau), d'où la nécessité d'utiliser un milieu naturel, eau de mer ou glace polaire. La collaboration ANTARES construit actuellement, au large des côtes méditerranéennes françaises, un détecteur de neutrinos d'une surface effective de l'ordre de 0.1 km^2 pour des neutrinos de quelques centaines de TeV. Ce projet européen, initié et coordonné par les équipes françaises, sera achevé fin 2006. Il possède un potentiel de découverte appréciable pour les premières observations des sources cosmiques des neutrinos énergétiques (microquasars, AGNs etc.). Enfin les neutrinos peuvent aussi donner une indication sur les particules supersymétriques qui pourraient être à l'origine de la matière noire de l'univers.

Les projets futurs : Pour explorer plus loin l'univers en neutrino, un détecteur plus grand sera nécessaire. Le financement d'un 'design study' pour un tel détecteur (KM3NeT) a été soumis au programme européen FP6. Cette étude durera trois ans et vise une résolution angulaire de $\sim 0.1^\circ$ avec un volume instrumenté d'au moins 1 km^3 dans la Mer Méditerranée. Comme ANTARES, ce détecteur regardera l'hémisphère sud et donc va voir le centre galactique. Avec l'expérience ICECUBE, en construction au pôle sud, ils donneront ensemble une couverture complète du ciel en neutrinos de hautes énergies vers 2011.

Conclusions

Ce programme de recherche se situe au cœur de la Physique des Astroparticules. La France a une contribution importante, à la fois dans la R&D, la construction des instruments et l'analyse et l'interprétation des données. Dans ce domaine il est clairement important d'avancer en utilisant plusieurs observables, la technique multi-messagers, et assurer à la fois le développement et l'exploitation des expériences au sol et dans l'espace. Dans l'avenir un effort significatif doit sans doute être fait pour développer les méthodes de corrélations de ces différentes observations. Il faut également noter que, pour la plupart de ces expériences, il y aura obligation de rendre publique, dans des délais courts, les données ainsi que des logiciels d'exploitation : ceci représente un effort important que la communauté doit évaluer avec réalisme.

Plusieurs des expériences futures impliquent un programme de R&D important. L'utilisation du milieu naturel pour la détection (l'atmosphère, l'eau de mer) nécessite aussi la création de collaborations avec les spécialistes d'autres domaines. Il faut souligner également l'importance des physiciens théoriciens pour l'interprétation des données ainsi que pour la recherche de nouvelles observables.

La communauté scientifique dans ce domaine est environ 150 (??? à estimer) chercheurs permanents. En vue de l'arrivée prochaine des données de plusieurs expériences, il faut assurer le recrutement régulier des jeunes chercheurs.

Les expériences apparaissent bien échelonnées dans le temps et ne présentent pas de recouvrements indésirables. La question qui pourrait se poser est celle des moyens, financiers et humains, disponibles pour les projets à venir et des choix qu'il sera, éventuellement, nécessaire de faire.

Rapport du groupe

« Physique et astrophysique des sources énergétiques des photons aux particules »

issu du Rapport de Prospective GdR PCHE [1] et Rapport de prospective de la CID 47

Participants : Paschal Coyle, Bernard Degrange, Philippe Goret, Isabelle Grenier, Dy-holm Koang, Etienne Parizot, Eric Plagnol, Sylvie Rosier Lees, Tiina Suomijarvi, Sylvaine Turck-chiese, Pascal Vincent

1) Introduction : l'astronomie multi-messagers

Pendant longtemps l'étude de l'Univers et de ses objets s'est appuyée sur l'information donnée seulement par les photons du domaine visible. Progressivement, à partir des années cinquante, se sont ouvertes plusieurs autres « fenêtres d'observation » : ondes radio, infrarouge, ultraviolet, rayons X et gamma, accessibles du sol ou nécessitant l'envoi de missions spatiales. De même, après les travaux de Leprince-Ringuet et d'Auger, les rayons cosmiques apparaissent clairement maintenant comme des vecteurs d'information sur les conditions physiques et les processus à l'œuvre dans l'Univers. Plus récemment, la fenêtre des neutrinos s'est ouverte à la fois sur le Soleil et les autres étoiles. Actuellement il existe un bon nombre de projets visant à la détection des différents messagers du cosmos, et une évolution caractéristique est qu'après une période d'études préliminaires, on cherche à exploiter et à mettre en cohérence l'ensemble de l'information reçue de ces « messagers », et donc à appréhender l'Univers et son contenu suivant une dimension panchromatique et pluri-particulaire.

Les messagers des sources énergétiques peuvent être produits suivant plusieurs voies : les processus d'émission peuvent être d'origine électromagnétique (rayonnement synchrotron, de freinage, effet Compton inverse...) ou hadronique (par production de mésons lors d'interactions nucléaires). Des neutrinos peuvent être produits lors de ces interactions. Les objets à l'origine des phénomènes de haute énergie peuvent aussi produire des ondes gravitationnelles. Particules chargées, les rayons cosmiques peuvent subir l'influence notable des champs magnétique et perdre ainsi une partie de l'information sur leur source, sauf si leur énergie est très grande (10^{20} eV).

Les sites de processus à haute énergie sont variés, et souvent encore très mal connus. L'Univers primordial peut être indirectement à l'origine des particules de haute énergie observées aujourd'hui; Diverses théories de physique des particules au-delà du modèle standard font de telles prédictions. Les objets compacts, comme les noyaux actifs de galaxies, les trous noirs stellaires ou les étoiles à neutrons sont le siège de phénomènes d'accrétion-éjection. L'effondrement d'une étoile en trou noir peut aussi provoquer une violente éjection de matière. Dans tous ces objets le rôle de la gravité, du champ magnétique et des chocs est important.

La détection de ces sources nécessite des moyens variés, au sol et dans l'espace. Plus important, la compréhension du fonctionnement des sources à l'origine des phénomènes de haute énergie nécessite d'utiliser plusieurs moyens. Ainsi la compréhension des phénomènes d'accrétion-éjection dans les plasmas fortement accélérés des noyaux actifs demande d'utiliser l'information dans tout le spectre électromagnétique. Ces mêmes sources font partie des candidats à la production de rayons cosmique d'énergies extrêmes. Les hypernovae sont le siège d'ondes gravitationnelles et sans doute des émetteurs de neutrinos : en fait la détection de ces particules sera facilitée par la connaissance précise de cette hypernovae par la détection du sursaut gamma qu'elle est suspecté de produire. L'astronomie multi-messager ne permet pas seulement d'ouvrir de nouvelles fenêtres : la

détection et la compréhension des phénomènes à l'œuvre impliquant des hautes énergies nécessitent le développement de stratégies cohérentes de mesure, qui pourront allier plusieurs moyens au sol ou dans l'espace, des petites expériences aux très grands équipements (TGE). Corrélativement, il est important que lorsqu'on développe une expérience importante, on pense aux stratégies d'accompagnement à d'autres longueurs d'ondes voire grâce à des observatoires .

2) Les objectifs scientifiques

Les astrophysiciens, sont aujourd'hui rejoints par de nombreux physiciens pour observer et étudier les sources les plus énergétiques de l'univers afin d'analyser le comportement de la matière dans des conditions que l'on ne pourra jamais produire dans les laboratoires terrestres et dans l'espoir de découvrir une physique à l'épreuve de ces conditions exceptionnelles. Rassemblés sous l'égide des astroparticules, physiciens et astrophysiciens unissent désormais leurs efforts pour répondre à une série de questions à l'interface entre physique et astrophysique :

Comment fonctionnent les accélérateurs cosmiques ?

L'accélération de particules à très haute énergie se manifeste dans des contextes différents tels que les jets relativistes d'objets compacts, l'environnement électromagnétique des pulsars et les ondes de choc des restes de supernova, d'hypernova ou des lobes terminaux des jets. Comment le plasma des jets est-il globalement accéléré à des vitesses relativistes malgré un freinage radiatif important et comment ré-accélérer en leur sein des particules à très haute énergie sont deux grandes questions ouvertes à ce jour. De même, le rayonnement cosmique est un phénomène d'une extraordinaire cohérence, s'étendant sur 17 ordres de grandeur, des queues de distribution suprathermiques au keV jusqu'à plus de 10^{20} eV, mais dont l'origine reste en grande partie inconnue.

Quelles sont les sources des RC galactiques ? Où se situe la transition vers les RC extragalactiques ? Comment les particules accélérées se propagent-elles dans le milieu interstellaire ? Avec quel mode de diffusion ? Et dans le milieu extragalactique ? Quel est le rôle, l'intensité et la structure des champs magnétiques correspondants ? Comment les RC influencent-ils en retour les champs magnétiques ? Comment accélérer les rayons cosmiques ultra-énergétiques (RCUE) ? Les noyaux actifs de galaxie ou les sursauts gamma jouent-ils un rôle central dans ce processus ? Les RCUE sont-ils plutôt la manifestation de nouveaux domaines de la physique ? Comment l'« effet GZK » se manifeste-t-il ? Existe-t-il une « coupure GZK » ? Est-elle universelle ? Un objectif essentiel à moyen terme est donc de cerner ces différents processus d'accélération avec les outils de la MHD (MagnetoHydroDynamics) et des interactions rayonnement-particules.

De nombreuses questions illustrent les progrès à faire dans ce but. Les cascades de particules de haute énergie dans les jets d'AGN sont-elles issues d'interactions leptoniques ou hadroniques ? S'accompagnent-elles d'émission de neutrinos ? Quelle est l'énergie maximum des paires e^\pm et/ou noyaux en jeu ? Quels sont les bilans énergétiques des différentes composantes (plasma « lent », paires et noyaux de haute énergie, champ magnétique) ? Les jets des microquasars émettent-ils des γ et des neutrinos ? L'éjection de plasma dans les jets est-elle due à des instabilités dans le disque d'accrétion ? Comment ? Quelle est la nature des sursauts γ courts ?

Existe-t-il de nouveaux états de la matière aux densités et aux énergies extrêmes ?

L'existence d'un grand nombre de sources énergétiques non encore identifiées qui émettent au GeV et au TeV suggère que d'autres formes d'activité à haute énergie restent à découvrir, auprès des objets compacts précités ou d'autres astres dont on n'a pas encore imaginé les facettes à haute énergie. On peut également poser la question de l'existence d'autres étoiles effondrées comme les étoiles à quarks. Dans le cas des étoiles à neutrons, les répercussions des tremblements d'étoiles et

la configuration du champ magnétique permettent de sonder la structure interne de l'étoile à des niveaux de densité plusieurs fois supérieurs à celui de la matière nucléaire où l'équation d'état de la matière et la génération de champ magnétique sont très mal connus.

Que peut nous apprendre l'étude des sources énergétiques sur les lois de la physique ?

L'étude des sources énergétiques dans l'Univers ouvre de nouvelles fenêtres sur les lois de la physique dans des conditions extrêmes. Ainsi l'observation de l'accrétion de matière sur un trou noir stellaire ou supermassif permet de sonder la gravitation en champ extrême en suivant des raies d'émission spécifiques et les oscillations du plasma très près de l'horizon. Elles fournissent également des contraintes importantes sur la masse, le rayon et le moment cinétique du trou noir. A plus long terme, la détection d'ondes gravitationnelles lors de la coalescence d'objets compacts fournira d'autres tests décisifs.

