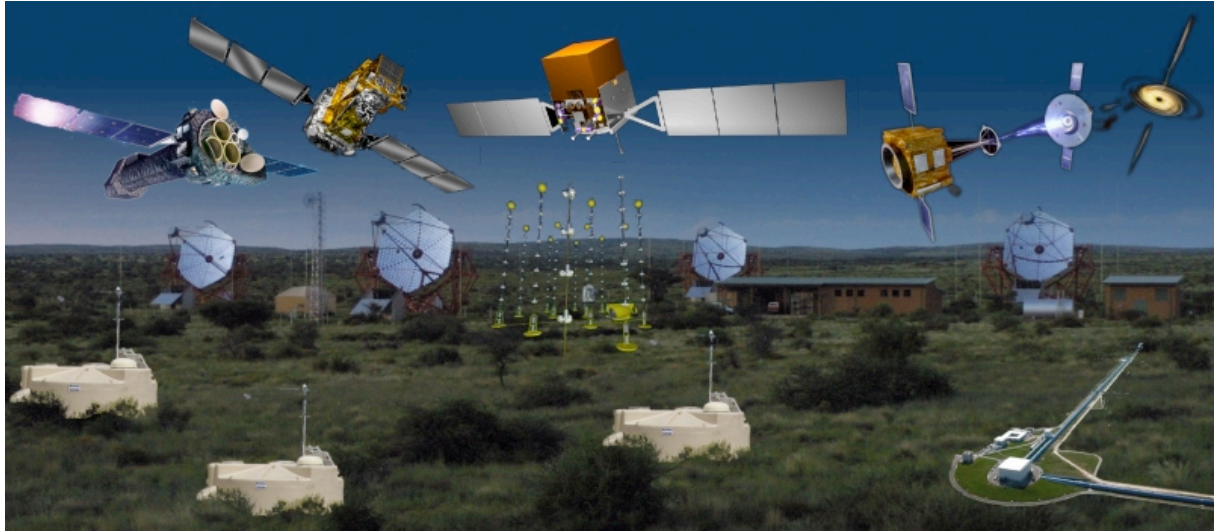


Prospective du GdR PCHE 2010 – 2015



Version finale (20 mai 2010)

Texte rédigé par :

**Denis Allard, Matteo Barsuglia, Didier Barret, John Carr, Paschal Coyle,
Frédéric Daigne, Guillaume Dubus, Berrie Giebels, Jürgen Knödlseher,
Alexandre Marcowith, Jérôme Novak, Patrick Peter, Delphine Porquet,
Thierry Pradier, Sylvie Rosier-Lees**

1	<u>INTRODUCTION.....</u>	4
2	<u>FAITS SAILLANTS</u>	6
3	<u>THÉMATIQUES SCIENTIFIQUES & ÉVOLUTIONS.....</u>	9
3.1	L'UNIVERS COMME LABORATOIRE	9
3.1.1	CONTEXTE ET QUESTIONS MAJEURES.....	9
3.1.2	GRAVITATION EN CHAMP FORT	9
3.1.3	GRAVITÉ QUANTIQUE ET INVARIANCE DE LORENTZ.....	10
3.1.4	L'ÉQUATION D'ÉTAT DE LA MATIÈRE ULTRA DENSE.....	11
3.1.5	PHYSIQUE EN CHAMPS MAGNÉTIQUES EXTRÊMES.....	12
3.1.6	LA NATURE DE LA MATIÈRE NOIRE.....	12
3.1.7	L'ANTIMATIÈRE DANS L'UNIVERS	12
3.2	OBJETS COMPACTS ET LEURS ENVIRONNEMENTS	13
3.2.1	CONTEXTE ET QUESTIONS MAJEURES.....	13
3.2.2	PHYSIQUE DES FLOTS D'ACCRÉTION.....	14
3.2.3	JETS RELATIVISTES ET ACCÉLÉRATION DE PARTICULES	16
3.2.4	PHYSIQUE DES OBJETS FORTEMENT MAGNÉTISÉS	18
3.2.5	ÉVOLUTION ET RÉTROACTION DE L'ACTIVITÉ DES TROUS NOIRS	19
3.3	PHÉNOMÈNES EXPLOSIFS.....	21
3.3.1	CONTEXTE ET QUESTIONS MAJEURES.....	21
3.3.2	LA PHYSIQUE DES EXPLOSIONS STELLAIRES.....	22
3.3.3	LA NUCLÉOSYNTÈSE EXPLOSIVE.....	25
3.3.4	LES EXPLOSIONS STELLAIRES COMME SOURCES DE RAYONNEMENT NON PHOTONIQUE.....	25
3.3.5	LES EXPLOSIONS STELLAIRES COMME TRACEURS COSMOLOGIQUES	26
3.4	RAYONS COSMIQUES	27
3.4.1	CONTEXTE ET QUESTIONS MAJEURES.....	27
3.4.2	RAYONS COSMIQUES GALACTIQUES	28
3.4.3	RAYONS COSMIQUES D'ULTRA HAUTE ÉNERGIE.....	29
3.4.4	RAYONS COSMIQUES DE BASSE ÉNERGIE	31
3.4.5	MÉCANISMES D'ACCÉLÉRATION	31
3.5	NOUVEAUX MESSAGERS.....	33
3.5.1	CONTEXTE	33
3.5.2	ONDES GRAVITATIONNELLES	33
3.5.3	ASTRONOMIE DES NEUTRINOS DE HAUTE ÉNERGIE	36
4	<u>MOYENS.....</u>	40
4.1	CONTEXTE	40
4.2	ÉVOLUTIONS & DÉVELOPPEMENTS INSTRUMENTAUX.....	40
4.2.1	ASTRONOMIE X	40
4.2.2	ASTRONOMIE GAMMA.....	41
4.2.3	DÉTECTION DES RAYONS COSMIQUES	41
4.2.4	DÉTECTION DES NEUTRINOS DE HAUTE ÉNERGIE	42
4.2.5	DÉTECTION DES ONDES GRAVITATIONNELLES	42
4.2.6	MOYENS D'ACCOMPAGNEMENT.....	42

5	<u>LIENS THÉMATIQUES</u>	<u>44</u>
6	<u>RECOMMANDATIONS.....</u>	<u>45</u>
6.1	RECOMMANDATIONS STRUCTURELLES.....	45
6.2	RECOMMANDATIONS SUR LES MOYENS	45
6.3	RECOMMANDATIONS SCIENTIFIQUES.....	47

1 Introduction

L'astrophysique des hautes énergies est par essence un domaine interdisciplinaire. Son début est marqué par la découverte des rayons cosmiques par Victor Hess en 1912, et pendant longtemps ce rayonnement relativiste naturel a servi comme laboratoire pour les physiciens des particules qui ont découvert dans les produits secondaires de ce rayonnement le muon, le positron et le pion. L'accès à l'espace à partir des années 1960 a permis la première détection des rayons X et gamma de sources célestes avec des détecteurs issus de la physique des particules ou de la physique nucléaire. Le domaine de l'astrophysique des hautes énergies a alors pris son plein essor. Parallèlement, les grands accélérateurs se sont imposés comme une source plus efficace de particules énergétiques pour la physique, et la plupart des physiciens des particules se sont désormais focalisés sur ces outils puissants. Pendant environ 30 ans, les communautés des physiciens des particules et d'astrophysiciens ont alors évolué presque indépendamment, avant que leurs chemins ne se recroisent fin 1990. Le domaine des astroparticules naquit alors pour répondre à certaines questions fondamentales posées en astrophysique, cosmologie et physique des particules.

Physique de particules, physique nucléaire et astrophysique des hautes énergies sont donc des domaines qui depuis longtemps ont des interfaces communes, et qui ont évolué parfois ensemble, parfois de manière séparée, mais qui se sont influencés mutuellement durant leurs histoires.

En France, la communauté « astrophysique des hautes énergies » s'est structurée depuis 2000 dans le Groupement de Recherche « Phénomènes Cosmiques de Haute Energie » (GdR PCHE) qui unit astrophysiciens observateurs et théoriciens et physiciens des particules du CNRS (INSU, IN2P3, INP) et du CEA (SAP, SPP). Aujourd'hui, cette communauté compte environ 320 membres, dont 38% appartenant à des laboratoires de l'INSU, 52% à des laboratoires de l'IN2P3, 2% à des laboratoires de l'INP et 8% au CEA (données issues de l'annuaire du GdR PCHE). Les thématiques couvertes par le GdR PCHE sont :

- Rayons cosmiques : origine, nature et propagation
- Phénomènes explosifs : novae, supernovae, hypernovae et sursauts gamma
- Objets compacts et leur environnement (accrétion, jets)
- Astrophysique nucléaire
- Détection indirecte de la matière noire
- Sources cosmiques des neutrinos de haute énergie
- Sources d'ondes gravitationnelles

Depuis la création du GdR PCHE le domaine de l'astrophysique des hautes énergies a considérablement évolué, grâce à l'investissement de la France dans de nouveaux moyens d'observations comme les télescopes XMM-Newton & INTEGRAL (rayons X et gamma mous), les télescopes HESS & Fermi (rayons gamma), l'observatoire Pierre Auger (rayons cosmiques), le détecteur Antares (neutrinos de haute énergie) et le détecteur Virgo (ondes gravitationnelles). Beaucoup de projets futurs s'inscrivent aujourd'hui dans des perspectives européennes comme ASTRONET pour l'astrophysique, ASPERA pour l'astroparticule, et Cosmic-Vision pour les observations spatiales et par conséquent, tout exercice de prospective doit prendre en compte les feuilles de route établies au niveau européen.

Parmi les questions fondamentales identifiées dans toutes ces feuilles de route figure la question des extrêmes de l'Univers : « Do we understand the extremes of the Universe ? » – comprenons nous les extrêmes de notre Univers ? Dans le domaine de l'astrophysique des hautes énergies cette interrogation implique les 5 grandes questions suivantes :

- Quelle est la nature de la matière noire ?
- Quelle est l'influence des objets compacts sur leur environnement ?
- Comment explosent les astres ?
- Quelle est l'origine des rayons cosmiques ?
- Que nous cache le ciel non-photonique ?

Répondre à ces questions représente un enjeu majeur pour le domaine. Pour ce faire, la communauté française s'appuie sur un éventail performant de moyens d'observation qui soit existent déjà, soit sont en phase de définition ou de construction. L'interprétation des observations s'appuie sur une activité de modélisation physique plus ou moins bien développée selon les domaines. La compréhension des phénomènes à haute énergie nécessite aussi de plus en plus des observations complémentaires à plus basse fréquence. L'observation multi-longueurs d'onde joue un rôle grandissant dans l'activité de la communauté.

2 Faits saillants

Le domaine de l'astrophysique des hautes énergies a connu ces dernières années des avancées importantes. Voici 4 d'entre elles auxquelles la communauté française a contribué de manière significative et qui semblent être les plus marquantes des cinq dernières années :

Le ciel gamma à très haute énergie dévoilé par HESS. Depuis ses premières observations en 2004, l'observatoire HESS dévoile un ciel gamma à très haute énergie d'une richesse insoupçonnée. En particulier, l'observation du plan galactique révèle une multitude de sources, dont beaucoup sont des nébuleuses de pulsars, quelques restes de supernovae, une binaire gamma et plusieurs sources sans contreparties visibles à plus basse énergie (nommées « accélérateurs noirs ») – voir Fig. 1. HESS a franchi le pas important d'une astronomie exploratoire (avec seulement quelques sources connues depuis plusieurs dizaines d'années) à une astrophysique mature, avec à la clé la compréhension des phénomènes d'accélération de particules dans l'Univers.

L'anisotropie des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie dévoilée par Auger. L'origine des rayons cosmiques reste une question centrale de l'astrophysique des hautes énergies. Généralement déviés par les champs magnétiques galactiques et intergalactiques, seuls les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie ($E > 5 \times 10^{19}$ eV) subissent si peu de déviation que leurs directions d'arrivée sur Terre indiquent éventuellement leurs sites d'accélération. Les premiers 27 événements avec des énergies supérieures à $5,7 \times 10^{19}$ eV enregistrés par l'observatoire Pierre Auger sont clairement distribués d'une manière anisotrope sur le ciel (voir Fig. 2). Cette anisotropie semble être corrélée avec la densité de la matière dans l'Univers local, qui est tracée par la distribution des noyaux actifs galactiques proches ($D < 75$ Mpc).

L'imagerie de l'annihilation électrons-positrons au centre de la Galaxie et la découverte de l'asymétrie du disque. Depuis les années 1980 on savait que les régions centrales de notre Galaxie sont le lieu d'une forte annihilation électrons-positrons, cependant la source des positrons reste toujours inconnue. Le spectromètre SPI à bord d'INTEGRAL a mis en évidence la forte concentration de l'émission d'annihilation à 511 keV vers le centre galactique et a pu cartographier l'émission du disque. Cette dernière se révèle asymétrique par rapport au centre galactique, avec un excès dans une région qui abrite un grand nombre de binaires X de faible masse (voir Fig. 3). Cette coïncidence suggère que ces dernières pourraient être des sources importantes de positrons galactiques.