On peut également légitimement se demander si les interactions des particules fondamentales à très haute énergie sont identiques à celles mesurées en accélérateur et l'étude des rayons cosmiques d'ultra haute énergie peut apporter des réponses utiles. De plus, la recherche de signature de défauts topologiques (monopôles et cordes cosmiques) dans ces rayons cosmiques au-delà de 10^{19} eV pourrait contraindre l'existence de ces défauts, vestiges de l'Univers primordial.

Quelle est la nature de la matière noire ? Comment se répartit-elle dans l'univers ? L'étude du ciel à haute énergie, en photons aussi bien qu'en neutrinos, peut apporter de fortes contraintes si la matière noire est constituée de neutralinos. Photons γ , neutrinos du TeV et antiprotons figurent en effet parmi les produits d'annihilation des neutralinos et les puits gravitationnels que sont le centre de la Galaxie, des amas globulaires, du Soleil ou de la Terre peuvent apparaître comme des sources potentielles.

3) Quelques points stratégiques

Pour pouvoir répondre à ces questions, les projets expérimentaux devront être complémentaires et apporter des observations multi-messagers (photons, ν , noyaux légers jusqu'à des Z de 40, anti-noyaux, ondes gravitationnelles) et multi-longueurs d'onde pour suivre la globalité des rayonnements non thermiques. La couverture du ciel sera la plus grande possible pour l'ensemble de ces observations. Enfin, les analyses et interprétations des données ne seront possibles qu'en approfondissant nos connaissances sur le mode de propagation des RC.

Observations multi-messagers

Pour comprendre les sources de haute énergie, il est important de poursuivre en parallèle et corrélérer les observations des particules chargées de haute énergie, du rayonnement non-thermique sur un vaste domaine spectral, des neutrinos ainsi qu'éventuellement corrélérer ces observations avec la détection d'ondes gravitationnelles. Par exemple, un détecteur de neutrino à grand volume de détection aurait une efficacité suffisante pour détecter des neutrinos GZK associés à la propagation des protons accélérés au-delà du seuil de production de pions. Les particules encore inconnues de l'univers peuvent être détectées en observant les produits de leur décroissance, typiquement des neutrinos et des gammas, ou par détection directe. Ces deux méthodes sont complémentaires et sont nécessaires pour une éventuelle mise en évidence d'existence de ces particules. Il faut assurer une interaction forte entre les différentes expériences de ce domaine.

Le développement efficace des observations multi-messagers demande une coordination entre les différents domaines d'observations. Cela demande un échange efficace des résultats, le développement de méthodes pour effectuer une corrélation croisée des données et le développement de catalogues de sources. Cet effort devrait être fait et coordonné au niveau Européen. Il est

important de noter qu'un accès efficace aux données des différents instruments requiert pour chaque instrument un effort important de mise en forme des données et de mise à disposition de logiciels de traitement compréhensibles par une large communauté.

Suivi des sources d'intensité variable

Les sources d'intensité variable nécessitent une coordination particulière pour être suivies simultanément par des instruments spatiaux et au sol dans le cadre de fonctionnements différents entre les observatoires ouverts à la communauté sur proposition d'observation et les instruments d'accès « privé ». Une stratégie doit être également développée pour assurer le suivi autour de la Terre de sources variables à l'échelle de quelques heures.

A l'instar du réseau internet d'alerte des sursauts γ , le développement d'un système d'alerte pour les sources à haute énergie serait très utile. Cela nécessiterait sans doute des efforts à la fois de coordination et de R&D.

Inter-calibration des télescopes γ au sol et en orbite

Pour avoir un domaine spectral commun et inter-calibrer les performances des deux types de détecteurs, il est nécessaire de baisser le seuil en énergie des télescopes au sol. A court terme, le projet de télescope HESS2 pourrait assurer une meilleure couverture spectrale avec GLAST/AMS.

Couverture totale du ciel

Il importe d'avoir la plus grande couverture du ciel pour chaque type de messager afin d'augmenter la statistique des sources potentielles observables. Le grand enjeu de l'étude des rayons cosmiques ultra-énergétiques (RCUE) est l'ouverture historique de l'ère de l'astronomie proton. Les énergies au-delà desquelles les protons ne subissent plus les effets du champ magnétique extragalactique sont malheureusement très élevées, de sorte que le flux du RC susceptible de se prêter à des études astronomiques est extrêmement faible. Il faudra donc s'attacher à accroître l'acceptance des détecteurs de RCUE pour augmenter la statistique de détection des sources individuelles (EUSO, « Cosmic Vision »), et dans le même temps développer les outils théoriques permettant de travailler à la limite de l'astronomie proton, c'est-à-dire dans un domaine où l'isotropisation des RC cesse d'être pleinement efficace, où la propagation rectiligne n'est pas encore acquise mais où le flux des RC reste suffisant pour mener des études statistiques concluantes. Ce domaine est celui de l'Observatoire Pierre Auger, et nécessite la mise en service du site Nord. Grâce à lui, les spectres de RCUE obtenus dans différentes régions du ciel pourront être comparés et croisés avec les distributions des sources potentielles en fonction de la distance, qui sont très différentes dans les deux hémisphères (à l'échelle de la sphère GZK). La mise en oeuvre des deux sites permettra à la fois l'étude des anisotropies de grande échelles (dipôle ou quadripôle), émergentes aux énergies trans-GZK, et l'identification des (éventuelles) sources ponctuelles les plus intenses, obéissant à une statistique des petits nombres impossible à anticiper, mais certainement différente dans les deux hémisphères. Le grand potentiel des RCUE pour la caractérisation des champs magnétiques du disque, et surtout du halo galactique, rend également la couverture complète du ciel (par Auger Nord et EUSO) particulièrement intéressante. Enfin, une couverture complète du ciel augmentera la statistique des corrélations possibles avec des structures à grande échelle, comme le halo galactique ou le plan supergalactique.

Pour les télescopes γ et neutrinos au sol, il est important d'avoir accès aux hémisphères Nord et Sud pour couvrir un maximum de sources énergétiques Galactiques. Ces dernières sont malheureusement encore trop peu nombreuses pour faire l'économie d'une fraction notable d'entre elles d'autant que, par leur proximité, elles sont particulièrement riches d'informations. Une couverture Est-Ouest est également un élément important à prendre en considération pour suivre les sources rapidement variables comme les noyaux actifs de galaxie malgré la rotation de la Terre.

Propagation

L'étude détaillée de la propagation des rayons cosmiques dans l'univers permet de relier la composition et le spectre observés à ceux produits par les sources. La connaissance du champ magnétique et de sa structure (régulière et turbulente) est un élément essentiel pour cette étude, et doit être approfondie, y compris sur le plan théorique (génération de la turbulence, couplage et croissance des modes MHD induits par les RC eux-mêmes, etc.). Les mesures isotopiques (AMS) peuvent apporter des informations importantes sur la propagation et sur les sources, et doivent être couplées à la mesure plus précise des sections efficaces concernées. Pour les énergies extrêmes, des efforts particuliers - théoriques et observationnels - devront être faits pour mieux connaître les champs magnétiques extragalactiques.

Maîtrise du milieu naturel de détection

La détection des particules ou rayonnement énergétique se fait en utilisant des milieux naturels (l'atmosphère, l'eau de mer, la glace) comme milieu d'interaction. Les conditions dans ces milieux (pression, température, transparence...) affectent les mesures et la maîtrise de leur modélisation est cruciale pour les observations. Des efforts supplémentaires, nécessitant une interaction forte avec les autres sciences concernées (météorologie, glaciologie, océanographie...) sont nécessaires.

En parallèle, il est important de poursuivre la R&D liée aux nouvelles techniques d'observation, notamment celles faisant intervenir le rayonnement radio.

Interface avec la physique des particules

Pour tirer tous les bénéfices des nouvelles observations multi-messagers, il est important de poursuivre les investigations théoriques et expérimentales en physique des particules au-delà du modèle standard et des énergies actuellement accessibles. Par exemple, l'étude expérimentale des rayons cosmiques extrêmes repose sur l'analyse des gerbes atmosphériques dont le développement précis est encore en partie incertain en raison de notre méconnaissance de certains processus de physique des particules pouvant intervenir. Les mesures effectuées auprès du LHC devraient permettre de mieux contraindre les modèles hadroniques qui sont aujourd'hui des sources d'erreurs systématiques difficilement contrôlables.

Il est également très important, étant donné le fort accroissement de sensibilité des télescopes γ , de reprendre et parfaire des calculs classiques comme celui de l'émissivité γ et neutrinos des interactions hadroniques (p-p, p-n, p-He, ...), qui datent souvent des années 60 et 70 et n'ont plus la précision nécessaire pour interpréter correctement les données. Ces émissivités sont essentielles pour estimer la distribution spectrale de l'émission γ des milieux diffus comme les nuages interstellaires, les restes de supernova et d'hypernova mais aussi dans les jets.

Interface avec la physique des plasmas.

Le processus global d'accrétion et d'éjection de matière, et notamment le lancement et la collimation des jets, omniprésents dans les sources astrophysiques énergétiques, à des échelles très variées, demeurent des problèmes physiques mal compris, dont la clé appartient probablement à la physique des plasmas. L'accélération des particules dans les chocs dépend également de la génération de turbulence magnétique qui fait appel à des processus MHD souvent complexes et non-linéaires. Compte tenu du rôle des particules énergétiques dans la croissance, l'amortissement et le couplage des différents modes, il existe une forte rétroaction entre les particules énergétiques et le plasma MHD ambiant. Par exemple, des tests de l'amplification des champs magnétiques sont possibles grâce à l'étude multi-longueurs de sources comme les restes de supernova.

Interface avec la physique nucléaire.

L'étude phénoménologique du rayonnement cosmique galactique repose en grande partie sur l'analyse des rapports élémentaires et isotopiques des différentes espèces de noyaux. Afin d'en tirer tout le profit, il est crucial d'améliorer notre connaissance des sections efficaces qui gouvernent l'évolution des populations de rayons cosmiques durant leur transport. De même, pour traiter convenablement la propagation des noyaux ultra-énergétiques, dont l'interaction avec le rayonnement cosmologique provoque l'évaporation progressive par perte de nucléons, il est important de décrire avec une précision accrue les différents processus de physique nucléaire mis en jeu et de revoir les sections efficaces de photo-fragmentation impliquées.

4) Les dispositifs expérimentaux

Les dispositifs expérimentaux se classent suivant deux catégories, les expériences au sol et spatiales.