La découverte des sursauts gamma à très grand redshift et la caractérisation de leur émission à très haute énergie. Les sursauts gamma, phénomènes extrêmement brillants mais aussi relativement brefs, ont été proposés depuis longtemps comme d'excellentes sondes potentielles de l'Univers lointain, mais jusqu'à récemment les distances mesurées ne pouvaient pas égaler celle des quasars ou des galaxies les plus distants. En 2005, grâce aux observations de sa rémanence découverte par TAROT, le sursaut GRB 050904 a été identifié comme ayant été émis à $z = 6,3$, rivalisant ainsi avec les objets connus les plus lointains. Et en avril 2009, la contrepartie du sursaut GRB 090424 a même été localisée à $z = 8,2$, ce qui en fait l'objet le plus distant jamais observé. Ces observations ouvrent la voie à l'étude de l'Univers lointain par l'intermédiaire des sursauts gamma, ce qui devrait permettre

dans l'avenir de mieux comprendre la formation des premières étoiles et des premières galaxies dans l'Univers. En même temps, le lancement de Fermi en 2008 a ouvert la voie à l'étude des sursauts gamma aux plus hautes énergies, ce qui a été brillamment illustré avec l'observation de GRB 080916C, le sursaut le plus lumineux jamais observé.

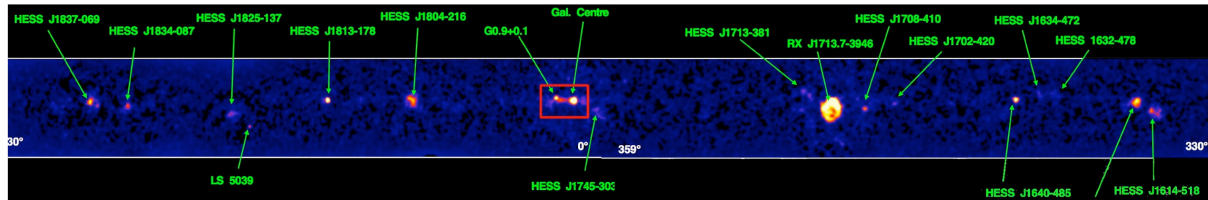


Fig. 1 : Image HESS de l'émission du plan galactique (Aharonian et al. 2005, Science, 307, 1839)

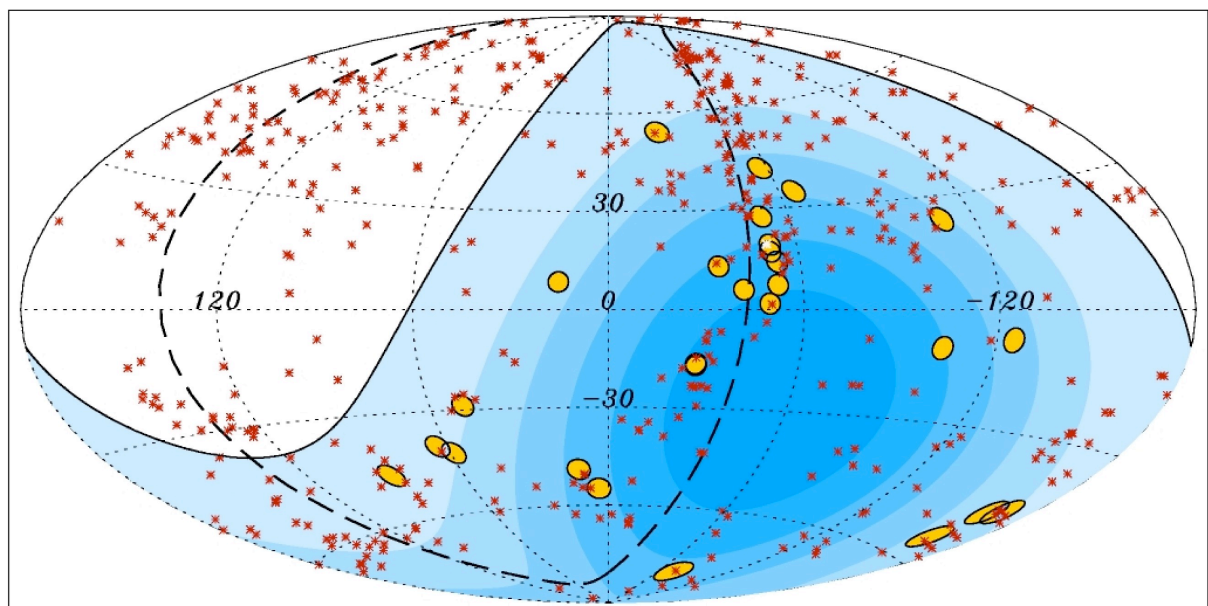


Fig. 2 : Carte du ciel en projection galactique montrant la direction d'arrivée des 27 rayons cosmiques d'ultra-haute énergie observés par Auger (en cercles jaunes) et la distribution des noyaux actifs galactiques proches ($D < 75$ Mpc ; en astérisques rouges). Le dégradé bleu indique l'exposition du ciel vu par Auger (Abraham et al. 2007, Science, 318, 938).

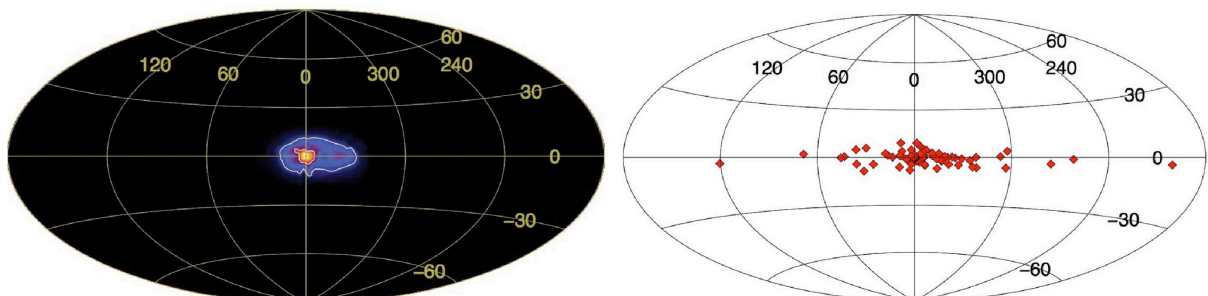


Fig. 3 : Carte du ciel dans la raie d'annihilation électron-positron à 511 keV observée avec INTEGRAL/SPI (gauche) et distribution des binaires X de faible masse observées en X-durs avec INTEGRAL/IBIS (droite). L'émission 511 keV du disque galactique montre une asymétrie comparable à celle des binaires X de faible masse (Weidenspointner et al. 2008, Nature, 451, 159).

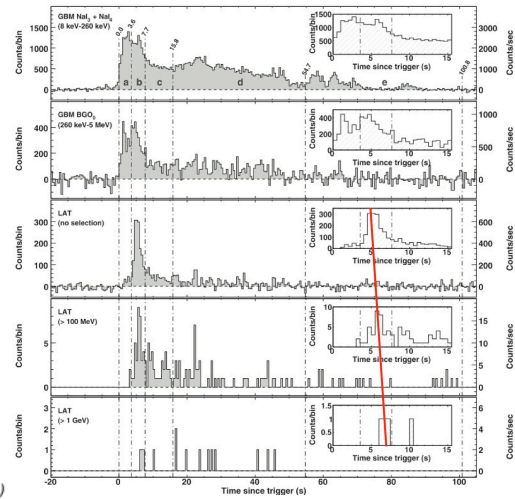
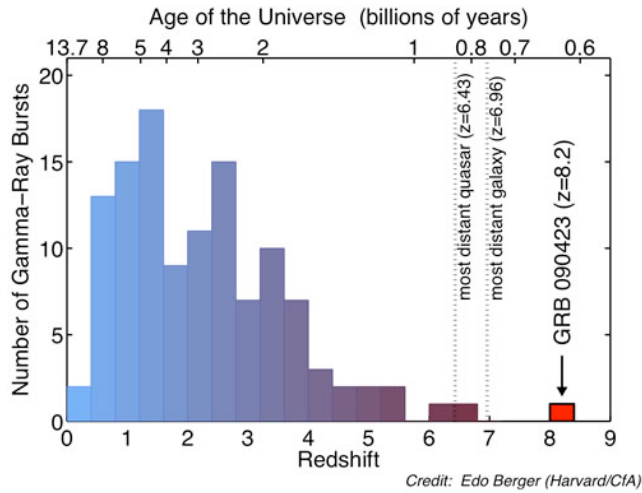


Fig. 4 : *Gauche :* Distribution en redshift des sursauts gamma. En 2005 le télescope robotique TAROT a permis la découverte d'un sursauts gamma à $z=6,29$ (Boër et al. 2006, ApJ, 638, L71). Aujourd'hui le sursaut gamma le plus lointain observé se situe à $z = 8,2$, plus loin que les quasars et galaxies les plus lointains connus à ce jour. *Droite :* Courbes de lumière du sursaut gamma GRB 080916C observé par Fermi entre 8 keV et plusieurs GeV. Le pic de lumière à haute énergie est retardé par rapport au pic à basse énergie (Abdo et al. 2009, Science, 323, 1688).

3 Thématiques scientifiques & évolutions

3.1 *L'Univers comme laboratoire*

3.1.1 *Contexte et questions majeures*

L'astrophysique des hautes énergies offre une opportunité unique pour étudier les lois de la physique fondamentale au-delà des limites accessibles en laboratoire. Des exemples sont la gravitation en champ fort, l'invariance de Lorentz, la matière ultra dense, les phénomènes exotiques intervenant dans les champs magnétiques extrêmes ou la physique des particules au-delà de 10^{12} eV (TeV). En outre, l'observation des signatures d'annihilation de l'énigmatique matière noire présente un moyen inédit de parvenir à la levée du mystère sur sa nature.

Les questions qui se posent aujourd'hui dans ce domaine se regroupent en trois catégories. Dans la première, les observations astronomiques sont utilisées pour valider les lois et théories fondamentales comme la Relativité Générale ou l'invariance de Lorentz. Par exemple dans le cas de la Relativité Générale, l'essentiel des prédictions de la théorie portent sur des astres en champ gravitationnel fort (trous noirs) ou sur des phénomènes produits par ceux-ci (ondes gravitationnelles). Ces deux aspects ne sont donc accessibles que par l'étude des phénomènes cosmiques.

Dans la deuxième catégorie, les lois qui règnent aux conditions les plus extrêmes, comme la matière à ultra haute densité ou les champs magnétiques les plus intenses, sont déterminées à l'aide d'observations à haute énergie. Dans le cas de la matière nucléaire froide dans les étoiles à neutrons, il n'y a pas d'expérience terrestre qui puisse sonder ce domaine température-pression de l'espace des phases de la matière. L'observation et l'étude des étoiles à neutrons sont incontournables.

La troisième catégorie, enfin, vise à identifier et expliquer l'origine des particules exotiques, comme celles de l'hypothétique matière noire et de l'antimatière. Cette démarche s'inscrit de manière complémentaire aux expériences de physique des particules.

Les questions majeures qui se posent aujourd'hui dans ce domaine sont :

- Est-ce que la Relativité Générale est aussi valide en champ fort ?
- Est-ce que l'invariance de Lorentz est confirmée ?
- Quelle est l'équation d'état de la matière aux plus hautes densités ? Existe-t-il des étoiles à quarks ?
- Quelle est la nature du vide et comment se comporte-t-il en champs magnétiques forts ?
- Quelle est la nature de la matière noire ?
- Quels sont l'origine et le devenir de l'antimatière dans l'Univers ?

3.1.2 *Gravitation en champ fort*

La Relativité Générale constitue toujours la théorie de la gravitation la plus aboutie. Cette théorie modélise la gravitation comme une courbure de l'espace-temps, courbure elle-même définie par la distribution de matière et d'énergie. Elle prédit l'existence des énigmatiques trous noirs pour lesquels cette courbure est extrême.

Sauf dans le cas des pulsars binaires, la Relativité Générale n'a toujours pas été testée avec précision dans la limite de ces champs gravitationnels extrêmes, alors que c'est justement dans ce régime que les déviations par rapport à la physique newtonienne classique sont les plus importantes.

Certains effets relativistes (courbure des géodésiques, précession des nœuds) ont été observés dans des régimes de faible gravité, comme dans le Système Solaire. Au voisinage des objets compacts, ces mêmes effets ont des amplitudes incomparablement supérieures. Ces conditions particulières de gravité extrême se retrouvent au cœur des noyaux actifs de galaxie hébergeant un trou noir de très grande masse (de quelques millions à quelques milliards de masses solaires), dans les binaires X contenant un objet compact de masse stellaire, et dans les systèmes binaires contenant deux objets compacts. Les effets de Relativité Générale sont observables dans le domaine des rayons X et gamma, mais aussi avec les ondes gravitationnelles émises lors des phases ultimes de la coalescence de binaires d'objets compacts. Les récentes observations X avec les satellites RXTE, XMM-Newton, Chandra et INTEGRAL ont déjà permis de mettre ainsi en évidence de très probables signatures d'effets relativistes dans l'émission des objets compacts accrétants (courbure des rayons lumineux, effet Doppler relativiste, horizon d'événements, dernière orbite circulaire stable, ...). C'est en particulier le cas pour la raie de fluorescence du Fer observée dans le spectre X des galaxies de Seyfert, mais aussi dans les binaires X. Son profil est élargi et décalé par deux effets relativistes : un décalage gravitationnel vers le rouge, et un décalage Doppler. L'élargissement de la raie du Fer permet alors d'estimer le rayon du bord interne du disque d'accrétion, dont la valeur dépend directement du spin (moment angulaire) du trou noir central. Les observations les plus récentes ont de plus démontré que l'émission X était variable sur de courtes échelles de temps, comparables aux échelles de temps dynamiques des parties les plus internes des disques d'accrétion. Cette variabilité se manifeste sous forme d'oscillations quasi-périodiques dont les fréquences sont associées à des fréquences relativistes dans la plupart des modèles théoriques. Des avancées significatives sont attendues d'IXO, ce qui permettra en particulier de résoudre la variabilité temporelle de la raie du Fer pour quelques dizaines d'AGN brillants sur des échelles de temps suborbitales, de mesurer le spin de plusieurs trous noirs dans les binaires X galactiques, et celui de plusieurs centaines de trous noirs supermassifs situés au cœur des noyaux actifs de galaxies, jusqu'à un décalage vers le rouge de 7-8.