4.1) Les dispositifs expérimentaux au sol

4.1.1) Astronomie gamma de très haute énergie

Expériences en cours :

La décennie 1990-2000 a été marquée par les progrès instrumentaux des techniques utilisant l'effet Tcherenkov dans l'atmosphère¹ pour détecter les gerbes cosmiques et pour identifier celles, très rares, qui sont produites par des rayons γ primaires. La technique d'imagerie, d'abord développée à l'observatoire Whipple aux États-Unis, a vu ses performances s'améliorer avec les expériences CAT (électronique rapide, image à haute définition) et HEGRA (stéréoscopie). Le projet HESS, conçu par des groupes allemands et français, combine les avantages des expériences précédentes : la grande surface collectrice (4 miroirs de 12 m de diamètre) et l'électronique rapide permettent d'abaisser le seuil par télescope un peu en dessous de 100 GeV ; grâce à la stéréoscopie et à la qualité d'image, le fond dû aux rayons cosmiques chargés est réduit de près de 4 ordres de grandeur, d'où un gain d'un facteur 10 en sensibilité par rapport aux meilleurs détecteurs antérieurs (figure 3). Chaque caméra couvre un champ de 5° de diamètre (permettant l'étude d'objets étendus comme les restes de supernovae) avec 960 photomultiplicateurs et inclut toute l'électronique de déclenchement et de lecture d'un télescope. Les 4 caméras (pesant chacune 800 kg) sont construites par les groupes français. En Juin 2002, les structures mécaniques des 4 télescopes ont été installées sur le site de Göllschau en Namibie et le premier télescope, complètement équipé (miroirs et caméra), a effectué ses premières observations à l'été 2002. L'ensemble des 4 télescopes est opérationnel depuis décembre 2003. Le site austral a l'avantage de donner accès aux régions centrales de la Galaxie (ce qui est important pour l'étude des pulsars et restes de supernovae et celle du rayonnement diffus de la Galaxie), en particulier au trou noir du Centre Galactique, et à la plupart des amas globulaires, riches en systèmes binaires et sources potentielles de γ issus d'annihilations de neutralinos ; dans le domaine extragalactique, le programme d'observation des blazars est évidemment prioritaire. Les premiers résultats de HESS, pourtant obtenus en 2003 avec une installation partielle, font prévoir un catalogue de sources beaucoup plus fourni que la liste antérieure de sources au TeV : première image gamma d'un vestige de supernova (RX J 1713-3946), détection d'un signal provenant du Centre Galactique, détection d'un système binaire galactique où un pulsar interagit avec le vent d'une étoile massive, mise en évidence d'une source galactique non identifiée dans le champ de vue de l'objet précédent, détection à toutes les époques d'observation du blazar PKS2155-304. Cette série de résultats devrait conduire dans un avenir

proche à des méthodes de travail différentes, tant pour la conduite des observations que pour la mise en forme des données sous une forme utilisable par l'ensemble de la communauté d'astrophysique.

Expériences à l'étude:

Les réflexions se sont portées dans plusieurs directions. D'une part, une poussée vers les basses énergies pour assurer un recouvrement avec les missions spatiales et pour profiter des grandes surfaces efficaces de détection (de l'ordre de plusieurs hectares) offertes par les télescopes Tcherenkov; un site en haute altitude pourrait alors être envisagé pour maximiser la quantité de lumière reçue. D'autre part, l'extension ultérieure des installations en cours de construction est une option intéressante si, comme il est probable, le catalogue de sources au TeV augmente rapidement avec cette nouvelle génération d'expériences, ce qui permettrait de réaliser un relevé systématique dans certaines régions du ciel.

4.1.2) Astronomie des neutrinos

Une solution alternative pour l'observation de sources très éloignées est la détection de neutrinos. Ces particules ont les caractéristiques requises pour compléter le photon et les RC comme messagers cosmiques. Electriquement neutre, le neutrino n'est pas défléchi par les champs magnétiques. Il est stable et il interagit seulement faiblement. Il peut ainsi voyager depuis les régions les plus éloignées de l'univers jusqu'à la Terre. Les neutrinos avec des énergies comprises entre 10^{12} eV et 10^{20} eV sont les seuls messagers permettant de sonder l'univers en profondeur. Les neutrinos cosmiques de haute énergie n'ont pas encore été observés ; leur flux ne peut être évalué qu'en se basant sur des modèles. Généralement ces modèles partent de l'hypothèse que les neutrinos proviennent, de façon prédominante, de la désintégration de hadrons produits par l'interaction de protons de haute énergie avec des photons ou des noyaux. La plupart donne des flux de neutrinos tels qu'un télescope à neutrinos d'un volume d'au moins un kilomètre cube est nécessaire: quelques centaines de neutrinos pourraient être détectés par an pour les AGN et pour les microquasars, et quelques dizaines de neutrinos pourraient être détectés en coïncidence avec des GRB. La signature des événements GRB ou des phases active des microquasars devrait être très propre grâce à la corrélation spatio-temporelle avec l'observation optique (déjà multi-longueur d'onde); le bruit de fond sera tellement faible que seuls quelques événements seront suffisants pour affirmer que les phénomènes donnant lieu aux sursauts gamma ou aux phases actives des microquasars produisent aussi des neutrinos de haute énergie. Ce serait une (des) découverte(s) de grand intérêt scientifique car la détection simultanée de photons et de neutrinos devrait contraindre les modèles décrivant ces phénomènes, plaçant l'astronomie multi-messagers dans le sillage de l'astronomie multi-longueurs d'onde.

Les collaborations Cangaroo et HESS ont récemment rapporté l'observation d'un excès statistiquement significatif de photons de plusieurs TeV en provenance du centre de la Galaxie. Ce signal suggère un comportement du centre de la Galaxie similaire à celui des AGN qui émettent des rayons gamma de haute énergie. Dans une stratégie s'efforçant de détecter des émissions de neutrinos de haute énergie par les AGN il est très encourageant de penser que le centre de notre Galaxie, si proche de nous, serait un de ces objets.

Un autre sujet d'intérêt est la recherche de matière sombre non baryonique. La recherche directe de matière sombre est le sujet de plusieurs expériences souterraines actuelles. La recherche indirecte peut être effectuée avec un télescope à neutrinos capable de détecter les neutrinos engendrés par l'annihilation de neutralinos accumulés dans les centres de corps célestes massifs comme la Terre, le Soleil et le centre de la Galaxie depuis leurs origines. Les calculs montrent que la sensibilité pour cette détection la rendrait complémentaire de la détection directe.

Un télescope à neutrinos en Mer Méditerranée sera le complément du télescope IceCube qui est en train d'être construit au Pôle Sud (fin de construction prévu ~2011). Les meilleures propriétés de l'eau de mer - par comparaison à la glace de l'Antarctique - devraient conduire à une meilleure résolution angulaire et donc à une meilleure réjection du bruit de fond. Un télescope à neutrinos situé en Mer Méditerranée permettra d'explorer la plus grande partie du disque galactique, y compris la région du centre de la Galaxie, très riche en étoiles et il est généralement supposé que la distribution spatiale des sources de neutrinos galactiques est la même que celle des étoiles. Il est, de plus, possible, comme on vient de le voir, qu'un AGN soit situé au centre de la Galaxie. Cette région du ciel est difficilement observable par un télescope à neutrinos situé au Pôle Sud.

Le passage des anciens détecteurs souterrains de quelques kilotonnes à l'installation et l'exploitation d'un détecteur à l'échelle du km^3 au fond de la mer constitue une entreprise complexe qui doit être validée par une étape intermédiaire. C'est dans ce contexte que se situe le projet ANTARES qui permettra de vérifier que l'on est capable de construire un détecteur fiable, malgré le milieu hostile, et contrôlable à distance.

Expériences en cours :

Les télescopes à neutrinos détectent en fait la lumière Tcherenkov émise par les muons de haute énergie produits, souvent assez loin de la zone instrumentée, par des neutrinos muoniques ν_μ . Le caractère directionnel de l'effet Tcherenkov permet de se restreindre aux muons ascendants et d'éliminer toute contamination par des muons descendants, directement produits par les gerbes cosmiques atmosphériques au-dessus du site de l'expérience. Les neutrinos secondaires de ces gerbes atmosphériques constituent cependant un fond diffus inévitable qui domine surtout à basse énergie.

Après une longue gestation, l'astronomie des neutrinos de haute énergie a débuté par la mise en service dans les années 1990 des détecteurs prototypes NT200 au lac Baïkal et AMANDA-B10 dans la calotte glaciaire au Pôle Sud. La collaboration européenne ANTARES construit actuellement, au large des côtes méditerranéennes françaises et à une profondeur de 2500m, un détecteur de neutrinos constitué de 12 lignes de mouillage sur lesquelles sont fixés 900 <<modules optiques>> équipés de photomultiplicateurs enregistrant les temps d'arrivée de lumière Tcherenkov avec ~1ns précision. Ce télescope qui devrait être complété fin 2006, aura une surface effective d'environ $0,05 \text{ km}^2$ pour des neutrinos de quelques centaines de TeV.

Le détecteur ANTARES possède déjà un potentiel de découverte appréciable. Grâce à la bonne transmission de la lumière et à la faible diffusion, la direction du neutrino sera déterminée avec une résolution angulaire inférieure à $0,2^\circ$ dans la région d'énergie au dessus de 10 TeV (~dix fois meilleure que Amanda II). Le bruit de fond dû aux neutrinos atmosphériques affectant chaque source sera inférieure à 0,1 événements par an.

Des modèles ont été élaborés pour décrire l'émission de neutrinos de haute énergie par des microquasars. Quelques événements par an sont attendus en provenance des sources permanentes GX 339-04 et SS433 proches du centre galactique.

Les flux estimés en provenance des sièges de sursauts gamma sont en général plus faible. Les études effectuées montrent que même dans ce cas un signal positif pourrait être obtenu en quelques années de prise de données en additionnant la contribution de toutes les sources détectables - environ 3 par jour avec un satellite comme BATSE- et en exploitant la durée limitée de chaque sursaut.

Pour détecter un fond diffus de neutrinos, résultant de la superposition d'un nombre considérable de sources lointaines non discernables, la seule signature disponible est le spectre en énergie plus dur

que celui des neutrinos atmosphériques. Le meilleur estimateur de l'énergie du neutrino est la perte d'énergie du muon induit par unité de longueur (dE/dx). Cette quantité est estimée à partir de la quantité de lumière Tcherenkov enregistrée par les modules optiques. Les études effectuées montrent qu'on peut estimer l'énergie du neutrino à un facteur 2 près. En sélectionnant des événements dont l'énergie estimée est supérieure à 50 TeV le bruit de fond sera réduit à environ 10 événements par an. Ceci permettra d'être sensible à des flux proches à la limite très conservatrice de Waxman & Bahcall.

En ce qui concerne la détection de la matière sombre, la sensibilité du détecteur ANTARES serait meilleure que les détecteurs précédents (MACRO, BAKSAN, SK). Dans le cadre du modèle mSUGRA, les calculs montrent que pour le soleil certains classes des modèles pourraient conduire à des flux de neutrinos détectables.

Expériences à l'étude :

La demande de financement pour un `design study` (DS) pour une deuxième génération de télescopes à neutrinos a été récemment soumise dans le cadre par le programme européen FP6. L'infrastructure proposée (KM3NeT) comprendra un télescope neutrino d'un volume d'au moins un kilomètre cube, avec un seuil de détection de quelques centaines de GeV et une résolution angulaire visée meilleure que $0,1^\circ$ pour les neutrinos d'énergie supérieurs à 10 TeV. La conception, la construction et l'opération de ce télescope seront effectuées par une collaboration formée par les instituts impliqués dans les projets ANTARES, NESTOR et NEMO. Le DS devrait durer trois ans suivi par cinq ans de construction et déploiement. Le DS proposera également un site préféré dans la Mer Méditerranée. La sensibilité d'un tel détecteur sera au moins vingt fois meilleure que celle d'ANTARES avec une résolution angulaire cinq fois meilleure que pour ICECUBE.

4.1.3) Rayons cosmiques d'énergie ultra-haute

Expériences en cours :

L'observatoire Pierre Auger (OPA) est un détecteur de rayons cosmiques ultra-énergétiques (RCUE), au-delà de quelques 10^{18} eV, dont les deux caractéristiques majeures sont une très grande acceptance (de 7000 à 9000 km² sr, suivant l'angle zénithal maximum des gerbes atmosphériques reconstruites) et un mode de fonctionnement hybride, s'appuyant sur un détecteur de surface (un réseau de 1600 cuves à effet Cherenkov couvrant 3000 km²) et un détecteur de fluorescence (composé de 4 fois 6 télescopes observant l'atmosphère au dessus du réseau de surface). Dans l'un et l'autre cas, ce n'est pas la particule incidente qui est détectée, mais la gerbe de particules secondaires qu'elle engendre dans l'atmosphère. L'utilisation conjointe des deux méthodes de détection, sur les mêmes gerbes atmosphériques, est cruciale pour tenter de réduire les erreurs systématiques, et résoudre les problèmes de calibration révélés par la comparaison des résultats de diverses expériences antérieures.