3.1.3 Gravité quantique et invariance de Lorentz

Certaines théories de gravitation quantique prédisent une brisure de l'invariance de Lorentz aux énergies proches de l'énergie de Planck ($\sim 10^{19}$ GeV). Dans ces théories la quantification de l'espace-temps conduit à une perturbation du mouvement des photons qui se propagent avec des vitesses très légèrement inférieures à la vitesse de la lumière c . Les effets prédits par ces théories sont si faibles qu'il ne peut être envisagé de les mesurer que pour des photons de très haute énergie dont le temps de parcours est une fraction significative de l'âge de l'Univers. Une condition nécessaire à ce type d'étude est donc l'utilisation d'un signal astrophysique transitoire permettant de déterminer si les photons de haute énergie ont subi un retard par rapport aux photons de plus basse énergie.

Ce type d'étude, qui ne représente qu'un aspect des études possibles sur la brisure de la symétrie de Lorentz, s'est beaucoup développé au cours des dernières années en

utilisant les Noyaux Actifs de Galaxies (NAG) et les sursauts gamma comme sources distantes et transitoires de photons de haute énergie. Les contraintes les plus significatives sur l'énergie de la gravitation quantique sont fondées sur les observations de HESS pour les NAGs et sur celles de Fermi pour les sursauts gamma. Des progrès importants dans ce domaine sont attendus dans les années à venir avec l'observation d'un plus grand nombre de sources (éruptions de NAG connus et sursauts gamma avec mesures de redshift) et surtout une meilleure compréhension de la physique de l'émission.

3.1.4 L'équation d'état de la matière ultra dense

La matière la plus dense observable dans l'Univers se trouve au cœur des étoiles à neutrons. Quatre décennies après leur découverte, les lois gouvernant le comportement de la matière à des densités excédant plusieurs fois celle des noyaux atomiques sont très peu contraintes. Alors que les grands accélérateurs, tels le Large Hadron Collider, explorent le domaine des hautes températures et faibles densités, les étoiles à neutrons permettent d'explorer la physique quantique dans le domaine complémentaire des faibles températures et très hautes densités. Presque toute la physique est nécessaire pour comprendre les propriétés d'une étoile à neutrons, la Relativité Générale mais aussi, les théories de la superfluidité et de la supraconductivité. Ainsi, certains modèles théoriques prédisent qu'au-delà des protons, neutrons, ... le cœur des étoiles à neutrons pourrait contenir des hypérons, des quarks et même de la matière étrange (matière constituée de quarks u , d et s libres, non-confinés dans des protons ou dans des neutrons). Mettre en évidence l'existence de telles particules dans l'Univers permettrait de contraindre la physique de l'interaction forte.

Depuis longtemps, des chercheurs français contribuent à cette recherche au niveau théorique et observationnel. Ainsi, les modèles théoriques et numériques ont gagné en richesse, notamment en incluant la possibilité de former des condensats de pions, kaons, voire de quarks aux centres de ces astres ; mais aussi en améliorant la description de la matière superfluide et du couplage avec l'écorce (élastique), dont dépendent la plupart des observables astrophysiques. Ces études sur la structure des étoiles à neutrons sont le lieu d'une grande synergie entre astrophysiciens théoriciens et physiciens nucléaires (notamment à l'IPN Orsay).

La relation entre la pression et la densité, l'équation d'état, décrit le comportement de la matière, et lie ainsi le rayon des étoiles à neutrons à leur masse. Déterminer l'équation d'état requiert donc de mesurer simultanément la masse et le rayon pour un échantillon d'étoiles à neutrons de masses et de rayons différents ; le principal moyen observationnel sont les rayons X générés à la surface des étoiles à neutrons. Parmi les techniques envisagées, notons par exemple, la spectroscopie des atmosphères d'étoiles à neutrons isolées, la recherche de raies d'absorption produites dans les cendres des flashes thermonucléaires (sursauts X) dont le décalage gravitationnel vers le rouge donne directement une mesure du rapport masse sur rayon, la variabilité rapide des disques d'accrétion, ou encore la modélisation de la forme de l'oscillation engendrée par une tache chaude en rotation rapide aux pôles de l'étoile. Des avancées significatives dans ce domaine sont attendues d'IXO qui obtiendra ainsi pour plusieurs dizaines d'étoiles à neutrons une mesure de leur masse et leur rayon.

3.1.5 Physique en champs magnétiques extrêmes

L'étude des champs magnétiques forts des étoiles à neutrons qui se manifestent par des faisceaux collimatés de lumière dans les pulsars a récemment eu un regain d'intérêt important en France grâce aux observations du satellite Fermi. A la clé des observations sont la compréhension des mécanismes d'accélération dans les magnétosphères de pulsars.

Au delà des questions astrophysiques liées à l'émission haute énergie des pulsars (cf. 3.2.4) les champs magnétiques intenses autour des étoiles à neutrons sont aussi un site privilégié pour observer des phénomènes exotiques comme la biréfringence magnétique du vide ou le photon splitting. De tels champs magnétiques permettent aussi de tester l'existence d'un nouveau phénomène de ralentissement de la rotation de ce type d'étoile dû à l'interaction du champ magnétique dipolaire de l'étoile à neutrons avec la magnétisation induite dans le vide quantique (Quantum Vacuum Friction). Ce nouveau phénomène est une des rares manifestations macroscopiques des propriétés magnétiques du vide quantique.

3.1.6 La nature de la matière noire

Comprendre la nature de la matière noire reste une préoccupation principale de l'astrophysique moderne. Sous l'hypothèse que la solution se trouve dans l'existence de particules non-relativistes à faible section efficace, la méthode la plus directe consiste à observer le recul nucléaire engendré par les interactions de la matière noire avec la matière normale dans des laboratoires souterrains (expérience Edelweiss). Une approche complémentaire consiste en la détection de produits secondaires (rayons gamma, neutrinos, antiprotons, positrons) de la matière noire concentré gravitationnellement. Avec INTEGRAL, Fermi, HESS et ANTARES (existant) et AMS-02, CTA et KM3NeT (futurs), la communauté française est particulièrement bien équipée pour contribuer à la recherche dans ce domaine.

3.1.7 L'antimatière dans l'Univers

Une autre des grandes énigmes de la formation de l'Univers concerne la brisure de la symétrie entre matière et antimatière. Prochainement, le spectromètre AMS-02 sera à la recherche d'antinoyaux ou d'antiprotons de haute énergie qui permettront la découverte des reliques d'antimatière datant de la période d'inflation, sous condition bien sûr que ces reliques existent ! D'une manière plus conventionnelle, la communauté française participe depuis longtemps aux observations de la raie d'annihilation à 511 keV permettant l'étude de la production d'antimatière au sein de notre propre Galaxie. Grâce aux observations d'INTEGRAL des progrès importants ont été accomplis dans les années récentes (voir faits saillants), cependant sans trouver de réponse définitive sur la question de l'origine des positrons galactiques. Une instrumentation bien plus sensible sera probablement nécessaire pour percer ce mystère.

3.2 Objets compacts et leurs environnements

3.2.1 Contexte et questions majeures

Les objets compacts (naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs) sont au cœur de l'astrophysique des hautes énergies. Les conditions extrêmes qui y règnent en font des laboratoires uniques pour la physique (cf. 3.1). Ils sont à l'origine de phénomènes explosifs lors de leur formation ou lors de la combustion de matière nucléaire à leur surface (cf. 3.3). Enfin, ils constituent la principale source astrophysique attendue de nouveaux messagers (cf. 3.4 et 3.5). La compacité de ces objets démultiplie l'énergie de rotation et l'énergie potentielle de gravitation pouvant être mises en jeu : le rapport M/R d'une étoile à neutrons est plus de 10 000 fois plus grand que celui du Soleil. La physique autour des objets compacts vise à une meilleure compréhension des différents canaux via lesquels cette énergie est libérée et dissipée. Cette compréhension nécessite de résoudre des problèmes complexes de magnétohydrodynamique, éventuellement en régime relativiste, et on peut comprendre que ce défi motive une communauté importante de physiciens.

Le ciel X est dominé par des sources (binaires X, noyaux actifs de galaxies) dont la puissance provient ainsi de l'accrétion de matière, auquel cas l'énergie disponible est proportionnelle à M/R . La fraction de cette énergie qui est rayonnée dépend du régime du flot d'accrétion. Dans d'autres sources (pulsars), la source d'énergie est la rotation de l'objet compact, qui est proportionnelle à M^2/R pour un objet en rotation maximale (proche de sa disruption). La rotation des pulsars engendre un vent fortement relativiste qui joue un rôle central dans la dissipation de l'énergie disponible. L'accrétion s'accompagne aussi de phénomènes d'éjection qui peuvent canaliser une fraction importante de l'énergie disponible. Au moins une fraction de ces objets (microquasars, noyaux actifs de galaxies « radio loud ») montre des jets relativistes s'étendant sur des échelles de quelques unités astronomiques à la centaine de kpc, soit des échelles gigantesques par rapport à la taille du système. L'origine du rayonnement est non-thermique au-delà du MeV. Une fraction de l'énergie disponible est alors donnée à une minorité de particules, quelques-unes (les rayons cosmiques) pouvant peut-être atteindre le ZeV (10^{21} eV). Les observations radio et gamma indiquent que jets et émission non-thermique sont liés. Les questions majeures sont :

- Quelle est la physique des flots d'accrétion ?
- Quel est le lien éjection-accrétion et quel rôle joue la rotation de l'objet compact ?
- Quels sont le mécanisme de collimation des jets relativistes et leur composition ?
- Quels sont les processus non-thermiques opérant dans les objets compacts et les conditions de leur mise en œuvre ?
- Quelle fraction de l'énergie libérée retourne vers le milieu ambiant avec quel impact sur celui-ci ?

Cette dernière question est motivée par l'importance croissante qu'ont pris les mécanismes de rétroaction de l'activité des trous noirs dans les modèles de formation des grandes structures. On retrouve un certain nombre des questions soulevées dans le précédent rapport de prospective du GdR PCHE (rédigé en 2002), même si leur lecture a évolué avec, actuellement, un poids plus fort des aspects non-thermiques

(jets, émission gamma). XMM-Newton et Chandra donnent leur plein potentiel et permettent de détecter des sources dans des états de très faible luminosité (Sgr A*, binaires X de faible masse, étoiles à neutrons isolées...), de résoudre spatialement certaines sources (nébuleuses de pulsars, jets...) et d'appliquer des diagnostics de plasmas grâce à la spectroscopie X (raies du Fer...). Les observations INTEGRAL permettent la détection de nombreuses sources X transitoires et/ou fortement atténuées en X mous. Par ailleurs, Fermi et HESS révèlent un ciel gamma à haute et très haute énergie riche en sources, associées principalement à des blazars ou des pulsars ce qui renouvelle l'étude de ces objets. Le suivi multi-longueurs d'onde est (sans surprise) indispensable, de rigueur et (presque) routinier. Enfin, plusieurs avancées significatives ont eu lieu concernant les processus physiques fondamentaux à l'œuvre dans ces sources : sur les mécanismes de transport dans les disques et sur l'accélération de particules.

3.2.2 Physique des flots d'accrétion

Accrétion, état spectraux et hystérésis

L'accrétion de matière sur un objet compact passe par la formation d'un disque qui permet de redistribuer le moment cinétique. Cette redistribution entraîne une dissipation d'énergie potentielle de gravitation qui, suivant le régime du flot d'accrétion, peut être rayonnée efficacement ou non. A fort taux d'accrétion le disque est sans doute mince et radiativement efficace (disque «standard»). Par contre, les observations X et UV de binaires et de noyaux actifs de galaxies montrent qu'à plus faible taux d'accrétion le flot ne peut pas être radiativement efficace. L'énergie dans les «radiatively inefficient accretion flows» (RIAFs) chauffe un plasma optiquement mince jusqu'à des températures très élevées sans que celui-ci ait le temps de rayonner avant d'atteindre l'horizon et/ou fini par éjecter une partie de la matière accrétée. Depuis 2002, il a été démontré que les observations X de binaires en éruption montrent un cycle d'hystérésis entre taux d'accrétion et transition spectrale, cette dernière étant associée au changement de régime du flot. Les noyaux actifs de galaxies semblent montrer le même comportement. De plus, l'état spectral bas/dur («low/hard» ou «power-law dominated») des binaires correspond à une émission radio forte provenant d'un jet compact. Les transitions spectrales semblent associées à des phénomènes d'éjection majeurs. Il existe donc un second paramètre contrôlant le flot d'accrétion dont la nature est encore inconnue mais qui pourrait avoir un lien avec l'éjection.