Actuellement (septembre 2004), près de 500 des 1600 cuves prévues sont déjà en fonctionnement, et 2 des 4 sites de fluorescence sont en activité. La prise de données officielle a débuté au 1er janvier 2004, et l'installation complète de l'OPA devrait s'achever fin 2005. L'acceptance intégrée de l'OPA dépassera celle accumulée par les expériences antérieures dès la fin de 2004, et le réseau complet détectera plus de 5000 événements par an (dont 10% en mode hybride) avec une énergie supérieure à 10 eV (soit 10^{19} eV).

La résolution en énergie est de l'ordre de 15% à 10 eV, pour des gerbes d'angle zénithal inférieur à 60° , et de 10% en mode hybride. Cette résolution augmente légèrement avec l'énergie de la particule primaire. Les erreurs systématiques devraient être considérablement réduite grâce au fonctionnement du détecteur en mode hybride.

La résolution angulaire est toujours inférieure à 2° (limite supérieure pour des gerbes verticales à 10 eV), avec une valeur moyenne de l'ordre de 1° , et 0.2° en mode hybride.

L'identification des rayons cosmiques primaires est très importante pour la discrimination entre les divers mécanismes de production des RCUEs. L'OPA permettra une très bonne distinction entre les noyaux chargés, les photons et les neutrinos. L'analyse des gerbes horizontales devrait permettre d'observer entre un peu moins d'un et plusieurs dizaines de neutrinos par an (en principe quels que soient les modèles de sources), avec un bruit de fond extrêmement faible, et exclure en 5 ans un flux supérieur à 2 neutrinos par km^2 , par an et par sr, pour un spectre en E^{-2} entre 0.3 et 3 EeV. De même, la signature spécifique des gerbes initiées par des photons permettra de déceler un contamination des RCUEs de 5 à 10%. La discrimination entre les différents noyaux sera en revanche plus difficile, mais une analyse statistique sur un l'ensemble des événements permettra de distinguer noyaux lourds et noyaux légers (protons), aussi bien à haute énergie qu'à basse énergie.

Expériences à l'étude:

La prochaine étape dans la détection des RCUEs au sol sera le site Nord de l'OPA. Il permettra d'obtenir une couverture complète du ciel, et donc de mesurer avec précision l'anisotropie à grande échelle des rayons cosmiques, dont la connaissance offrira de précieuses contraintes à la fois sur les sources et sur les champs magnétiques extragalactiques, pratiquement inconnus à l'heure actuelle. La comparaison des spectres intégrés dans les deux hémisphères permettra également de mesurer les variations de forme de la coupure GZK, qui contiennent également de précieuses informations sur la distribution des sources et sur les surdensités locales (cf. section 3). D'autres techniques de détections basées sur l'émission d'ondes radio par les gerbes sont également à l'étude, pour augmenter le pouvoir hybride du détecteur et peut-être obtenir une acceptation plus grande à relativement faible coût. La radiodétection des gerbes permettrait en particulier une couverture hybride du ciel pendant 100% du temps (au lieu de 10 à 14% dans le cas de la détection de la fluorescence).

4.2) Missions spatiales

Elles jouent un rôle majeur dans l'étude des sources énergétiques, photoniques et non photoniques en permettant la détection des messagers interagissant dans les hautes couches de l'atmosphère (photons X et gamma, particules chargées) : Le bruit de fond est donc réduit et le seuil en énergie des messagers peut être diminué. Par contre la surface de détection par rapport aux expériences au sol est nettement plus faible.

4.2.1) Astronomie Gamma multi longueurs d'onde ou Rayons X et Gamma

Missions en cours :

La décennie précédente a vu la mise en service de deux grands télescopes à rayons X, l'américain CHANDRA (lancé en juillet 1999) et l'europpéen XMM-NEWTON (lancé en décembre 1999). La décennie en cours a débuté avec le lancement du petit satellite américain à participation française HETE-2, dédié à l'étude des sursauts gamma (octobre 2000), et le lancement du satellite INTEGRAL (octobre 2002). La mission INTEGRAL, la dernière en date des grandes missions astronomiques de l'Agence Spatiale Européenne (ASE), a pour objectif principal l'exploration approfondie des sources d' »mission entre 15 keV et 10 MeV. La charge utile d'INTEGRAL permet l'utilisation simultanée de deux dispositifs à ouverture codée : le télescope IBIS, apte à fournir des images à haute résolution angulaire (pouvoir séparateur $12''$), et le spectromètre SPI, chargé de la spectroscopie gamma à très haute résolution (0,2 % à 1 MeV). IBIS comprend deux plans détecteurs de grande surface (3000 cm^2), montés à 10 cm l'un de l'autre. ISGRI, le plan détecteur supérieur, est une caméra gamma de nouvelle génération faite d'une nappe de semi-conducteurs

CdTe qui lui confère une très bonne résolution spatiale, décisive pour localiser les sources avec précision ($30''-1'$). Ainsi doté d'une capacité à localiser les sources supérieure à celle du télescope SIGMA à bord de GRANAT, IBIS fait surtout montre d'une sensibilité accrue de plus d'un ordre de grandeur et d'une couverture spectrale beaucoup plus étendue (15 keV à 10 MeV). IBIS bénéficie également d'un champ plus vaste ($19^\circ \times 19^\circ$ à mi-sensibilité) qui lui permet de détecter les sursauts gamma au rythme d'un par mois et d'en fournir en temps quasi réel la position précise ($1'$) sur la voûte céleste. Le plan détecteur de SPI est une matrice hexagonale composée de 19 semi-conducteurs de germanium couvrant une surface utile de 500 cm^2 . Les détecteurs germanium sont montés dans un cryostat qui les maintient à une température de 85 K par une combinaison de dispositifs réfrigérants actifs et passifs. Ils confèrent à SPI un pouvoir de résolution spectrale 15 fois meilleur que celui du spectromètre OSSE à bord du COMPTON GAMMA-RAY OBSERVATORY (CGRO). Les opérations de la mission INTEGRAL, qui inclut également deux instruments complémentaires, JEM-X et OMC, opérant respectivement dans la bande des rayons X et dans le domaine visible, ont été récemment confirmées comme devant se prolonger jusqu'en 2008.

La France participe largement à la mission INTEGRAL. C'est ainsi que le CNES a assuré la maîtrise d'œuvre du spectromètre SPI dont les sous-systèmes ont été réalisés par un vaste consortium de laboratoires au sein duquel deux laboratoires français jouent les premiers rôles : le CESR à Toulouse et le Service d'Astrophysique du CEA à Saclay. Avec le soutien du CNES, le Service d'Astrophysique du CEA a également réalisé la caméra gamma de nouvelle génération ISGRI, l'élément clé du télescope IBIS, et participe à la mise en œuvre de l'ISDC, le centre de traitement des données scientifiques qui permettra aux non-spécialistes de mener des observations avec l'observatoire INTEGRAL. Une large fraction du temps d'observation est attribué par le Comité d'Allocation du Temps sur la base de propositions d'observation envoyées par la communauté scientifique en réponse à un appel d'offre que l'Agence Spatiale Européenne émet chaque année.

Mission en service à l'horizon 2008 :

L'année 2004 verra la mise en service de SWIFT, une mission moyenne américaine dont l'objectif principal est l'étude des sursauts gamma. La stratégie d'observation mettra en jeu le télescope BAT. BAT est en mesure de détecter les sursauts gamma dans la bande 10-120 keV et de les localiser avec une précision de $4'$. Prévus pour durer au moins trois ans, la mission SWIFT sera en mesure de détecter et de localiser avec précision plus de 300 sursauts gamma par an dont la position sur la voûte céleste sera fournie en temps quasi réel (moins de quelques mn) aux autres moyens d'observation au sol et dans l'espace.

L'autre grande mission devant entrer en service dans la décennie en cours est la mission internationale GLAST, dont le lancement doit intervenir en 2007. GLAST se propose d'observer le ciel gamma dans la bande des rayons gamma de haute énergie avec des performances encore jamais atteintes dans ce domaine spectral et très supérieures à celle de son prédécesseur EGRET à bord du satellite américain Compton-GRO. La plate-forme spatiale emportera un réseau de 4×4 télescopes gamma à production de paires comprenant chacun un hodoscope (fait de 18 plans de pistes de silicium de $40 \times 40 \text{ cm}^2$) associé à un calorimètre (fait de 8 couches de 12 barreaux de CsI pour une épaisseur totale de 10 longueurs de radiation). Ce dispositif à très grand champ de vue ($2,5 \text{ sr}$) permettra d'observer une large fraction du ciel dans la bande des rayons gamma de 20 MeV à 300 GeV, avec une sensibilité 30 fois meilleure que celle d'EGRET, une bonne précision de localisation des sources ($0,3'$ à $7'$), alliée à une excellente résolution spectrale (2% à 10 GeV). La charge utile est réalisée par une vaste collaboration de laboratoires d'astrophysique et de physique des particules aux Etats-Unis, au Japon et en Europe, avec une contribution française au niveau du calorimètre. Prévus pour durer au moins cinq ans la mission GLAST sera en mesure de détecter et de localiser avec précision des milliers de sources gamma, des noyaux actifs de galaxie, des pulsars, des restes

de supernova, des sursauts γ et les fameuses sources γ non identifiées. La charge utile de GLAST inclut aussi le moniteur de sursaut gamma GBM, apte à détecter dans un très vaste champ de vue (2π sr) les sursauts gamma dans la bande 10 keV-25 MeV et de les localiser avec une précision de quelques degrés.

Dans ce contexte favorable, nous pouvons envisager la découverte de milliers de nouvelles sources gamma. Compte tenu des moyens d'observation qui seront alors disponibles à très haute énergie, ce sont des dizaines de sources qui pourront alors être étudiées simultanément du keV au TeV.

Missions à l'étude :

Dans le cadre des micro-satellites du CNES, le projet ECLAIRS a pour but d'observer simultanément en γ , X et visible l'émission prompte des sursauts γ et un éventuel précurseur. Aucun instrument programmé au cours de la décennie ne pourra remplir cette mission. ECLAIRS comprend deux unités de détection aux champs de vue comparables (2 sr) opérant respectivement dans la bande des rayons X et gamma de basse énergie (4-600 KeV) et dans le visible. Proposée en réponse à l'appel à idée du CNES lancé à la fin de 2003, la mission ECLAIRS pourrait entrer en opération à partir de 2008. Prévue pour durer au moins trois ans, la mission ECLAIRS sera en mesure d'effectuer une observation multi longueurs d'onde de l'émission prompte d'une centaine de sursauts gamma par an dont la position sur la voûte céleste sera fournie en temps quasi réel aux autres moyens d'observation au sol et dans l'espace.