Sgr A* le trou noir supermassif le plus proche

La source radio Sgr A* située au centre de notre Galaxie est le trou noir supermassif le plus proche de nous. Les orbites des étoiles S observées par optique adaptative au VLT et au Keck ont permis de préciser la masse du trou noir à une précision inégalée ($4 \times 10^6 M_{\text{sol}}$). Ces observations constituent la meilleure preuve de l'existence de trous noirs dans l'Univers, aucun autre objet théorique ne pouvant expliquer la densité de matière observée. Sgr A* est le meilleur exemple de flot d'accrétion radiativement inefficace, avec une luminosité observée étonnamment plus faible que celle observée dans les noyaux actifs de galaxies comportant des trous noirs de masse comparable (par exemple le flux X du noyau de Centaurus A est 10^7 fois supérieur au flux X de Sgr A*). Par ailleurs, les observations Chandra résolvent le rayon de Bondi-Hoyle ($\sim 1''$) ce qui donne une estimation du taux de transfert de masse vers le trou noir d'environ $10^{-5} M_{\text{sol}}/\text{an}$. La luminosité de Sgr A* implique que l'efficacité radiative est de l'ordre de 0.0001%. Sgr A* est donc l'un des meilleurs tests des

modèles de RIAFs. Ceux-ci doivent maintenant rendre compte des éruptions X en provenance de Sgr A* qui apparaissent à la fréquence d'environ une par jour et dont l'amplitude peut atteindre jusqu'à 160 fois le flux de la source au repos. L'observation simultanée de ces éruptions en radio, IR et X a fait l'objet d'un effort considérable ces dernières années. Leur interprétation nécessite probablement la présence d'une population d'électrons non-thermiques accélérés près du trou noir sans toutefois qu'un jet ait pu être résolu. De manière analogue, les observations de binaires X indiquent aussi la présence d'une population non-thermique liée au jet compact (observations radio) ou à la couronne (observations au-delà de 100 keV). L'origine de ces populations non-thermiques serait contrainte par l'observation de variabilité gamma (Fermi) corrélée à d'autres longueurs d'onde.

Binaires massives obscurcies

Des groupes français sont impliqués dans les campagnes de suivi multi-longueurs d'onde de binaires X, notamment des transitoires découvertes par INTEGRAL. Ces campagnes devraient largement bénéficier de l'installation récente du spectrographe X-SHOOTER au VLT qui couvre l'ensemble du domaine visible. Un aspect inattendu des observations INTEGRAL a été la découverte d'un grand nombre de binaires massives dont le rayonnement X était absorbé jusqu'à plusieurs keV par le fort vent stellaire de leur compagnon. D'autres binaires vues par INTEGRAL sont associées à des supergéantes et montrent des éruptions de grande amplitude mais très brèves (quelques jours au plus). Ces éruptions sont difficilement explicables par l'accrétion dans un disque standard qui a un temps caractéristique d'accrétion plus long. Une possibilité est l'accrétion de grumeaux formés dans le vent stellaire et ayant un faible moment cinétique offrant la perspective de diagnostics de l'inhomogénéité des vents d'étoiles massives.

Diagnostics plasma en spectroscopie X

Les satellites X Chandra et XMM-Newton permettent d'obtenir des spectres haute résolution avec un rapport signal sur bruit sans précédent. Pour la première fois, l'application de diagnostics de plasmas devient possible dans le domaine des rayons X pour des objets extra-solaires brillants, notamment pour un certain nombre de noyaux actifs de galaxies, de binaires X et de variables cataclysmiques. Par exemple, XMM-Newton a permis la découverte et la caractérisation de raies étroites du Fer vues en absorption et ayant pour origine les régions externes du disque dans les binaires auto-éclipsées (« dippers »). XMM-Newton et Chandra ont aussi mis en évidence la présence de raies en émission du Fer élargies par effet relativiste dans un grand nombre de noyaux actifs de galaxies mais aussi provenant des binaires X avec trous noirs ou étoiles à neutrons. Ces raies sont émises dans les régions internes du disques et peuvent être utilisées pour contraindre l'inclinaison du disque et le spin du trou noir (cf. partie 2). La plupart des quasars proches montrent un excès X mou (« soft excess ») avec une température supérieure à celle attendue compte tenu de la masse du trou noir. Raies du Fer Kalpha et « warm absorbers » sont également souvent présents. Le spectre X peut être modélisé par la réflexion d'un spectre primaire sur le disque d'accrétion ou comme un artefact dû à l'absorption du continu primaire par un vent relativiste. Les études de spectroscopie X fine nécessitent des codes calculant avec précision le continu ainsi que les nombreuses raies en absorption ou en émission dans les milieux photoionisés. La poursuite de ces travaux est indispensable pour préparer les observations d'IXO.

Processus fondamentaux du transport dans les disques

Les flots d'accrétion font appel à des processus physiques pour certains indépendants de l'objet étudié. Le principal est le mécanisme de transport du moment cinétique qui fait l'objet de recherches depuis près de quarante ans. Après une longue période de controverses, il a maintenant été clairement établi que des instabilités hydrodynamiques ne peuvent pas rendre compte de ce transport. Le seul mécanisme viable connu actuellement capable de générer le transport turbulent est l'instabilité magnéto-rotationnelle. Ces dernières années ont vu des avancées majeures dans l'étude numérique de cette instabilité. L'efficacité du transport dépend de manière inattendue de certains paramètres de la microphysique (nombre de Prandtl magnétique), au moins dans les régimes accessibles aux simulations numériques. Le nombre de Prandtl peut varier considérablement d'un type d'objet à l'autre, voire d'un état à l'autre dans un même objet, et donc modifier profondément le mode d'accrétion. Des passerelles se sont aussi créées vers des groupes de physique étudiant expérimentalement les flots cisailés hydro ou MHD, dans ce dernier cas pour mettre en évidence un effet de dynamo (planètes, Soleil). Un autre mécanisme indépendant de l'objet étudié est l'interaction disque - magnétosphère que l'on retrouve dans les variables cataclysmiques, les étoiles jeunes et les binaires X. Les simulations numériques permettent maintenant d'aborder ce problème qui a des conséquences observationnelles immédiates : accrétion le long des lignes de champ, gauchissement et troncation des disques, évolution du moment cinétique de l'objet compact. La simulation numérique globale de l'accrétion de matière sur un trou noir est abordable dans certains cas. La simulation MHD permet aussi d'aborder le problème du lancement, de la collimation et de la propagation des jets. Elle est indispensable pour valider les modèles semi-analytiques. La communauté française dans le domaine de la simulation numérique s'est développée au cours de ces dernières années, notamment via la formation et le recrutement de jeunes chercheurs. Cet effort doit absolument être poursuivi en coordination avec la communauté de physique stellaire.

3.2.3 Jets relativistes et accélération de particules

Jets et vents dans les binaires

La communauté française est bien présente dans l'observation des jets relativistes et la modélisation des processus radiatifs à haute énergie. Dans les binaires, le suivi radio/X déjà évoqué est la principale source d'information sur le lien entre accrétion et éjection. Le suivi X devrait bénéficier de l'implication française dans SVOM, tandis qu'une révolution se prépare dans le suivi radio avec LOFAR qui voit l'ensemble du ciel accessible en continu. LOFAR permettra une surveillance régulière des sources et des alertes sur les événements transitoires préfigurant ce qui sera possible avec SKA à plus hautes fréquences radio. Les observations Chandra ont mis en évidence un rayonnement X provenant d'éjecta de microquasars jusqu'à des distances de l'ordre du parsec du système, de manière analogue à ce qui est observé dans les noyaux actifs de galaxies. L'interprétation fait appel à une distribution d'électrons accélérés localement, peut-être dans un choc avec le milieu interstellaire, et donc apporte de nouvelles informations sur la propagation et la physique de ces jets à grande échelle. Une partie du rayonnement d'annihilation 511 keV pourrait avoir pour origine des paires électron-positron injectées dans le milieu interstellaire par les jets de microquasars. Les spectres visible/UV/X des noyaux actifs de galaxies et variables cataclysmiques montrent clairement la signature de vents provenant des régions internes du disque. En comparaison, la recherche de telles signatures dans les

binaires n'a abouti que récemment grâce à la spectroscopie X (GRS 1915+105). Les conditions donnant lieu au lancement d'un vent plutôt que d'un jet ne sont pas encore comprises. Alors qu'on pensait que les variables cataclysmiques ne lancent pas de jets, peut-être en raison d'une pression thermique insuffisante, il faut noter que des observations radio récentes ont mis en évidence une émission synchrotron transitoire en provenance de la nova naine SS Cyg.

Emission des blazars

L'étude des jets des noyaux actifs de galaxies bénéficie actuellement d'un contexte très favorable avec les observations de Fermi et HESS qui contraignent l'émission Compton inverse des blazars (jet orienté vers l'observateur). Les observations par HESS du blazar PKS 2155-304 lors d'une éruption spectaculaire en 2006 montrent une variabilité jusqu'à des échelles de temps de l'ordre de la minute, près de 100 fois plus rapides que ce qui était connu auparavant (toutes longueurs d'onde confondues). C'est également plus court d'un facteur dix que le temps que mettrait la lumière à traverser une région de la taille de l'horizon du trou noir, démontrant que les zones d'émission sont compactes et se déplacent à des vitesses hautement relativistes. L'amplitude des variations diminue avec l'échelle de temps considérée, et en l'absence de signature nette dans les spectres de puissance, il est probable qu'on n'ait pas encore vu l'échelle de temps la plus rapide. Les fluctuations dans un état éruptif suivent une loi log-normale, suggérant que les fluctuations sont proportionnelles au flux lui-même, une propriété bien connue dans les binaires X et les Seyfert mais jamais vue jusqu'ici dans les blazars et qui suggère un lien entre la variabilité du jet et la variabilité du moteur central. Plusieurs groupes ont développé des modèles radiatifs inhomogènes et dépendant du temps dans le but de reproduire les observations multi-longueurs d'onde. Le but est d'identifier les processus radiatifs dominants, de contraindre la structure et la composition des jets. Un test important de ces modèles provient de l'observation d'émission gamma associée à des noyaux actifs de galaxies autres que blazars, où le jet n'est pas directement dans la ligne de visée de l'observateur (M87, Cen A) et/ou les conditions de l'accrétion (masse du trou noir, taux) ne sont pas nécessairement les mêmes (narrow-line Seyfert 1 PMN J0948+0022). La découverte d'un sursaut radio du noyau de la radio-galaxie proche M87 par VLBA, après un état haut au TeV observé lors d'une campagne impliquant les trois principaux observatoires Tcherenkov (HESS, MAGIC et VERITAS), indique que les rayons gamma sont générés près du trou noir, à des distances plus proches que la photosphère radio (~100 rayons de Schwarzschild).

Accélération de particules

Les électrons dans les jets relativistes ou les nébuleuses de pulsar (cf. ci-dessous) atteignent des énergies de plus d'une dizaine de TeV. Que ce soit pour les jets relativistes de noyaux actifs de galaxies, de binaires ou de sursauts gamma, pour les restes de supernovae ou les nébuleuses de pulsars, la modélisation radiative est le seul moyen pour identifier les processus fondamentaux d'accélération de particules. Ces contraintes peuvent être dynamiques lorsqu'une variabilité est observée. Certaines observations de blazars suggèrent que l'injection de particules est quasi mono-énergétique, ce qui est caractéristique de processus de Fermi du deuxième ordre. Les études théoriques montrent qu'il est très difficile d'obtenir un grand nombre de cycles d'accélération autour d'un choc relativiste. Les codes PIC (« particle in cell ») permettent maintenant d'aborder ces questions par le biais de la simulation numérique. Quelques liens existent avec la communauté plasma et magnétosphère à l'origine de ce type de code. Ce domaine de recherche connaît une évolution très

rapide et devrait faire le lien dans un futur proche entre processus physiques fondamentaux et modélisation radiative des observations, au moins en ce qui concerne l'accélération des électrons/positrons. Le problème de l'accélération de protons ou de noyaux lourds reste en effet difficile numériquement. L'espoir de pouvoir identifier sans ambiguïté les sources du rayonnement cosmique repose en grande partie sur l'astronomie des neutrinos (cf. 3.5). Les noyaux actifs de galaxies proches pourraient expliquer l'anisotropie dans les rayons cosmiques de ultra-haute énergie observés par AUGER. A ce titre, ils sont donc aussi d'excellents candidats de sources de neutrinos astrophysiques. Il faut toutefois noter que la variabilité rapide des blazars ne semble pas favoriser des modèles radiatifs mettant en jeu des interactions hadroniques.

3.2.4 Physique des objets fortement magnétisés

La très grande majorité des sources du ciel gamma galactique vu par Fermi et HESS se sont avérées être associées à des pulsars. La communauté française s'est impliquée de manière croissante dans les observations gamma de ces pulsars, de leurs nébuleuses et des binaires gamma. Une partie du chronométrage radio indispensable à la détection de certains pulsars est effectué à Nançay. La communauté est également présente dans l'étude théorique des mécanismes d'émission de ces objets.

Pulsars

EGRET avait identifié les pulsations gamma de quelques pulsars seulement. Fermi détecte maintenant les pulses gamma de plus d'une quarantaine de pulsars, y compris venant de pulsars millisecondes bien plus âgés et moins lumineux que les pulsars jeunes détectés jusqu'à présent. La détection d'émission gamma en provenance d'un amas globulaire (47 Tuc) est d'ailleurs sans doute due à l'émission combinée de plusieurs pulsars millisecondes dans l'amas. La source d'énergie provient de la rotation de l'étoile à neutrons. Dans un environnement ténu, la rotation du champ magnétique engendre un champ électrique susceptible d'accélérer les paires électron-positron créées in situ voire des noyaux lourds arrachés à la surface de l'étoile à neutrons. Un mécanisme analogue pourrait se produire au voisinage d'un trou noir et extraire une partie de son énergie de rotation. Néanmoins, les densités nécessaires pour ancrer le champ magnétique (le trou noir n'ayant pas de champ propre) peuvent facilement court-circuiter le champ électrique. L'émission gamma des pulsars est bien moins collimatée que l'émission radio. L'accès à une population gamma permet de contrôler les effets d'orientation de l'objet : inclinaison des axes et angle de visée de l'observateur. Le rayonnement des paires est émis surtout en gamma, le rayonnement radio ne représentant qu'une très faible fraction de la puissance émise. Ce n'est donc que maintenant que la principale source d'information sur le mécanisme d'émission des pulsars devient accessible, ouvrant la perspective de progrès rapides sur ce problème ouvert il y a 40 ans. La polarisation haute énergie apporterait des informations complémentaires sur la géométrie. Il faut noter la récente (re-)détection de la polarisation X du pulsar du Crabe par INTEGRAL. Un effort instrumental vers la polarisation haute énergie semble indispensable après un hiatus de plus de trente ans.

Nébuleuses de pulsars

Les lignes de champ magnétique de l'étoile à neutrons s'ouvrent au-delà du cylindre de lumière. Les particules présentes s'échappent et génèrent un vent qui emporte l'énergie de rotation et qui ralentit donc le pulsar. LIGO a d'ailleurs fortement

contraint la contribution possible des ondes gravitationnelles au ralentissement du pulsar du Crabe. Les nébuleuses de pulsars sont le produit de l'interaction de ce vent avec le milieu interstellaire. Les particules du vent peuvent être ré-accélérées au choc terminal. Les observations X (Chandra, XMM-Newton) et gamma (HESS) résolvent spatialement ces nébuleuses et permettent pour la première fois l'étude des pertes en énergie des électrons de la nébuleuse en fonction de leur distance au choc terminal. Une partie des sources HESS encore non-identifiées pourraient être des nébuleuses de pulsars dont l'émission X ténue et étendue n'a pas encore été identifiée. Les électrons et positrons provenant de vents de pulsars très proches de nous (100 pc) pourraient expliquer l'excès au GeV observé dans le rayonnement cosmique électronique mesuré sur Terre. La quasi-totalité de l'énergie du vent du pulsar doit être sous la forme d'énergie cinétique des particules au moment du choc pour expliquer le rayonnement de la nébuleuse. Pourtant, l'énergie est principalement sous forme magnétique près du cylindre de lumière. Le mécanisme par lequel l'énergie est donnée aux particules est un problème majeur avec des implications pour les sursauts gamma ou les noyaux actifs de galaxies où l'énergie de l'éjecta pourrait être initialement sous forme de flux de Poynting avant de devenir cinétique. La dissipation pourrait avoir lieu par reconnection dans la nappe de courant qui sépare les hémisphères du pulsar de polarité opposée (« stripped wind model »).

Binaires gamma

Plusieurs binaires sont maintenant des émetteurs confirmés en gamma de haute et très haute énergie. L'émission gamma mesurée par Fermi ou HESS est modulée sur la période orbitale. Toutes ces binaires comportent une étoile massive. L'objet compact est un pulsar dans PSR B1259-63 et reste non identifié dans les autres. Leur émission gamma au-delà du MeV est bien supérieure à leur émission X d'où la dénomination de binaires gamma. C'est d'ailleurs par leur émission gamma que deux des sources, LS I+61 303 et HESS J0632 (candidat binaire gamma), ont été identifiées. Initialement il avait été suggéré que certaines de ces binaires pouvaient être des microquasars. Néanmoins, leurs caractéristiques observationnelles très similaires suggèrent que tous ces systèmes contiennent un pulsar jeune à l'image de PSR B1259-63. L'émission proviendrait de l'interaction du vent de pulsar avec son environnement radiatif (photons de l'étoile massive) et matériel (vent stellaire de son compagnon). L'environnement et la géométrie sont bien plus contraints que, par exemple, dans les modèles de rayonnement haute énergie des blazars. Cette interaction a lieu sur des échelles spatiales environ 10 000 fois plus petites que dans le cas des étoiles à neutrons isolées ayant un mouvement propre important et interagissant avec le milieu interstellaire ou dans le cas des nébuleuses de pulsar classiques où une étoile à neutrons jeune interagit avec l'éjecta de la supernova. Les binaires gamma donnent ainsi accès à des informations sur les conditions dans les vents relativistes bien plus près du pulsar.

3.2.5 Evolution et rétroaction de l'activité des trous noirs

Boucle de rétroaction

La quasi-totalité des galaxies abritent des trous noirs supermassifs en leur centre. La découverte d'une corrélation entre la masse du bulbe ou la dispersion de vitesse des étoiles centrales et la masse du trou noir suggère fortement que leurs évolutions sont liées. Les rencontres de galaxies peuvent induire la coalescence de leurs trous noirs (LISA) et/ou la formation de barres et/ou un pic de formation stellaire, ces derniers processus pouvant apporter de la matière vers le trou noir. En retour, l'activité du

trou noir peut chauffer ou souffler le milieu environnant et arrêter ces processus. Les simulations numériques de formation des grandes structures et l'interprétation des observations venant des grands relevés cosmologiques requièrent un mécanisme de régulation de ce type. Sa compréhension rencontre plusieurs points de blocage. Le transport et la formation du disque autour du trou noir à des distances supérieures au parsec (où le disque est gravitationnellement instable) reste incompris. Inversement, le mécanisme de déposition de l'énergie dans le milieu intergalactique (chocs, vents) est mal connu. Les observations X montrent par exemple une cavité dans le gaz intergalactique chaud autour de la galaxie elliptique NGC 1275 au centre de l'amas de Persée. La cavité est excavée par un jet radio qui a récemment été détecté en gamma par Fermi. Les observations gamma peuvent apporter une meilleure connaissance des mécanismes de dissipation dans le milieu. LOFAR pourrait également trouver les vestiges d'épisodes passés d'éjection dans des noyaux actifs de galaxies. La basse fréquence est particulièrement importante pour contraindre le contenu énergétique global. De manière analogue, on sait que les jets de microquasars injectent une énergie dans le milieu interstellaire qui est comparable à l'énergie rayonnée. Ils peuvent donc jouer un rôle non négligeable dans l'écologie galactique (en contribuant par exemple en partie au rayonnement cosmique).

Formation, évolution et cycles d'activités

Que ce soit pour les microquasars ou les noyaux actifs de galaxies, l'impact cumulé de l'injection continue d'énergie par des objets de faible luminosité est sans doute bien plus important que celui des jets relativistes, spectaculaires mais épisodiques. Fermi va permettre la constitution d'un échantillon de plusieurs centaines de noyaux actifs sélectionnés en gamma, d'étudier statistiquement l'évolution comparée des différents sous-types et d'en déduire éventuellement des contraintes sur les cycles d'activité ou, tout au moins, les conditions d'une émission gamma. Les noyaux actifs de galaxies échantillonnés en X, optique et radio semblent indiquer deux séquences de noyaux actifs de galaxies dont l'une est plus brillante en radio que l'autre, indépendamment de la luminosité de l'objet. Outre le taux d'accrétion, le deuxième paramètre en jeu pourrait être la rotation du trou noir. La production d'un jet relativiste puissant nécessiterait, outre la rotation du trou noir, un disque d'accrétion massif permettant la collimation MHD. Enfin, l'observation de quasars à $z > 6$ implique que certains trous noirs gagnent rapidement des masses très élevées. Une croissance au taux d'Eddington implique l'existence de trous noirs de $10^4 M_{\text{sol}}$ à $z=10$, au moment de la formation des premières étoiles. Étonnamment, on observe des sources X dans d'autres galaxies dont la luminosité est si importante qu'elle n'est compatible qu'avec de l'accrétion sur un trou noir de plusieurs centaines de masses solaires. Ces masses sont intermédiaires entre celles des trous noirs stellaires et supermassifs. Elles sont trop élevées pour être expliquées par l'effondrement d'une étoile, exceptées peut-être des étoiles primordiales ayant une très faible métallicité. La détection de nébuleuses photoionisées dans certains cas prouve que l'émission X est bien isotrope. Les données du serendipitous survey de XMM-Newton ont montré une source variable ayant une luminosité X de plus de 10^{42} erg/s. C'est sans doute le meilleur candidat trou noir de masse intermédiaire.

3.3 Phénomènes explosifs

3.3.1 Contexte et questions majeures

Les explosions stellaires décrites dans cette partie sont envisagées dans un sens large : tout phénomène conduisant à la destruction d'une étoile est en effet considéré ici (supernovae de différents types, sursauts gamma, coalescences d'objets compacts, ...). Ces phénomènes explosifs apparaissent à plusieurs titres dans la thématique de l'astrophysique des hautes énergies : (i) du point de vue observationnel, certaines de ces explosions produisent elles-mêmes un rayonnement « de haute énergie », qui parfois est le mode principal de détection de l'événement (dans le cas des sursauts gamma par exemple) ; (ii) du point de vue physique, le mécanisme de l'explosion fait généralement intervenir une physique extrême également propre au domaine PCHE (matière ultra dense, champ gravitationnel fort, refroidissement par les neutrinos, éjection à grande vitesse, éventuellement relativiste, ...) ; (iii) beaucoup de ces explosions stellaires s'accompagnent d'une nucléosynthèse spécifique, dont certaines signatures (émission gamma d'éléments radioactifs) ne peuvent être observées qu'à haute énergie ; (iv) si la destruction n'est pas totale, l'objet astrophysique résiduel formé à l'issue d'une explosion est a priori très compact et devient une source nouvelle pour l'astrophysique des hautes énergies ; (v) l'ensemble du phénomène depuis l'explosion jusqu'à la formation du résidu est susceptible de réunir des conditions physiques propices à l'émission de rayonnement non photonique.

Le domaine est confronté à beaucoup de questions importantes, qui seront développées dans les paragraphes suivants. On peut synthétiser ces enjeux en quelques questions majeures, qui toutes concernent un ou plusieurs types d'explosions stellaires :

- *La question des progéniteurs* : on aimerait identifier précisément le devenir d'une étoile en fonction de sa masse et de sa métallicité (et peut-être d'autres paramètres : rotation, binarité, environnement, ...) et en particulier, savoir quelles étoiles sont associées aux différentes sortes d'explosions observées.
- *La question des mécanismes* : même si un scénario physique général a généralement été clairement identifié pour chaque type d'explosion, il reste dans de nombreux cas des questions fondamentales posées pour ce qui concerne les détails du mécanisme de l'explosion, ou certaines de ses étapes.
- *La question des éjectas* : plusieurs explosions sont accompagnées d'éjection de matière à grande vitesse (éventuellement à vitesse relativiste). On aimerait connaître en détails les propriétés physiques de ces éjectas (composition, magnétisation, géométrie, ...).
- *La question des résidus* : la plupart des explosions stellaires ne détruisent pas entièrement l'étoile. On aimerait comprendre les propriétés de l'objet compact résiduel formé (nature, rotation, magnétisation, mode d'accrétion, ...).
- *La question des signatures de la nucléosynthèse explosive*. L'émission gamma des éléments radioactifs formés dans certaines explosions est relativement bien prédite. Le défi est ici de réussir à baisser les seuils instrumentaux pour étudier de manière plus systématique ces signatures.
- *La question de l'émission non photonique*. Certaines explosions, ou certains des éjectas produits, sont susceptibles d'émettre des neutrinos de basse ou de haute énergie. Ceci n'a pour l'instant été confirmé que par une observation unique (les neutrinos de basse énergie de SN1987A). Plus encore que pour la

question précédente, le défi est ici instrumental. En ce qui concerne les ondes gravitationnelles, également prédites en association avec certains types d'explosions stellaires, c'est une première détection qui est attendue avec impatience.

- *La question de l'origine des rayons cosmiques.* Cette question fondamentale est traitée en détail dans la section 3.5 mais est mentionnée ici car, au moins en ce qui concerne le rayonnement galactique, les sources d'accélération des rayons cosmiques sont recherchées du côté des explosions stellaires.