L'autre voie qui s'ouvre est celle des satellites en formation, seule solution pour mettre en œuvre des instruments dont les dimensions dépassent les capacités d'emport des moyens spatiaux. Par exemple, en astronomie à haute énergie, cette nouvelle technique permettrait de concevoir des télescopes à très grande focale qui seuls permettraient de concentrer les rayonnements d'énergie supérieure à une dizaine de KeV. Deux missions proposées en réponse à l'appel à idée du CNES s'inscrivent dans cette perspective. Il s'agit de SIMBOL-X, une mission qui, en s'appuyant sur deux satellites en formation, se propose d'étendre jusqu'à 70 keV les capacités des miroirs à incidence rasante en terme de sensibilité et de résolution angulaire. SIMBOL-X affiche ainsi une sensibilité et une résolution angulaire améliorées de plus de deux ordres de grandeur par rapport à INTEGRAL, deux atouts maîtres pour approfondir l'étude des sites des phénomènes cosmiques de haute énergie. SIMBOL-X pourrait entrer en service en 2011.

4.2.2) Rayons cosmiques chargés de haute énergie et ultra haute énergie

Mission en service à l'horizon 2008 :

L'expérience AMS02 qui doit être montée à bord de la Station Spatiale Internationale (ISS) en 2007 pourra mesurer avec une précision jamais atteinte la composition et le spectre des rayons cosmiques (e^- , γ , p , anti- p et des noyaux légers identifiés en masse jusqu'à des $A < 13$ et en charge jusqu'à des $Z < 30$) dans la gamme d'énergie allant du GeV à quelques TeV. AMS est constitué d'un aimant supraconducteur produisant un champ magnétique intense, de l'ordre de 1 Tesla, équipé d'un trajectographe formé de 8 plans de silicium permettant de déterminer avec précision, de l'ordre du %, l'impulsion et le signe de la particule chargée qui le traverse. Ce spectromètre magnétique d'un volume d'environ $(3m)^3$ est complété par un ensemble de détecteurs permettant d'identifier, de façon redondante, le type de particule ou noyau considéré: un Détecteur de Rayonnement de Transition (pour la discrimination lepton/proton jusqu'à 300 GeV), un hodoscope de Temps de Vol (pour le déclenchement sur les chargés et une mesure de perte d'énergie par ionisation), un compteur Cerenkov de type RICH à focalisation de proximité (mesure de la vitesse et de la charge permettant d'identifier les noyaux jusqu'à des Z de 30 et les isotopes pour des Z de 12) et un CALorimètre Electromagnétique de type spacial (mesurant l'énergie des e^+ , e^- , γ et contribuant à la

discrimination lepton/proton). En plus de ces mesures de précision utiles pour la compréhension des modèles, AMS effectuera des recherches : d'antimatière primordiale, avec une sensibilité améliorée par trois ordres de grandeur (objectif anti-He/He= 10^{-9}) ; de nouvelles formes de matière comme les strangelets et de matière noire recherchée dans ses produits d'annihilation simultanément avec plusieurs types de particules (anti-p, anti-D, e^+ , gamma). AMS peut détecter les photons gamma de haute énergie par deux méthodes (convertis et non convertis) qui peut être mise au service de l'étude au delà du GeV au TeV de sources de type blazar ou sursaut gamma. Cette mission est prévue pour une durée d'environ 3 à 5 ans. Passée cette période, correspondant à la quantité embarquée d'Helium liquide, elle se poursuivra sans analyse magnétique tout en permettant d'accumuler des informations (protons, noyaux, gamma) pendant un cycle solaire complet.

Missions à l'étude :

Toute une série de missions spatiales d'astrophysique à haute énergie sont à ce jour à des degrés divers d'engagement. Celles proposées à l'Agence Spatiale Européenne s'inscrivent dans le plan de prospective « Cosmic Vision 2015-2025 » récemment présenté à l'Agence.

La plus avancée dans les procédures de sélection propres aux missions spatiales, un long parcours à l'issue toujours incertaine, est l'expérience EUSO pour laquelle l'ASE a terminé une étude de phase A dans le cadre de son installation à bord de l'ISS. L'objectif d'EUSO est l'étude des rayons cosmiques aux énergies extrêmes (EECR) par le truchement des gerbes de particules chargées qu'ils produisent dans l'atmosphère. Le dispositif expérimental met en œuvre un télescope de grande ouverture angulaire monté sur le module européen Columbus de l'ISS. Avec son plan focal équipé de photomultiplicateurs multi anodes, ce télescope détectera la lumière qu'émet par fluorescence les molécules d'azote de l'atmosphère excitées par le passage de la gerbe, ainsi que la lumière Tcherenkov produite au cœur de la gerbe et qui se réfléchit sur le sol ou sur les nuages. Contrôlant ainsi depuis l'espace un très vaste milieu détecteur, d'une masse de 10^{12} T pour un facteur géométrique de $6 \cdot 10^5$ km² sr, EUSO serait en mesure de détecter plus de mille EECR par an à des énergies $E > 10^{20}$ eV et déterminer leur direction d'origine. Le développement de la mission EUSO est entrepris par une vaste collaboration internationale au sein de laquelle la France est responsable de l'électronique frontale analogique et en charge d'études concernant la modélisation de l'atmosphère et le plan focal du détecteur.

EUSO a la potentialité d'observer des neutrinos au delà de 10^{20} eV. Ces derniers peuvent être révélateurs des phénomènes les plus énergétiques de l'univers et ainsi de la présence des SHDM (SuperHeavy DarkMatter) ou de défauts topologiques (modèles hybrides) .

La confirmation de l'existence des événements super GZK par AUGER renforcera évidemment l'intérêt d'EUSO. Dans le cas contraire, en sera fortement réduit pour toutes les expériences, l'avantage statistique d'EUSO sera fondamental pour comprendre le spectre des UHECR à des énergies extrêmes (au delà de 10^{20} eV)

5) Implication de la communauté française dans les projets

Projets issus de la communauté astroparticule avec participation française

Les expériences en cours (construction et exploitation) au sol sont :

- AUGER (Sud)
- HESS
- ANTARES

Les missions spatiales en cours actuellement sont :

- AMS
- GLAST
- HETE-2
- INTEGRAL

Projets à l'étude en France

Expériences au sol :

- HESS2
- AUGER (Nord)
- KM3NET

Missions Spatiales :

- EUSO
- ECLAIRs
- SIMBOL-X

Projets complémentaires

- VLT, VLTI, ELT
- ALMA
- LHC, collisionneur linéaire

Liste de autres projets dans la monde, au sol et missions spatiales

- VERITAS
- MAGIC
- ARGO
- KASCADE-Grande
- MILAGRO
- AMANDA, ICECUBE
- CANGAROO III
- ANITA
- RICE
- ICETOP
- TA
- HiReS
- PAMELA
- AGILE
- SWIFT
- CONSTELLATION-X
- MAXIM

Référence

1. « Rapport de prospective 2002-2010 du Groupement de Recherche Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie » 2002, rédiger par Vincent Bertin, Murat Boratav, Fabien Cavalier, Suzy Collin, Bernard Degrange, Jean-Marie Hameury, Luciano Moscoso, Jacques Paul, Guy Pelletier, Patrick Peter, et David Smith avec l'aide

de Didier Barret, Luc Blanchet, Étienne Parizot, Pierre Salati, Gilbert Vedrenne.
<http://polywww.in2p3.fr/gdr/T>

2. Rapport de prospective de CID 47, Avril 2004

Astrophysiques des Hautes Energies

1.0 Les rayons cosmiques d'ultra haute énergie et haute énergie

Observatoire Pierre Auger
<p>TGE mondial.</p> <p>Partenaires : IN2P3, INSU. Calendrier souhaitable : - Complétion Auger Sud fin 2005 - Démarrage Auger Nord 2006</p> <p>Stade actuel : construction Sud en cours (20% construit), lettre d'intention et passage devant le SAGENAP le 15 avril pour Auger Nord.</p>
<p><i>INSTRUMENT : Détecteur géant de rayons cosmiques</i></p>
<p>Détecteur international (13 pays) Partenaires : Europe (Allemagne, Italie, Royaume Uni, Pologne, République Tchèque, Slovénie, Espagne); USA; Amérique latine (Mexique, Brésil, Argentine); Australie. Autres partenaires attendus pour Auger-Nord (Canada...).</p> <p>Coût total : 50 M\$ (comptabilité à l'américaine), 35 M€ (AP) par site. Contribution française à Auger Sud : environ 10%</p>
<p>Objectifs scientifiques : étude approfondie des rayons cosmiques d'énergies ultimes; recherche de sources astrophysiques, anisotropies; mécanismes de propagation, champs magnétiques galactiques et extra-galactiques; mise en évidence d'éventuels phénomènes exotiques (désintégration de particules super-massives, violation de l'invariance de Lorentz...); détection des neutrinos d'ultra-haute énergie (10^{17} eV et au-delà).</p> <p>Projets en compétition (collaboration ?) : Telescope Array (Japon-USA); EUSO (Europe-USA).</p>

AMS	
Buts scientifiques	Recherche de l'antimatière d'origine primordiale et de la matière noire dans l'univers ; étude avec haute statistique (du GeV au TeV) du rayonnement cosmique de particules chargées (e-, e+, p ,anti-p) et du rayonnement cosmique nucléaire pour des noyaux identifiés en masse jusqu'à des A<13 et en charge jusqu'à des Z <30 ; astronomie gamma de haute énergie (du GeV au TeV).
Classe de mission	Mission DOE/NASA. NASA responsable pour le vol, DOE responsable pour l'expérience. Instrument développé principalement par laboratoires européens. Orbite basse sur l' ISS (Station Spatiale Internationale)
Description	Instrument « Multipropos » dérivé des techniques utilisées en physique des particules : Spectromètre magnétique (3m) ³ comprenant un aimant supraconducteur associé à un détecteur de traces de 8 plans de Silicium, un détecteur de rayonnement de transition (TRD), deux groupes d'hodoscopes XY de temps de vol, un imageur Cherenkov (RICH), un calorimètre électromagnétique (ECAL), un hodoscope de réjection de bruit de fond.
Collaboration	56 laboratoires de 16 pays (USA, Russie, Chine, Corée, Taiwan, Allemagne, Italie, Suisse, Espagne, France, Finlande, Pays-Bas, Portugal, Mexique, Roumanie, Danemark)
Participation française	LAPP Annecy : physique des e+/e- et des gamma et ECAL : Conception et réalisation de l'électronique front-end , numérisation et réduction des données, conception et réalisation du trigger gamma analogique, mécanique du bloc de lumière (guides, couplage optique, blindage magnétique), bancs de tests pour production, mécanique des radiateurs, Assemblage et intégration dans AMS02. Tests de qualification LPSC Grenoble : physique des noyaux et RICH : Conception et réalisation de l'électronique front-end, bancs de tests pour production qualification des blocs PM. Intégration et tests de qualifications GAM : Physique des gamma : Implémentation d'un GPS et réduction des données du détecteur de traces. Pour les trois laboratoires : Simulation de processus physiques ; Préparation, participation et analyses des tests en faisceau du Cern pour validation des solutions et mesures des performances des détecteurs
Coût de la partie française	Total IN2P3+CNES+Région Rhône-Alpes + Dép. Haute-Savoie : 1,4 M €. hors salaire . 14 hommes/an Ingénieurs et techniciens.
Particularités technologiques	ECAL : Sandwiches de plomb et fibres scintillantes lues par des photomultiplicateurs multianodes pour mesure précise de l'énergie des électrons et photons et pour leur identification. RICH : Imageur à focalisation de proximité avec radiateurs d'aerogel et de fluorure de sodium, avec photomultiplicateurs multianodes , optimisé pour l'identification des isotopes et des éléments nucléaires.
Calendrier proposé	2000 - 2005 : Réalisation des parties de l'instrument ; 2005-2006 : Intégration au CERN et tests au CERN et ESA (vide/thermique) ; 2007 : Lancement depuis Cape Canaveral:
Remarques	Durée de prises de données entre 3 et 5 ans. La faisabilité a été démontrée par le vol précurseur(1998) d'AMS01 qui a donné à 7 publications de physique dont un Physics Report. Centres d'opérations (POCC) et scientifiques (SOC) installés au CERN.