3.3.2 La physique des explosions stellaires

Les étapes finales de l'évolution stellaire conduisent dans certaines conditions à une explosion qui détruit tout ou partie de l'étoile. Sur le plan théorique, plusieurs mécanismes sont possibles : (1) la destruction thermonucléaire d'une naine blanche; (2) l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive; (3) la destruction d'une étoile très massive par production excessive de paires électron/positron; (4) la destruction de deux étoiles compactes dans la coalescence d'un système binaire. De tels événements sont accompagnés d'une émission électromagnétique observable, mais également fréquemment d'une émission non photonique (neutrinos, ondes gravitationnelles) qui peut être dominante.

La destruction thermonucléaire d'une naine blanche

Ces explosions se traduisent d'un point de vue observationnel par une supernova de type Ia. Si les grandes lignes du scénario font consensus, les détails du mécanisme de l'explosion sont encore mal compris, malgré des simulations numériques poussées incluant une physique aussi réaliste que possible. Une question centrale est la compréhension théorique fine de la courbe de lumière (forme et intensité) en raison de l'utilisation des supernovae de type Ia comme chandelles standard (voir ci-dessous). Se pose par ailleurs la question des progéniteurs des supernovae de type Ia : on envisage généralement une naine blanche accrétant dans un système binaire, mais d'autres scénarios existent (coalescence de deux naines blanches par exemple). Les grands relevés de supernovae de type Ia pour la cosmologie permettent d'aborder cette question via en particulier l'évolution du taux d'explosions et l'étude des caractéristiques des galaxies hôtes. Avec l'implication de plusieurs laboratoires dans les programmes de recherche de supernovae, la communauté française est bien présente dans ce domaine.

L'effondrement gravitationnel d'une étoile massive

Le scénario standard est celui selon lequel le cœur s'effondre et donne une étoile à neutrons, alors que l'enveloppe de l'étoile est expulsée et produit le phénomène observé comme une supernova de type Ib,c ou II. La classification spectrale est définie par la présence (type II) ou l'absence (type I) d'hydrogène, avec (type Ib) ou sans (type Ic) présence d'hélium, et correspond grossièrement à une évolution de la masse de l'étoile parent, qui expulse ou non son enveloppe externe dans ses phases évoluées. De nombreuses questions se posent : quel est le mécanisme qui permet l'explosion à la suite de l'effondrement gravitationnel ?

Une nouvelle piste prometteuse a émergé ces dernières années pour tenter de résoudre cette vieille énigme : le rôle de l'instabilité advective-acoustique. Ceci suppose à la fois des développements théoriques et numériques conséquents, pour lesquels la communauté française semble bien mieux placée que dans le passé, en particulier grâce aux développements théoriques ou à l'expertise numérique dans la

simulation d'objets compacts. La compréhension du mécanisme de l'explosion est sans doute la clef pour répondre à d'autres questions : quel est le degré d'asymétrie de l'explosion ? comment est fixée l'énergie libérée ? quelle est la vitesse communiquée à l'étoile à neutrons qui se forme ? Au-delà de la masse de l'étoile parent, comment l'explosion dépend-elle d'autres paramètres comme la métallicité, ou la rotation ?

A côté de la modélisation des explosions, il convient de mentionner également l'implication de la communauté française dans les expériences de chocs radiatifs avec des lasers qui reproduisent les conditions des chocs astrophysiques, en particulier dans les supernovae.

Sur le plan observationnel, la recherche systématique des supernovae par les différents programmes déjà mentionnés au paragraphe précédent permet de décrire au mieux la diversité de la population des supernovae et donc d'appréhender la question des progéniteurs et des taux. L'étude des objets individuels porte essentiellement sur l'interaction de l'explosion avec son environnement (et bien sûr la question de l'accélération des rayons cosmiques dans les restes de supernovae). A plus long terme, réussir à imager en haute résolution des supernovae jeunes pourrait permettre de sonder les phases précoces de l'explosion et leur degré d'asymétrie. La résolution spatiale requise semble hors d'atteinte à court terme. Récemment Swift et GALEX ont permis d'observer dans un petit nombre de cas ce qui est vraisemblablement l'émission associée à l'instant où l'onde de choc de l'explosion traverse l'enveloppe externe de l'étoile. D'autres observations du même type permettraient également de mieux contraindre le mécanisme de l'explosion. Naturellement l'observation du spectre des neutrinos émis par une supernova galactique constituerait une nouvelle source d'information exceptionnelle sur la physique de l'explosion. La question du taux de supernovae dans notre Galaxie a fait l'objet de résultats récents avec la mesure précise de l'émission radioactive de ^{26}Al dans le plan galactique par INTEGRAL, et la découverte en radio et en X, grâce à Chandra d'une supernova galactique récente (< 150 ans). Une fois que l'explosion a eu lieu, elle se propage dans le milieu environnant qui freine la matière éjectée. La compréhension physique de la structure produite est cruciale, en particulier car ces restes de supernovae sont très probablement le lieu de l'accélération des rayons cosmiques galactiques. Ceci nécessite des observations à plusieurs longueurs d'onde, et en particulier à haute énergie (X, gamma, gamma de très haute énergie : cf. 3.4). Les observations en X avec une bonne résolution angulaire et spectrale permettent de contraindre les caractéristiques physiques dans la région choquée. En résumé, le domaine de l'étude des supernovae gravitationnelles connaît donc ces dernières années de nouveaux développements fort prometteurs, auxquels la communauté française est maintenant en mesure de contribuer significativement.

Il est désormais avéré qu'au moins une partie des *sursauts gamma longs* sont associés à l'effondrement gravitationnel de certaines étoiles massives. On peut en particulier citer l'observation de GRB 030329 par HETE2 en association avec une supernova de type Ic (SN2003dh). De nombreuses questions subsistent quant au moteur central de ces sursauts : dans quelles conditions l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive conduit-il à l'éjection de matière ultra-relativiste ? Quelle est la nature de ce jet ? Dans quelles conditions un sursaut gamma peut-il être associé à une supernova ? La diversité de la population des sursauts gamma, et en particulier l'existence de sursauts gamma peu énergétiques (comme GRB 980425) laissent penser qu'il existe peut-être un continuum d'événements de la supernova classique au sursaut gamma classique. L'interprétation physique des phases d'émission (émission « prompt », rémanence) des sursauts gamma semble plus accessible, mais

de nombreuses observations récentes, en particulier les observations de la rémanence précoce par Swift, montrent clairement que le scénario n'est pas encore parfaitement identifié. De nombreuses questions restent posées : quels sont les sites d'émission de la rémanence, de l'émission prompte (choc externe, chocs internes, autres) ? Quel est le budget énergétique global d'un sursaut gamma ? Quelle est la durée de vie du moteur central ? La communauté française est bien placée avec plusieurs projets passés ou en cours (participation à HETE2, INTEGRAL, Fermi, projet TAROT) et avec le projet de satellite franco-chinois SVOM (2014) qui fédère l'ensemble de la communauté. Ce projet sera consacré à la physique des sursauts et à leur utilisation pour la cosmologie (voir ci-dessous). Les principaux atouts du projet sont une bonne couverture en longueur d'onde de l'émission prompte (optique, X, gamma), une optimisation pour la découverte des sursauts gamma les plus distants, une stratégie de pointage favorisant le suivi au sol lorsque la rémanence est encore brillante. SVOM sera vraisemblablement le seul successeur de Swift et bénéficiera d'un bon contexte instrumental (suivi sol, émission haute énergie avec Fermi et nouvelles générations de détecteurs de nouveaux messagers : ondes gravitationnelles et neutrinos de haute énergie). Un GDRE s'est mis en place en 2009 pour préparer le suivi sol des sursauts gamma SVOM.

Dépassant la seule question des sursauts gamma, il semble évident qu'au-delà d'une certaine masse de cœur, l'effondrement des étoiles massives doit conduire à la formation d'un trou noir stellaire au lieu d'une étoile à neutrons. Dans quelles conditions la formation d'un trou noir stellaire s'accompagne d'une supernova (possibilité d'un effondrement en deux temps ?) ; quelles sont les étoiles parents des trous noirs stellaires ? Quelle vitesse initiale et quelle rotation initiale sont communiquées au trou noir lors de sa formation. Ces questions n'ont encore que des embryons de réponses. En plus des études déjà mentionnées sur les supernovae et les sursauts gamma, on peut également aborder ce sujet par l'étude de la population des trous noirs galactiques, leur dynamique et leur site de formation etc.

La destruction d'une étoile très massive par production excessive de paires électron-positron

Il s'agit d'un mécanisme prédit théoriquement pour des étoiles de faible métallicité dans le domaine de masse 130-250 masses solaires, qui conduit à la destruction complète de l'étoile et se traduirait par une supernova exceptionnellement brillante (environ 10 fois plus brillante qu'une supernova classique). Il n'y a aucune certitude sur l'existence de ces supernovae, même si le mécanisme a été proposé pour expliquer la supernova très énergétique SN 2006gy. La principale question posée reste donc de savoir si les supernovae à instabilité de paires (PISN) se produisent dans la nature. Les étoiles parents attendues font de ces PISNae une signature possible des étoiles de première génération (Pop III) si celles-ci sont effectivement très massives comme le suggèrent certains scénarios. Si l'existence de ces supernovae se confirmait, il conviendrait d'étudier comment tirer parti de leur luminosité exceptionnelle pour explorer l'Univers lointain.

La coalescence des objets compacts

Les observations confirment que les systèmes binaires d'objets compacts existent et perdent de l'énergie par émission d'ondes gravitationnelles. L'exemple le plus célèbre est le système binaire de deux étoiles à neutrons PSR B1913+16. La coalescence de systèmes d'objets compacts doit donc forcément se produire dans la nature. La coalescence de deux étoiles à neutrons est d'ailleurs l'une des sources les plus prometteuses pour les expériences de détection d'ondes gravitationnelles au sol (voir

ci-dessous). Une question astrophysique générale est de connaître le produit final de la coalescence de deux objets compacts. L'effort est actuellement mis sur la modélisation de la coalescence de deux étoiles à neutrons ou une étoile à neutrons et un trou noir. La communauté française est très active dans la construction précise de la structure du système avant la coalescence et également la prédiction des ondes gravitationnelles émises. La coalescence des étoiles à neutrons est également le scénario préféré pour expliquer les sursauts gamma courts. Une observation déterminante serait la détection simultanée d'un sursaut gamma court et d'ondes gravitationnelles. Ceci requiert de disposer d'un instrument capable de détecter les sursauts gamma à l'époque où les grands interféromètres comme Virgo atteindront un seuil rendant possible la détection d'une coalescence. SVOM semble parfaitement bien placé pour cela.

La destruction d'une étoile par effet de marée au voisinage d'un trou noir supermassif

Ce sujet, sur lequel une expertise théorique existe en France, connaît des progrès récents en raison de l'observation en X par Chandra et en UV par GALEX d'événements qui correspondent sans doute à ce phénomène.

3.3.3 La nucléosynthèse explosive

Les conditions physiques dans les explosions stellaires qui viennent d'être décrites permettent une nucléosynthèse particulière. La communauté française est peu investie dans la modélisation proprement dite de cette nucléosynthèse explosive, mais contribue par contre significativement à la mesure en laboratoire de sections efficaces d'intérêt astrophysique, et à l'observation des signatures de cette nucléosynthèse, via en particulier l'observation de l'émission gamma des éléments radioactifs produits. On peut par exemple citer l'étude de l'émission du ^{44}Ti des jeunes restes de supernovae galactiques par INTEGRAL ou la caractérisation fine de l'émission de ^{26}Al dans le disque galactique. La détection des raies gamma nucléaires des restes de supernovae dans les galaxies proches semblent pour l'instant hors de portée avec la sensibilité des instruments actuels. Des projets instrumentaux du type de la « lentille gamma » ou télescope Compton semblent des voies intéressantes pour dépasser cette limite.

3.3.4 Les explosions stellaires comme sources de rayonnement non photonique

La section 3.5 porte sur les nouveaux messagers. On rappelle ici le rôle de sources que peuvent jouer les explosions stellaires.

Neutrinos de basse énergie

Lors de l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive, l'essentiel de l'énergie libérée est rayonnée sous forme de neutrinos. En cas de supernova galactique, une expérience comme Super-Kamiokande détecterait plusieurs milliers de ces neutrinos, permettant d'en faire un spectre.

Neutrinos de haute énergie – Rayons cosmiques

Ces deux questions sont reliées. Il s'agit de savoir si les supernovae (et les sursauts gamma), sont de bons accélérateurs cosmiques. En particulier, si des protons sont accélérés, une émission de neutrinos de haute énergie est également naturellement attendue (ceci est discuté plus en détails dans les sections 3.4 et 3.5). En cas de

détection, cela apporterait naturellement une information intéressante, en particulier sur la nature des particules accélérées.

Ondes gravitationnelles

Les coalescences, en raison de leur haut degré d'asymétrie, sont naturellement les sources les plus prometteuses. La question de l'asymétrie des effondrements stellaires n'est pas réglée, et il est donc légitime de s'interroger également sur la possible émission d'ondes gravitationnelles associées à des supernovae (et/ou sursauts gamma).

3.3.5 Les explosions stellaires comme traceurs cosmologiques

Evolution chimique

En raison de la nucléosynthèse associée, les explosions stellaires jouent un rôle important dans les modèles d'évolution chimique (galactique ou à plus grande échelle). L'identification des progéniteurs (domaine de masse, métallicité, etc.), la mesure du taux, la modélisation fine de l'explosion et de la nucléosynthèse associée ont donc un impact direct sur cet aspect de la modélisation de l'évolution de l'Univers.

Les supernovae de type Ia

Les supernovae de type Ia sont utilisées comme chandelles standards et sont détectables dans l'Univers à grand redshift ($z \sim 1$). Leur diagramme de Hubble a mis en évidence en premier l'accélération de l'expansion de l'Univers. Cette observation cosmologique cruciale doit être une motivation supplémentaire pour une meilleure compréhension de ces phénomènes et de leurs progéniteurs, en particulier pour pouvoir évaluer de possibles biais (évolution de la luminosité par exemple).

Les sursauts gamma

Les sursauts gamma sont exceptionnellement brillants. A condition de se donner les moyens instrumentaux nécessaires (en particulier une capacité de réaction rapide vue leur très courte durée), on peut donc les utiliser pour explorer l'Univers lointain. Le projet SVOM prend en compte les progrès réalisés ces dernières années pour essayer d'optimiser la stratégie instrumentale : détection et localisation en temps réel du sursaut gamma dans l'espace (précision de quelques minutes d'arc, meilleure en cas de détection par un télescope X) ; réaction automatique de « petits » télescopes robotiques (capables d'aller en bandes J, H, K pour les sursauts les plus lointains) pour la détection de la rémanence. La nouvelle localisation (seconde d'arc) permet alors de pointer un grand télescope pour accéder à la spectroscopie. La stratégie de pointage de SVOM est optimisée en fonction de la distribution sur Terre des sites d'observations afin de permettre le plus souvent possible un suivi sol immédiatement après la détection d'un sursaut. Le VLT s'est doté d'un mode de réaction aux alertes en environ 15 minutes, de manière à pouvoir observer la rémanence encore brillante. Un nouvel instrument, X-SHOOTER (avec une participation française), spécialement conçu pour la spectroscopie rapide de ce type de source sera en fonctionnement fin 2009. La détection récente de GRB 090423 à $z=8.2$, ce qui correspond à un Univers âgé seulement de 630 millions d'années, illustre parfaitement la pertinence de cette approche et le potentiel scientifique associé. Les principaux objectifs sont l'étude des galaxies hôtes des sursauts et l'étude du gaz sur la ligne de visée (milieu interstellaire de la galaxie hôte, milieu intergalactique). GRB 090423 prouve que l'époque de la fin de la réionisation est accessible. On peut espérer accéder à une période encore plus ancienne, peut-être même à l'époque de formation des premières étoiles.

3.4 Rayons cosmiques

3.4.1 Contexte et questions majeures

Depuis la découverte des rayons cosmiques par Victor Hess en 1912, la recherche de leurs sources est une quête capitale de l'astrophysique des hautes énergies et de la physique moderne. Nous savons désormais que les rayons cosmiques sont principalement composés de protons et de noyaux lourds. La recherche des signatures de leur accélération (décroissance des pions neutres en rayons gamma, modification morphologique en rayons X, ionisation du milieu interstellaire, neutrinos) et donc de la nature des sources astrophysiques qui les produisent est au centre des recherches de nombreux laboratoires en France et dans le monde. Les électrons, minoritaires (~2 %) mais bien observés, apportent des renseignements clés sur la physique de l'accélération. Le développement instrumental et les afflux de données de ces dernières années de la part d'AMSO1, XMM-Newton, HESS, Fermi et Auger, demandent un effort supplémentaire d'interprétation et de retour scientifique. Les phénomènes mis en évidence sont de plus en plus complexes et couvrent désormais toutes les longueurs d'onde du spectre électromagnétique et toutes les énergies du rayonnement cosmique.

L'observatoire Pierre Auger en Argentine a produit de grandes avancées dans le domaine des ultra hautes énergies confirmant une décroissance du flux compatible avec la coupure Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK) et en mettant en évidence une anisotropie du rayonnement. A plus basse énergie, les derniers résultats expérimentaux ont été marqués par la progression des mesures de composition fine jusqu'à des énergies approchant le TeV par PAMELA et plusieurs ballons stratosphériques tels que BESS, RUNJOB ou bien ATIC. L'expérience Cascade basée à Karlsruhe en Allemagne a permis des mesures sans précédent de la cassure du spectre de rayons cosmiques à quelques PeV (soit 10^{15} eV) aussi appelée genou. Enfin aux plus basses énergies, les sondes Voyager et Pioneer ont traversé ou sont en passe de traverser le choc terminal du vent solaire nous apportant les premières mesures in situ de la composition du rayonnement cosmique dans le milieu interstellaire. A toutes ces nouvelles données d'ici quelques années viendront s'ajouter les données des télescopes neutrinos.

Pour ce qui concerne le travail d'interprétation il s'avère désormais de plus en plus nécessaire d'invoquer des processus de microphysique des plasmas. C'est le cas notamment dans l'étude des mécanismes d'accélération de particules à des énergies très élevées telles que l'on peut les trouver dans les restes de supernovae, les sursauts gamma, les amas de galaxies ou les noyaux actifs de galaxies, autant de sources potentielles du rayonnement cosmique. La physique des plasmas hors équilibre thermodynamique est au centre des recherches d'autres communautés en premier lieu desquelles se trouve celle de la physique solaire (PNST). Au sein de cette communauté ont été développés des outils sophistiqués dédiés à l'étude du vent solaire et des chocs magnétosphériques ou du choc héliosphérique. Le raffinement des modèles d'accélération semble désormais transposable au cas des sources astrophysiques surtout du fait des progrès de la puissance du calcul numérique.

L'influence du rayonnement cosmique a également été quelque peu étudiée jusqu'à présent en ce qui concerne l'évolution des structures dans le milieu interstellaire (amas d'étoiles massives et structures associées, phases du milieu interstellaire, effondrement des nuages moléculaires et formation stellaire...). Des

contacts accrus avec la communauté de la physique-chimie du milieu interstellaire (PCMI) semblent opportuns à ce propos.

Les questions majeures dans ce domaine sont :

- Rayonnement cosmique d'ultra haute énergie ($E > 10^{17}\text{eV}$) :
 - Composition.
 - Sources astrophysiques et processus d'accélération.
 - Propagation dans le milieu intergalactique (effet du champ magnétique).
 - Étude de la transition avec le rayonnement cosmique galactique.
 - Caractérisation et interprétation de l'anisotropie aux plus hautes énergies.
- Origine du rayonnement cosmique galactique ($10^{17}\text{ eV} > E > 1\text{GeV}-100\text{ MeV}$) :
 - Preuve observationnelle des restes de supernovae comme accélérateurs du rayonnement cosmique.
 - Propagation du rayonnement cosmique galactique et émission diffuse galactique.
 - Composition pour des énergies de l'ordre du PeV (genou).
 - Origine du rayonnement cosmique électronique. Fraction de positrons.
 - Spectre et composition des noyaux d'anti-matière.
- Rayonnement cosmique de basse énergie ($1\text{ GeV}-100\text{ MeV} > E$) :
 - Distribution spectrale d'énergie et composition.
 - Nature du rayonnement cosmique anormal.
 - Effet sur la dynamique des structures dans le milieu interstellaire.
 - Etude de l'ionisation et la spallation dans le milieu interstellaire.
 - Production et effet du rayonnement cosmique dans la formation des premières étoiles
- Études des mécanismes d'accélération :
 - Caractérisation observationnelle dans des objets individuels.
 - Développement de modèles théoriques et numériques.

3.4.2 Rayons cosmiques galactiques

Il est généralement admis aujourd'hui que les rayons cosmiques aux énergies $E < 10^{17}\text{eV}$ sont d'origine galactique, cependant aucune source d'accélération hadronique n'a pu encore être identifiée sans ambiguïté dans notre Galaxie. Un bond en avant de nos connaissances a pu être obtenu récemment grâce à l'imagerie radio, X (XMM-Newton, Chandra) et gamma (HESS, MAGIC) des restes de supernovae qui montre la présence de particules très énergétiques. En particulier, l'émission en rayons X a révélé une forte amplification du champ dans les restes jeunes (dont l'âge se compte en centaines ou milliers d'années) à des valeurs de l'ordre de deux ordres de grandeur au-dessus de celles du milieu interstellaire. Une telle amplification pourrait expliquer la production de rayons cosmiques jusqu'aux plus hautes énergies dans les phases primaires de l'évolution du reste de supernova. Les résultats de Fermi sont attendus pour donner en combinaison avec les mesures de HESS et HESS II un début de preuve observationnelle directe de l'accélération de protons (et d'ions) dans les restes des supernovae. La communauté française prend très activement part à ce domaine de recherche, à la fois au niveau observationnel mais aussi au niveau théorique avec la modélisation des phénomènes d'accélération et des émissions diffuses galactiques.

La propagation des rayons cosmiques dans le milieu interstellaire est toujours mal comprise. Là encore les observations de l'émission diffuse dans la Galaxie (Fermi, HESS, HESS II, CTA) pourraient nous permettre de mieux appréhender la diffusion des particules depuis les sources et leurs interactions avec les zones denses du milieu interstellaire (nuages moléculaires). Ces nuages peuvent être actifs dans le sens où ils sont en interaction directe avec le choc des restes de supernovae (c'est le cas notamment de W28 étudié par HESS) ou bien passifs car éloignés et donc illuminés par les rayons cosmiques s'étant échappés des restes de supernovae. Pour cette deuxième catégorie, il n'existe pas encore de sources clairement identifiées, mais plusieurs sources de HESS sans contrepartie pourraient être associées à ce phénomène. Les nuages moléculaires passifs seront l'un des objectifs principaux de CTA.

D'autre part, les observations directes à des énergies de l'ordre de quelques dizaines de TeV menées par CREAM ou celles qui seront menées par AMS02 dans le domaine du GeV au TeV vont mettre à disposition de la communauté des spectres en composition, des spectres angulaires et en énergie d'une précision sans précédent. Ces efforts menés en parallèle aux travaux théoriques sur la nature de la turbulence magnétique dans le milieu interstellaire et le transport des rayons cosmiques vont permettre de mieux contraindre la dépendance en énergie du coefficient de diffusion des rayons cosmiques. Pour cela des contacts accrus avec la communauté de physique solaire et planétaire (PNST) forte de résultats expérimentaux et théoriques sur le transport des particules chargées dans le vent solaire ne pourraient être que bénéfiques.

Enfin les résultats spectaculaires récents de Fermi et de HESS dans la mesure du spectre d'électrons et de positrons dans le domaine du GeV au TeV permettent de sonder les sources astrophysiques locales car les temps de perte par rayonnement synchrotron des particules prohibent une origine lointaine de celles-ci. De même il est attendu dans le futur des mesures par AMS02 à plus haute énergie par rapport au satellite PAMELA de la fraction de positrons, qui devrait permettre de mieux contraindre les modèles de matière noire. Dans la même optique scientifique AMS02 devrait permettre une mesure à plus haute énergie de la fraction d'anti-matière (anti-proton, anti-deutérium et anti-hélium). Là encore l'impact attendu des équipes françaises doit être de premier plan.

3.4.3 Rayons cosmiques d'ultra haute énergie

A plus haute énergie ($E > 10^{19}$ eV), l'origine des rayons cosmiques est extragalactique, avec comme candidats favoris les noyaux actifs de galaxies ou les sursauts gamma. Dans ce domaine, les avancées récentes proviennent de l'observatoire Pierre Auger.

D'abord, Auger a permis de confirmer l'existence d'une suppression du flux au-delà de $\sim 4 \times 10^{19}$ eV compatible avec les prédictions de coupure GZK, signature de l'interaction des rayons cosmiques (protons ou noyaux) avec les fonds de photons extragalactiques (CMB, infrarouge) durant leur propagation. L'interprétation GZK de cette suppression du flux suggère que les rayons cosmiques aux plus hautes énergies nous parviennent de l'Univers local ($< 100-200$ Mpc) du fait de la longueur d'atténuation des rayons cosmiques très réduite à ces énergies. L'observatoire Auger a pu mettre en évidence une anisotropie des rayons cosmiques d'ultra haute énergie ($E > 5,7 \times 10^{19}$ eV) avec un niveau de confiance de 99%. L'interprétation astrophysique de cette anisotropie reste néanmoins assez floue avec la statistique actuelle. Si les études récentes semblent indiquer une corrélation des directions

d'arrivée des rayons cosmiques avec la matière locale (avec par exemple un excès d'événements dans la région de la radiogalaxie Centaurus A et/ou du superamas du Centaure) aucun événement de très haute énergie ne pointe vers Virgo. Aucun « clustering » significatif d'événements (du type de celui qu'AGASA prétend avoir observé) à petite échelle n'est vu pour l'instant. Plus de statistique est nécessaire pour comprendre si cette absence de « clustering » est due à un nombre élevé de sources ou bien à des déflexions magnétiques significatives. Plus de statistique est également nécessaire pour caractériser précisément la corrélation entre les directions d'arrivée et les grandes structures de l'Univers local (ces caractéristiques étant, par exemple, importantes pour estimer les déflexions subies par les rayons cosmiques à ces énergies, ou rechercher des contreparties).