EUSO	
Buts scientifiques	Etude des processus les plus énergétiques de notre univers à travers la détection et l'analyse de la composante la plus énergétique des rayons cosmiques ($E \geq 5.10^{19}$ eV) observables lors de leur interaction avec l'atmosphère terrestre. Exploration de la voie potentiellement très prometteuse de l'astronomie neutrino. Cette mission pionnière permettra un gain d'un ordre de grandeur sur la statistique attendue pour les événements d'énergie supérieure à 10^{20} eV par rapport à une expérience au sol tel que AUGER.
Classe de mission	Instrument sur la station spatiale internationale.
Orbite	Orbite basse sur la station spatiale internationale
Description	Détection de la lumière de fluorescence et de la lumière Tcherenkov émises suite à l'interaction du rayon cosmique avec l'atmosphère. Télescope de 2.5 m de diamètre, constitué d'un couple de lentilles de Fresnel, fonctionnant dans l'UV (330-400 nm) avec un champ de vue de 60°. Détecteur de 200 000 pixels réalisés par des PM multi-anodes couvrant chacun au niveau de la Terre une surface inférieure à 1 km ² .
Collaboration	EUROPE (ESA, Italie (PI) , France, Allemagne, Portugal, Suisse), Japon, (Riken, Jaxa), USA (NASA),
Laboratoire Français	IN2P3 : LAPP, LPSC, , PCC/APC Tolbiac ; INSU-OdP, LPTHE, LAPTH
Participation française	Responsabilité (Conception et réalisation) de l'électronique analogique « Front-end » et de la structure mécanique du support du plan focal. Participation à la conception, réalisation et au test des macrocellules regroupant plusieurs PM. En charge des études concernant la modélisation de l'atmosphère et le plan focal du détecteur
Coût de la partie française	Total CNES pris en compte : 7-10M€, suivant les responsabilités prises par EUSO_France.
Particularités technologiques	Fabrication d'électronique intégrée de type ASIC avec technologie submicronique à très basse consommation.
Calendrier proposé	En fin de phase A à l'ESA. Projet accepté aux USA, au Japon et aussi par la Suisse et le Portugal. La mise en service est prévue en 2010. Le calendrier réel dépend des moyens d'accès à la station spatiale: Navette, ATV,...
Remarques	Le groupe de travail du CNES a soulevé deux questions: - Faut-il attendre les résultats de AUGER pour décider le financement de EUSO ? - L'avenir de l'ISS pose-t-il des problèmes à ce projet ? Concernant l'attente des résultats de Auger: la coupure GZK sera-t-elle observée ? La coupure GZK 'standard' est déterminée selon certaines hypothèses de distribution de sources, de l'indice spectrale, de la déflexion magnétique et pour une composante purement protonique. La réalité pourrait se révéler plus complexe. Dans le cas le plus défavorable d'une coupure GZK, seul EUSO aura une statistique suffisante pour permettre une détermination correcte du

spectre global des rayons cosmiques à ces énergies. Dans le cas contraire où l'expérience AGASA avec une statistique plus importante que HIRES aurait raison, EUSO, avec quelques milliers d'événements permettra une détermination précise du spectre global des rayons cosmiques à ces énergies, de la distribution de leur direction d'arrivée, l'identification et le dénombrement des sources compactes si elles existent ainsi que la mesure de leurs spectres individuels.

L'expérience EUSO permettra aussi d'accéder à d'autres domaines de physique : météorites, phénomène électrostatique (Blue Jets, Sprites...) dans la haute atmosphère, étude des nuages sub-visibles,...

Soulignons enfin que EUSO est une expérience pionnière de rayons cosmiques d'ultra haute énergie à partir de l'espace. Un gain d'un autre ordre de grandeur pourrait être obtenu avec par exemple un ensemble de 2 ou 3 télescopes améliorés et mis en orbite à une altitude de 800 km.

Dans le cas où EUSO serait approuvé par l'ESA, la question posée est celle de la participation de la France à cette expérience innovante.

Concernant l'ISS:

La construction de l'ISS se poursuivra conformément aux engagements internationaux. Les vols des navettes doivent se terminer vers 2010.

Le problème posé est donc celui de l'accès à l'ISS après 2010. Il est difficile d'imaginer qu'après sa construction, l'ISS soit laissée sans "ravitailleurs" de grande dimension. D'autres moyens que la Navette seront nécessairement disponibles (ATV...)

1.1 Rayons gamma

En cours

GLAST	
Buts scientifiques	Astronomie gamma de haute énergie. Carte du ciel gamma 20 MeV-300 GeV et alertes rapides au sol pour les sursauts γ et pour les sources transitoires $E > 20$ keV, études des AGN, formation des galaxies, fond diffus intergalactique, accélération et propagation des rayons cosmiques, restes de supernovae, pulsars, binaires galactiques, sources non identifiées d'EGRET, émission interstellaire, sursauts gamma, éruptions solaires, matière noire, etc. ...
Classe de mission	Mission moyenne NASA, participation DOE
Description	Mission comprenant un "Gamma-ray Burst Monitor" et un "Large Area Telescope" (LAT). Le LAT est un détecteur à grand champ de vue (2.5 sr) utilisant la création de paire e^+e^- . Il est constitué de 3 sous-ensembles : un trajectographe Silicium, un calorimètre électromagnétique en cristaux de CsI(Tl) et un bouclier anti-coïncidence.
Collaboration	Pour la partie LAT de GLAST : Stanford University, SU-HEPL SLAC Stanford Linear Accelerator Center, GSFC Ohio SU, U. California Santa Cruz, Sonoma SU, U. Washington, Texas A&M University, University of Tokyo, ICRR, Hiroshima University INFN, University of Bari, University of Padova, University of Perugia, University of Pisa, University of Rome 2, University of Trieste, University of Udine, CEA/DAPNIA, IN2P3, KTH Royal Institute of Technology Stockholm, Stockholms Universitet
Laboratoires Français	IN2P3, LLR Laboratoire Leprince-Ringuet, Centre d'Études Nucléaires de Bordeaux Gradignan, Collège de France PCC, CEA/DAPNIA/Service d'Astrophysique, CEA/DAPNIA/SEDI + scientifiques associés au CEA/DAPNIA, CESR Toulouse, U. Grenoble, GAM Montpellier
Participation française	IN2P3 : Conception, développement, validation du concept de calorimètre (Phase A), modélisation thermique et structurale des calorimètres, construction et test des structures mécaniques des calorimètres, outillage d'intégration (LLR). CEA/DAPNIA : conception, développement, validation des assemblages de cristaux-détecteurs du calorimètre (cristaux+photodiodes) en phase A ; développement et validation d'outils de production du catalogue des sources et d'identification des sources, production du catalogue à 1+2+5 ans d'observation Caractérisation des Calorimètres sous faisceau d'ions lourds (CENBG) et au CERN (IN2P3+CEA). Participation à : Intégration et test calorimètres et télescope, calibration en orbite, Software calorimètre, génération de données MC, développement d'outils scientifiques, définition formats de données. Site miroir des données
Coût de la partie française	2000-2008 : 8ME IN2P3 dont 340 k€ CNES CEA()
Calendrier	2004 : construction test et livraison des calorimètres, Intégration Calorimètres au NRL 2004-2005 : Intégration au SLAC

	2/2007 : mise en orbite. 2007-2012 : 5 ans de prises de données 2012-2017 : extension possible du vol
Remarques	Mission initialement CEA-CNRS/IN2P3 co-financée par le CNES. Retrait du CNES en 2003. Le CNRS/IN2P3 reste impliqué dans la construction. Instrument aux fortes capacités de découvertes dans de nombreux domaines : grand nombre et grande variété de sources potentielles. Position privilégiée de la France, aussi engagée dans HESS, INTEGRAL, XMM ...

HESS	
Buts Scientifiques:	HESS (High Energy Stereoscopic System) a pour but la détection des rayons gamma de 100 GeV à 100 TeV pour permettre l'étude des phénomènes cosmiques de haute énergie à la fois dans notre galaxie (Restes de Supernova, Pulsars, Microquasars, Binaires, Centre Galactique, émission diffuse) et extragalactiques (Noyaux Actifs de Galaxies, Radiogalaxies, GRBs).
Description	L'expérience HESS est un réseau de quatre télescopes dotés d'un miroir de 12 m de diamètre et d'une focale de 15m. Il utilise la technique de détection par Imagerie Tcherenkov Atmosphérique Stéréoscopique. La détection de la lumière Tcherenkov s'effectue dans le plan focal de chaque télescope par l'intermédiaire de photomultiplicateurs (PMs) rapides (960 par caméra). Nous profitons au maximum de la rapidité des signaux en utilisant une électronique rapide et intégrée à la focale du système optique. Cette électronique est la responsabilité de la partie française de la collaboration Les performances sont - un seuil bas de ~100 GeV au zénith - une résolution angulaire de ~0.08 degrés (photon par photon) - une résolution en énergie (photon par photon) de ~15% - une sensibilité de 10 millicrabes pour une détection de 5 sigma en 50 heures
Collaboration	La collaboration HESS rassemble des partenaires d'Allemagne, de France, d'Angleterre, de Tchéquie, d'Afrique du Sud et de Namibie (le pays qui héberge le projet).
Laboratoires Français	LLR, Ecole Polytechnique, LPNHE, Universités Paris VI & VII, PCC, Collège de France, GAM, Montpellier, CEA, Saclay, CESR, Toulouse, LAOG, Grenoble, Observatoire de Paris
Participation Française	Le coût de la participation Française (construction, test, et installation des quatre caméras) s'est élève à 1,54 MEuros HT, hors salaires, avec un soutien technique de 25,4 Homme-Ans (Ingénieur) et 11,2 Homme-Ans (Technicien) Le coût total (international) de l'expérience est 7,6 MEuros HT
Calendrier proposé	L'installation a débuté en Juin 2002 et prend des données depuis. L'expérience vient d'être complétée avec l'installation d'une quatrième caméra sur son télescope en Décembre 2003 L'expérience tourne à pleine sensibilité depuis le début 2004. Nous avons déjà plusieurs détections à notre actif, par exemple la nébuleuse du Crabe, le Noyau Actif de Galaxie PKS2155-304, et le système binaire PSRB1259-63/SS2883. L'expérience HESS est actuellement l'expérience la plus sensible du domaine.
Remarques	

HESS II	
Buts Scientifiques:	HESS-II (High Energy Stereoscopic System, phase II) a pour but la détection des rayons gamma de 30 GeV à 100 TeV pour permettre l'étude des phénomènes cosmiques de haute énergie à la fois dans notre galaxie (Restes de Supernova, Pulsars, Microquasars, Binaires, Centre Galactique, émission diffuse) et extragalactiques (Noyaux Actifs de Galaxies, Radiogalaxies, GRB) avec une sensibilité accrue par rapport à la phase I, et une extension de la gamme en énergie vers les basses énergies, pour avoir le maximum de recouvrement avec le futur satellite Gamma GLAST.
Description	HESS-II est un projet pour implanter un très grand télescope Tcherenkov (~30m de diamètre et 35m de focal) entre les quatre télescopes actuels de l'expérience HESS, avec une caméra dont la pixelisation est deux fois plus fine (~2000 PMs) pour améliorer la qualité des images et par conséquent la reconstruction des paramètres du gamma initial. Le but est d'augmenter la sensibilité de l'ensemble d'un facteur ~2 dans le régime où opèrent les télescopes de la phase I, tout en baissant le seuil de détection (vers 30-50 GeV) à l'aide du grand télescope seul.
Collaboration	La collaboration HESS rassemble des partenaires d'Allemagne, de France, d'Angleterre, de Tchèque, d'Afrique du Sud et de Namibie (le pays qui héberge le projet), et forme la base de la collaboration HESS-II. D'autres partenaires sont en cours de discussion
Laboratoires Français	LLR, Ecole Polytechnique, LPNHE, Universités Paris VI & VII, PCC, Collège de France, GAM, Montpellier, CEA, Saclay, CESR, Toulouse, LAOG, Grenoble, Observatoire de Paris
Participation française	Le coût de la participation Française, s'il se limite à la construction, test, et installation de la grande caméra (mais incluant les PMs) sera de l'ordre 1,4-1,6 MEuros HT hors salaires. Nous souhaitons augmenter notre participation à l'expérience, dont le coût totale est de ~8 MEuros.
Calendrier propose	2004: Une année d'R&D 2005-2007: Construction et tests, Installation 2008: Début de l'opération
Remarques	Voir fiche pour HESS-I

1.2 Rayons X

MAX	
Buts scientifiques	<p>Etude des supernovae de type Ia par la mesure des intensités, profils et formes de leurs raies gamma nucléaires ; étude des sources émettrices dans la raie à 511 keV d'annihilation e^+e^-.</p> <p>La détection et l'étude des raies gamma nucléaire en provenance des SNIa permettront de contraindre les modèles d'explosion et de déterminer dans quelle mesure ces objets peuvent être utilisés comme chandelle standard pour mesurer l'Univers.</p>
Classe de mission	Vol en formation
Orbite	Orbite circulaire 3 jours, inclinaison 40° - 50°
Description	<p>Vol en formation de deux satellites :</p> <p>Un satellite « focalisateur » portant une lentille gamma de type diffraction de Laue de 2 m de diamètre, sur une plate-forme de type PROTEUS.</p> <p>Un satellite « plan focal » portant un détecteur permettant la spectroscopie fine dans les deux bandes passantes de la lentille (450–540 keV et 800–900 keV).</p>
Collaboration	Italie, Allemagne, Suisse, Espagne, USA
Laboratoire Français	CESR-Toulouse (PI), CEA-Saclay, LAM, IAP, ILL, IN2P3
Participation française	<p>Maîtrise d'œuvre de l'ensemble de la mission.</p> <p>Etude et réalisation du détecteur</p> <p>Etude et réalisation de la lentille gamma</p>
Coût de la partie française	Total CNES pris en compte : 185 M€.
Particularités technologiques	Vol en formation : distance 86 m, précision de positionnement ± 10 cm en longitudinal et de ± 1 cm en latéral.
Calendrier proposé	<p>Début Phase A 2005</p> <p>Réalisation 2006-2009</p> <p>Lancement 2010</p>
Remarques	La faisabilité de MAX a été démontrée par des vols ballon et des mesures au sol.

ECLAIRs	
Buts scientifiques	ECLAIRs a pour ambition de capter et de caractériser l'émission prompte des sursauts gamma tant dans le visible que dans les domaines des rayons X et gamma. Observant simultanément le même champ dans ces trois gammes d'énergie, ECLAIRs sera en mesure d'observer tant les précurseurs que l'émission X et visible depuis le début du sursaut.
Classe de mission	Micro-satellite
Orbite	Orbite basse terrestre
Description	Cette mission, proposée dans le cadre de la filière microsatellite du CNES, embarquera deux instruments à grand champ permettant le suivi temporel dans trois bandes de longueur d'ondes simultanées : - un télescope X-gamma à masque codé utilisant des détecteurs CdTe dérivés de ceux d'INTEGRAL/IBIS - un ensemble de cameras CCD en visible
Collaboration	
Laboratoire Français	CEA-Saclay (PI), CESR, LAM, OHP, IAP
Participation française	Maîtrise d'œuvre de l'ensemble de la mission Développement et réalisation des caméras X-gamma et visible Développement et réalisation de l'unité de gestion de bord.
Coût de la partie française	total partie française pour le CNES : 18 M€
Particularités technologiques	Nécessite un processeur intelligent à bord capable d'obtenir instantanément la position du sursaut dans l'image X-gamma et de sélectionner dans les images la portion de données à transmettre au sol. En disposant à bord de capacité de mémoire adaptée, l'objectif est de remonter dans le temps pour détecter le précurseur du sursaut gamma dans les bandes visibles et X.
Calendrier proposé	Début Phase A 2004 Réalisation 2005-2007 Lancement 2008
Remarques	Détecteurs déjà développés dans le cadre d'INTEGRAL, ROSETTA, COROT Opérant simultanément avec GLAST, ECLAIRs sera le complément indispensable de cette mission pour la couverture spectrale des sursauts gamma. ECLAIRs n'a pour l'instant pas de concurrents.

SIMBOL-X	
Buts scientifiques	<p>Télescope X couvrant par une seule instrumentation continue une gamme d'énergie s'étendant des X classiques aux X durs-□ mous, et offrant une résolution angulaire sans précédent (< 30 arcsec) au-delà de 10 keV et jusqu'à 70 keV, domaine de transition entre l'émission thermique et non thermique dans les objets compacts comme dans les structures plus diffuses (amas, chocs interstellaires).</p> <p>Avec son gain d'environ deux ordres de grandeur en sensibilité et en résolution angulaire par rapport aux télescopes opérant dans les X durs, sa gamme large (de 0.5 à 70 keV), et son excellente efficacité et résolution spectrale au niveau de la raie du fer, Simbol-X permettra entre autres :</p> <ul style="list-style-type: none"> • d'élucider les processus dynamiques d'accrétion et d'éjection en champ gravitationnel fort, autour des trous noirs : trous noirs de masse stellaire (avec pour la première fois l'observation de ceux des galaxies du groupe local), ou hypermassifs (AGN, mais aussi les noyaux silencieux comme le trou noir central de notre Galaxie SgrA*) • d'élucider les processus d'accélération et leurs limites, avec pour la première fois ceux à l'œuvre dans les jets de quasars et microquasars. • de résoudre le fond diffus X au-delà de 20 keV, là où il est le plus intense.
Classe de mission	Mini-satellite
Orbite	Orbite circulaire terrestre, à 81,500 km, période 3 jours
Description	<p>Vol en formation de deux satellites.</p> <p>Un satellite « focalisateur » portant une optique à miroirs en incidence rasante offrant la même résolution angulaire qu'XMM, mais restant efficace jusqu'à 70 keV. Le module miroir est à la charge de l'Italie, le satellite pourrait aussi l'être.</p> <p>Un satellite « détecteur » portant un ensemble de détection permettant l'imagerie et la spectroscopie basse résolution entre 0.5 keV et 70 keV. Le plan focal sera composé de deux détecteurs superposés : un silicium APS pixellisé couplé à un détecteur pixellisé à base de CdZnTe, le tout fonctionnant à température ambiante.</p> <p>Les deux satellites sont dédiés, mais utilisent des équipements existant ou déjà qualifiés.</p>
Collaboration	<p>Italie (observatoire Brera) pour le module optique, et peut-être le satellite focalisateur,</p> <p>Allemagne (MPE Garching) pour le détecteur silicium APS</p>
Laboratoire Français	<p>CEA-Saclay (PI) et CESR pour le hardware.</p> <p>Autres collaborateurs (et potentiellement segment sol) : Observatoires de Meudon, Laboratoire d'Astrophysique de Grenoble, APC-Tolbiac.</p>
Participation française	<p>Maîtrise d'œuvre de l'ensemble de la mission.</p> <p>Maîtrise d'œuvre du plan focal, développement et réalisation de la partie haute énergie (CdZnTe).</p>
Coût de la partie française	<p>Ensemble de la charge utile partie française : une centaine d'homme/an et 10 M€ de matière.</p> <p>SIMBOL-X est présenté dans le cadre de l'appel à idées du CNES pour le vol en formation. Le CNES a prévu de mettre une somme de 200 M€ sur un tel projet, budget qui couvre le coût total de la mission SIMBOL-X (y compris les parties étrangères des charges utiles).</p>
Particularités technologiques	<p>Vol en formation : distance 30 m, précision 1cm³, reconstitution 1 mm³.</p> <p>Plan focal à deux composantes : APS Silicium et CdZnTe à température ambiante.</p> <p>Miroirs avec efficacité à haute énergie.</p>

Calendrier proposé	<p>Une pré-étude de faisabilité a été menée par le CNES en 2003</p> <p>Début Phase A 2005</p> <p>Réalisation 2007-2010</p> <p>Lancement 2011</p>
Remarques	<p>Premier télescope focalisateur au delà de 10 keV, garantissant une révolution de l'astronomie en X-durs, SIMBOL-X est un excellent démonstrateur scientifique d'une mission avec vol en formation.</p> <p>Il participe informellement à la logique de préparation de la mission XEUS, et des autres grandes missions de vol en formation en Europe. S'il est réalisé dans des délais raisonnables, avant 2012, SIMBOL-X pourrait ainsi bénéficier du soutien de l'ESA dans le cadre de la préparation des missions XEUS et DARWIN.</p>

XEUS	
Buts scientifiques	Observatoire X généraliste, à très grande surface collectrice et résolution spectrale, permettant en particulier l'étude des premiers trous noirs et des premiers amas. Le gain en sensibilité devrait être un facteur 200 par rapport à XMM La résolution angulaire devrait être meilleure que 5 arcsec.
Classe de mission	Observatoire ESA, financement à hauteur d'une pierre angulaire
Orbite	Orbite basse terrestre indispensable, avec service sur la Station Spatiale Internationale
Description	Vol en formation de deux satellites : Un satellite « focalisateur » portant des miroirs montés en 2 temps. La partie centrale est intégrée au sol. La partie externe est montée par des robots sur la Station Spatiale Internationale. Un satellite « détecteur » portant un ensemble de détection permettant l'imagerie et la spectroscopie entre 0.1 keV et 20 keV. Il y aura deux satellites instruments : le premier sera utilisé dans la première configuration du télescope avec seulement les miroirs centraux, le deuxième sera lancé ultérieurement, une fois que les couronnes externes des miroirs auront été installées. Les plans focaux seront composés de plusieurs types de détecteurs : bolomètres, silicium APS pixellisé ou CCD, STJ, ...qui nécessitent encore de nombreuses R&T.
Collaboration	XEUS est beaucoup poussé par l'Allemagne, l'Italie, le Royaume Uni et les Pays bas
Laboratoire Français	CEA-Saclay, Observatoire de Strasbourg, CESR, plus d'autres à définir
Participation française	Possibilité de prise en charge d'une caméra de spectro-imagerie à base de bolomètres Proposition existante pour l'incorporation d'un mode TIMING dans la caméra
Coût de la partie française	Total pris en compte pour le CNES 30 M €. Pour le plan focal, une centaine d'hommes/an pour la main d'œuvre et 10 M€ pour la matière.
Particularités technologiques	Vol en formation : distance 50 m, précision 1 mm ³ . Plans focaux de types nouveaux, cryogénie active sub-kelvin pour les bolomètres (0.01K)
Calendrier proposé	Début Phase A 2005-2006 Réalisation 2007-2012 pour la phase 1, 2012-2014 pour la phase 2 Lancement > 2014 phase 1, > 2015 phase 2
Remarques	Les USA ont un projet d'observatoire X de nouvelle génération, CONSTELLATION X. C'est simplement une multiplication de satellites assez similaires à CHANDRA. Il pourrait y en avoir 4 ou 5. Les gains en résolution spatiale et en sensibilité sont beaucoup moins importants que pour XEUS.

1.3 Neutrinos

En cours

ANTARES	
Buts scientifiques	Astronomie avec des neutrinos de haute energie ($> \sim 25 \text{ GeV}$): diffuse, microquasars, blazars, AGNs, GRBs... Recherche indirecte de la matière noire dans le centre du soleil, terre, galaxie
Description	Maille de 900 photomultiplicateurs (12 lignes) a une profondeur de 2475m dans la mer Méditerranée près de Toulon. Détection de lumière Cherenkov des muons (et électrons) produit par les interactions neutrino. Surface effective de $\sim 0.1 \text{ km}^2$.
Collaboration	France, Italie, Pays-bas, Espagne, Allemagne, Royaume-Uni, Russie
Laboratoires Français	Centre de Physique des Particules de Marseille (CPPM), CEA-Saclay, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM), Strasbourg (IReS), Mulhouse, IFREMER, Centre Océanologie de Marseille (COM), GeoScience Azur (Villefranche-sur-Mer)
Participation française	Coordination du projet Développement des mécaniques, électroniques et acoustiques Evaluation des sites Assemblage et déploiement des lignes
Coût de la partie française	Coût total $\sim 20 \text{ M€}$. 2.3M€ IN2P3, 2.3M€ CEA
Particularités technologiques	Milieu hostile a grande profondeur Photomultiplicateurs de grand taille Engin sous-marin pour la connexion des lignes Grand taux des données ($\sim 1 \text{ Gbit/s}$) utilisant des fibres optiques DWDM.
Calendrier proposé	Réalisation 2004-2006 Exploitation ~ 5 ans
Remarques	ANTARES regard l'hémisphère sud, donc peut voir le centre galactique. Complémentaire a l'expérience AMANDA au pole sud, qui regard l'hémisphère Nord. La résolution angulaire d'ANTARES est dix fois meilleures que AMANDA a haute energie. Grand potentiel d'interdisciplinarité pour les études océanographique et biologique. Premier pas vers un detecteur plus grand (KM3NeT)

Futur

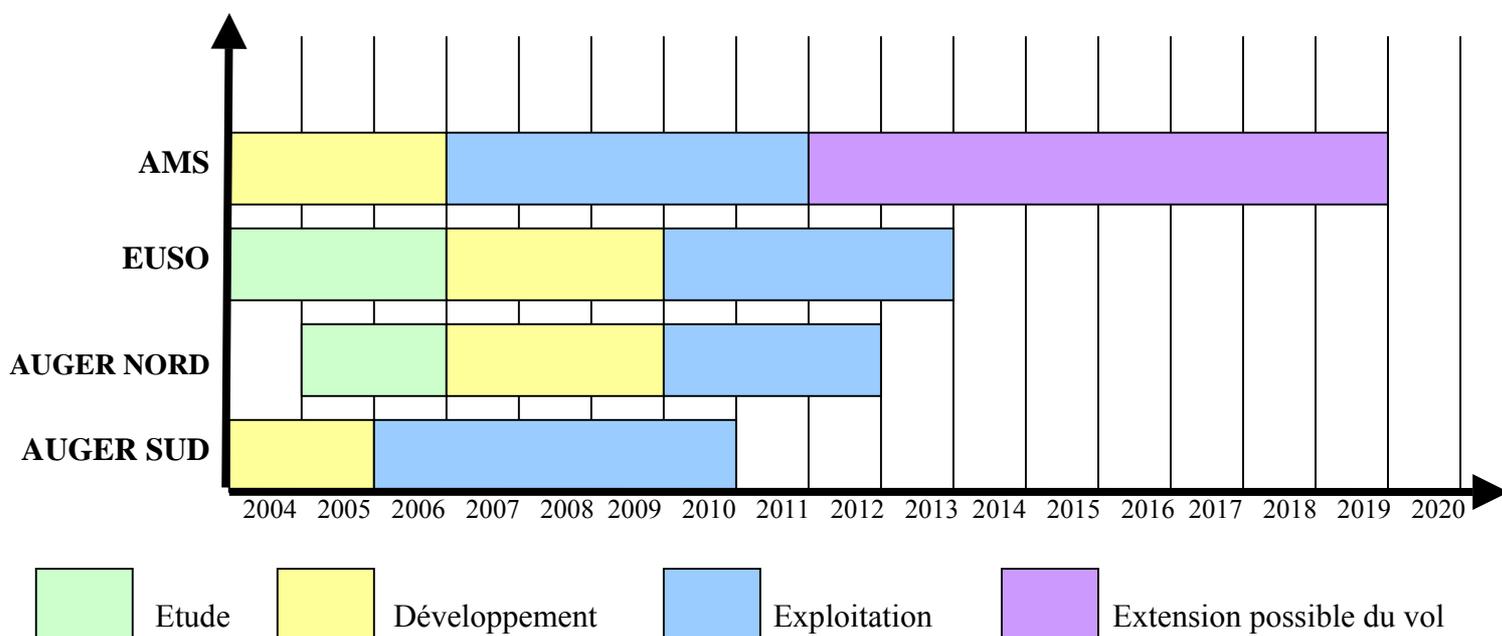
Km3NeT	
Buts scientifiques	Astronomie avec des neutrinos de haute energie ($> \sim 100 \text{ GeV}$): diffuse, microquasars, blazars, AGNs, GRBs... Recherche indirecte de la matière noire dans le centre du soleil, terre, galaxie Facilite pour des études océanographiques a grande profondeur
Description	Maille de plusieurs milles photomultiplicateurs dans la mer Méditerranée. Détection de lumière Cherenkov des muons (électron et tau) produit par les interactions neutrino. Successeur à l'expérience ANTARES, surface effective $> 1 \text{ km}^2$
Collaboration	France, Italie, Pays-bas, Espagne, Russie, Allemagne, Royaume-Uni, Grèce, Chypre (combinaison des collaborations ANTARES, NESTOR, NEMO)
Laboratoires Français	Centre de Physique des Particules de Marseille (CPPM), CEA-Saclay, Strasbourg (IReS), Mulhouse,

	IFREMER, Centre Océanologie de Marseille (COM), GeoScience Azur (Villefranche-sur-Mer)
Participation française	Analyses physiques, simulation Développement des mécaniques, électroniques et acoustiques Assemblage et déploiement des lignes
Coût de la partie française	Coût total ~200 M€. Contribution française a défini
Particularités technologiques	Milieu hostile a grande profondeur Photomultiplicateurs de grand taille Engin sous-marin pour connecte les lignes Grand taux des données (~1Gbit/s) utilisant des fibres optiques DWDM.
Calendrier proposé	Etudes de conception 2004-2007 Réalisation 2007-2011 Exploitation ~10ans
Remarques	Demande soumettre mars 2004 à la UE (FP6) pour financement d'un 'design study' Site à choisir entre France, Italie, Grèce Regarde l'hémisphère sud, donc peut voir le centre galactique. Complémentaire à l'expérience ICECUBE, qui regard l'hémisphère Nord (prêt ~2010) Grand potentiel d'interdisciplinarité pour les études océanographique et biologique.

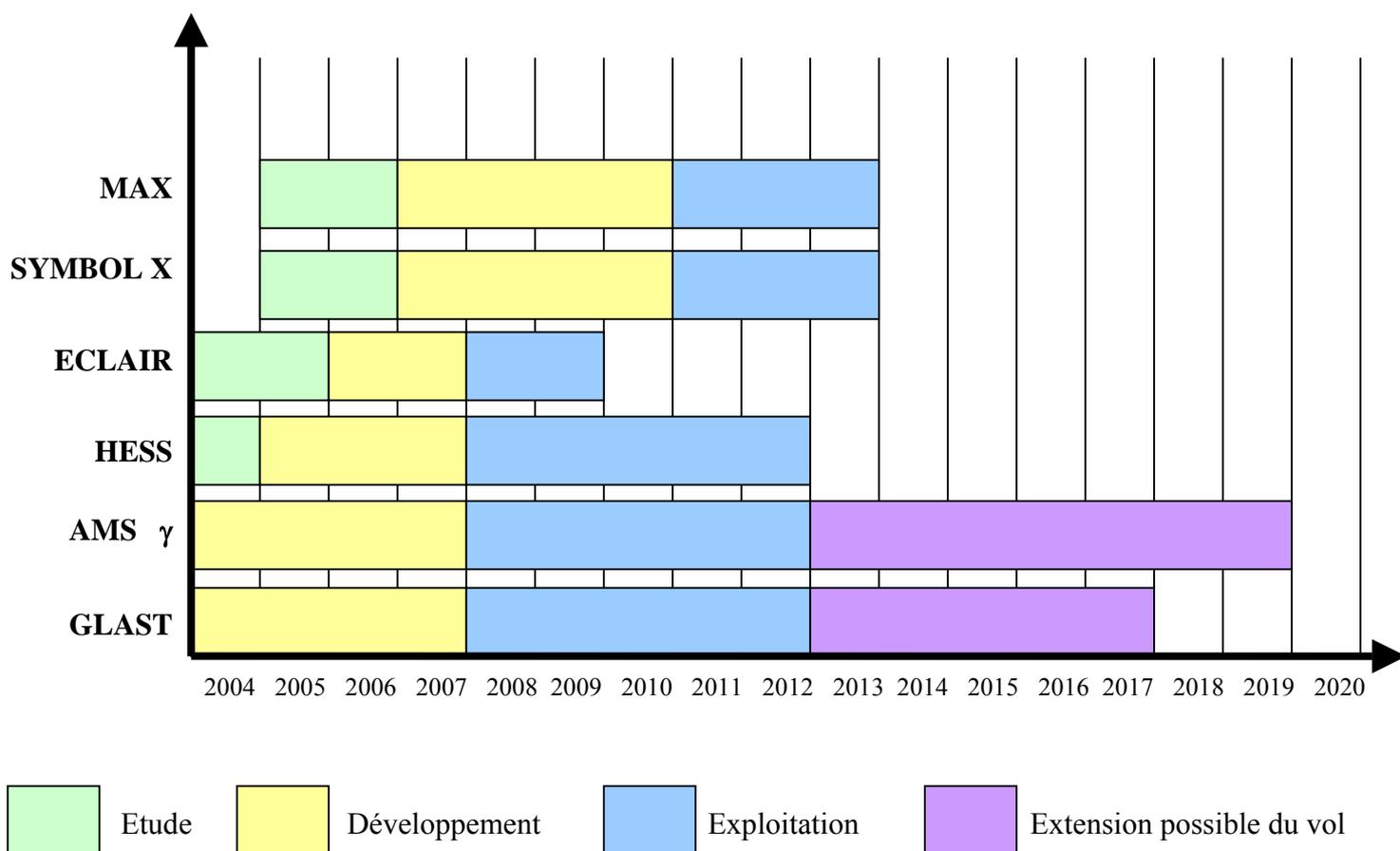
V

DIAGRAMMES TEMPORELS DES PROJETS

RAYONS COSMIQUES HE ET UHE



RAYONS X ET GAMMAS



NEUTRINOS