Du point de vue de la composition du rayonnement cosmique aux plus hautes énergies, le résultat récent le plus important est sans nul doute la tendance à l'alourdissement aux plus hautes énergies mise en évidence par l'Observatoire Auger grâce à la mesure du maximum de développement longitudinal des gerbes (X_{Max}) par les télescopes de fluorescence. La comparaison des mesures avec les prédictions des modèles hadroniques semble en effet indiquer que la composition s'alourdit graduellement à partir de la cheville pour devenir relativement lourde vers 3×10^{19} eV (dernier point de mesure). Une interprétation alternative des mesures de X_{Max} pourrait impliquer un comportement de physique hadronique différent des tendances prédites par les modèles aux plus hautes énergies. Les analyses de composition d'Auger sont donc potentiellement très importantes soit par leurs implications astrophysiques (une composition s'alourdissant pointerait vraisemblablement vers la conclusion que la majorité des sources n'accélère pas de protons mais plutôt des noyaux plus lourds jusqu'à 10^{20} eV) ou bien en physique hadronique de très haute énergie.

Notons que les mesures d'anisotropie à haute statistique pourraient fournir un moyen de distinguer les deux types d'interprétation, un « clustering » des événements à petite échelle significatif pourrait, en plus de donner des informations sur l'origine des rayons cosmiques et sur la déflexion magnétique, pointer vers une composition légère. Un « clustering » plus diffus serait quant à lui, compatible avec une composition plus lourde à haute énergie, comme indiquée par la comparaison directe entre les mesures de X_{Max} et les modèles d'interactions hadroniques.

En fin de compte l'existence d'une chute du flux est maintenant établie, l'interprétation de l'évolution de la composition avec l'énergie ainsi que la compréhension de l'origine du rayonnement cosmique à partir de cartes du ciel détaillées demandera plus de statistique et vraisemblablement des observatoires de plus grande acceptance que l'observatoire Pierre Auger.

L'observatoire Auger Nord fondé sur les techniques utilisées dans l'hémisphère Sud mais sur une surface 7 fois plus grande apparaît indispensable à cet effet. Le succès du dispositif expérimental ainsi que les retombées scientifiques majeures déjà obtenues dans le Sud plaident en effet en faveur de l'utilisation d'observatoires hybrides au sol à une plus grande échelle.

La détection des gerbes depuis l'espace fondée sur la détection de la lumière de fluorescence est également une technique très prometteuse pour améliorer la statistique aux plus hautes énergies et pallier la difficulté de concevoir des observatoires toujours plus grands au sol. JEM-EUSO, embarqué sur la station spatiale internationale et dont le lancement est maintenant prévu pour 2015 sera le premier instrument d'envergure à utiliser cette technique. Notons que d'autres techniques de détection des gerbes atmosphériques en tête desquelles la

radiodétection (CODALEMA) pourront être utilisées dont la conception de futurs observatoires pour les plus hautes énergies à plus ou moins long terme.

3.4.4 Rayons cosmiques de basse énergie

Enfin à basse énergie, les sondes Voyager et Pioneer devraient continuer à nous apporter des indications sur le spectre des rayons cosmiques en deçà de la limite imposée par la modulation solaire. La question importante de la nature du rayonnement cosmique anormal vraisemblablement issu de l'ionisation d'atomes neutres au choc terminal de l'héliosphère devrait être éclaircie.

La partie du spectre autour du GeV dans l'environnement du système solaire est en équilibre de pression avec le gaz et le champ magnétique. Ce fait a incité de nombreux travaux sur l'effet des rayons cosmiques sur la dynamo du champ magnétique galactique par l'instabilité de Parker et de l'influence du rayonnement cosmique sur les grandes échelles des structures du milieu interstellaire. Il semble par ailleurs que les sites de production du rayonnement cosmique montrent des activités d'irradiation qui requièrent un flux plus élevé par rapport aux valeurs locales. Ceci implique que des gradients de pression de rayons cosmiques sont attendus dans des zones particulières du milieu interstellaire qui pourraient induire des effets dynamiques substantiels sur les structures à plus petite échelle; celle de la formation stellaire. Le rayonnement cosmique de basse énergie pourrait donc jouer un rôle important dans la formation des étoiles et la dynamique des structures du milieu interstellaire. Au delà du milieu interstellaire galactique ce rôle pourrait être effectif lors de la formation des premières étoiles dans l'Univers jeune.

De plus, les études précises du rayonnement cosmique et du rayonnement solaire prennent une place importante dans la nouvelle discipline de la météorologie solaire. Notons également que les rayons cosmiques de basse énergie produisent des raies d'excitation nucléaires dans le domaine du MeV. Pour l'heure de telles raies ont été uniquement observées dans l'atmosphère solaire. Les travaux théoriques montrent qu'un, voire deux ordres de grandeur de gain en sensibilité sont nécessaires par rapport à INTEGRAL pour espérer voir ce type de signature de spallation dans les zones denses du milieu interstellaire. Une instrumentation adéquate, comme un télescope Compton, pourrait ouvrir cette fenêtre d'investigation à l'avenir.

3.4.5 Mécanismes d'accélération

Un enjeu commun aux différentes composantes du rayonnement cosmique discutées ci-dessus est le mécanisme par lequel les particules qui le composent arrivent à atteindre des énergies bien plus élevées que les températures typiques du plasma dans le milieu interplanétaire, interstellaire ou intergalactique. Il existe de nombreux processus à même de produire de telles distributions hors équilibre thermodynamique. Parmi eux, les mécanismes dits de Fermi occupent une place privilégiée. Ceci s'explique par leur historicité ainsi que par leur efficacité à produire des spectres invariants d'échelle tels que les instruments nous les rapportent.

Une des questions cruciales de l'astrophysique moderne est d'étudier les conditions précises dans lesquelles les chocs non-collisionnels (c'est-à-dire les chocs dont la médiation se fait par des processus électromagnétiques et non par les collisions entre particules) ont la capacité d'accélérer des particules jusqu'aux énergies les plus extrêmes de quelques 10^{20} eV. Il s'avère que la réponse à cette question n'est pas encore tranchée et ce malgré plus de trente ans de recherche intensive.

Pour cela, il est nécessaire d'une part de caractériser l'accélération dans des objets individuels, notamment l'intensité du champ magnétique au choc, l'efficacité du processus (directement ou par la rétroaction des particules accélérées) et sa dépendance au champ magnétique ambiant (configuration quasi-parallèle, quasi-perpendiculaire, isotrope). Les contraintes viennent essentiellement des observations en rayons X (XMM-Newton, Chandra), mais également de l'émission en radio et en gamma. Le projet IXO apportera une bien meilleure caractérisation. D'autre part, il est nécessaire d'étudier la formation, puis la capacité d'un choc à produire une composante du champ magnétique élevée ; au-dessus du champ magnétique moyen du milieu interstellaire. En ce domaine, de nombreux outils numériques (codes cinétiques de type *particle-in-cell* (PIC), codes hybrides, codes magnétohydrodynamiques) ont été développés pour l'étude des chocs planétaires et de l'héliosphère. Cependant la France, bien que possédant ces outils, a pris un certain retard dans leur transposition dans le cadre adapté aux chocs relativistes ou bien des chocs des restes de supernovae. Il semble opportun de réaliser un effort important de soutien de cette thématique lors des prochaines années. Ces études ont, de plus, un horizon plus large que l'origine du rayonnement cosmique ; les chocs relativistes se retrouvent notamment dans toute une série d'objets comme les sursauts gamma, les noyaux actifs de galaxies, les microquasars qui montrent de l'émission gamma encore inexplicée. En parallèle à ces études numériques, un effort sur le développement théorique prenant en compte la génération de fluctuations électromagnétiques est nécessaire pour orienter et interpréter les observations et les simulations numériques. L'ensemble de ces efforts devrait permettre de mettre en place de meilleurs cadres théoriques pour l'étude des sources astrophysiques.

3.5 Nouveaux messagers

3.5.1 Contexte

En astronomie, les photons constituent notre principale source d'information sur l'Univers. Ceux-ci sont étudiés aujourd'hui à travers tout le spectre électromagnétique, de la radio jusqu'aux rayons gamma. Les seuls messagers non photoniques auxquels nous avons accès aujourd'hui sont les échantillons de matière extraterrestre qui tombent sur Terre (ou qui ont été cherchés dans l'espace), les rayons cosmiques (cf. 3.4), les neutrons et le vent de particules qui provient du soleil, et les neutrinos de basse énergie du soleil et de SN 1987A. Les progrès technologiques nous permettent aujourd'hui de concevoir l'exploitation d'autres messagers de l'Univers, comme les ondes gravitationnelles ou les neutrinos de haute énergie. Pour le moment, ces domaines restent exploratoires, avec des progrès notables en instrumentation et en modélisation théorique.

3.5.2 Ondes gravitationnelles

Les enjeux

Le potentiel scientifique lié à la détection des ondes gravitationnelles couvre plusieurs domaines allant de la physique fondamentale à la cosmologie en passant par l'astrophysique.

Les sources astrophysiques d'ondes gravitationnelles sont souvent des systèmes où la gravité est extrêmement forte, avec des mouvements relativistes de masse. Cela fait des ondes gravitationnelles un moyen d'investigation inestimable de la matière et de la géométrie de l'espace-temps dans des conditions extrêmes.

La Relativité Générale prédit que les ondes gravitationnelles voyagent à la vitesse de la lumière et qu'elles possèdent deux états de polarisation. Les tests expérimentaux effectués jusqu'à présent ne permettent pas encore d'exclure d'autres théories de la gravitation comme celle de Brans-Dicke. La vitesse des ondes gravitationnelles pourrait être mesurée en comparant les temps d'arrivée à chaque détecteur et en comparant à celui de signaux électromagnétiques provenant de la même source (par exemple un sursaut gamma). D'autre part, la masse du graviton (qui est nulle pour la Relativité Générale, ce qui implique la propagation à la vitesse de la lumière) pourrait être contrainte en cherchant des distorsions dans la forme d'un « chirp » gravitationnel, par rapport à celle prévue par la Relativité Générale. La détection des modes quasi-normaux des trous noirs permet aussi de tester la validité de la Relativité Générale grâce à la comparaison entre les fréquences et les temps de décroissance mesurés et ceux attendus. En regardant plus loin, la détection des ondes gravitationnelles pourrait confirmer certains modèles de théorie de cordes.

Pour ce qui concerne l'astrophysique, on estime qu'un des candidats les plus probables pour les sursauts gamma courts soit la coalescence de deux objets compacts, système qui est une source intense d'ondes gravitationnelles. La détection des ondes gravitationnelles, en coïncidence avec le signal électromagnétique pourrait permettre de dévoiler la nature du moteur central des sursauts. La détection du signal gravitationnel produit par une supernova pourrait permettre de mieux comprendre le processus d'effondrement et l'équation d'état de la matière nucléaire. En outre, les étoiles à neutrons en rotation rapide peuvent émettre des ondes gravitationnelles si elles développent une asymétrie. La détection des ondes gravitationnelles pourrait

donner des informations sur la nature et l'ordre de grandeur des déformations, mais aussi aider à comprendre la distribution des étoiles à neutrons dans la Galaxie.

Les ondes gravitationnelles pourraient aussi contribuer de façon significative à la cosmologie. Toute la physique présidant à la coalescence d'une binaire d'objets compacts est caractérisée par un petit nombre de paramètres (masses des objets, leur spin et l'excentricité de l'orbite). Tous ces paramètres, ainsi que la distance de luminosité, peuvent être déterminés avec précision à partir de la forme de l'onde. Si le décalage vers le rouge de l'objet peut être déterminé (par l'observation d'un signal électromagnétique provenant de la même source), ces objets constituent alors un nouveau type de chandelles standard.

De plus, la détection d'un fond cosmologique d'ondes gravitationnelles (produites lors des premiers instants de vie de l'Univers ou pendant une transition de phase) est l'un des thèmes majeurs de la cosmologie car elle pourrait apporter des informations uniques sur la dynamique de l'Univers primordial.

Même si les sources attendues sont nombreuses, l'observation gravitationnelle pourrait nous réserver des surprises, des phénomènes inattendus pouvant être observés pour la première fois à travers une émission gravitationnelle.

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles : l'état de l'art

Les dernières années ont été marquées par la mise en service des premiers interféromètres kilométriques, LIGO et Virgo, avec des sensibilités meilleures que $h=10^{-22} / \text{Hz}^{1/2}$ à 100 Hz et très proches des sensibilités de design.

Avec cette sensibilité, Virgo peut détecter une coalescence d'une binaire d'étoiles à neutrons jusqu'à 20 Mpc environ et celle d'une binaire de trous noirs de $10+10$ masses solaires à environ 100 Mpc. Avec ces distances de vue, les taux estimés d'événements sont encore trop faibles pour assurer une détection (environ 1 événement sur 200-300 ans). Les interféromètres Virgo et LIGO ont collecté plusieurs mois de données qui permettent de poser des limites supérieures sur les taux d'occurrence de ces phénomènes astrophysiques.

Concernant les ondes émises par les étoiles à neutrons isolées, il a été possible de poser des limites sur la quantité d'énergie émise par rayonnement gravitationnel par le pulsar du Crabe. La non détection d'un fond stochastique d'ondes gravitationnelles dans la région 100 Hz a permis de déterminer une limite supérieure meilleure que celle dérivant de la nucléosynthèse durant le Big Bang. Enfin la non détection de signaux en association avec le sursaut GRB070201 a permis d'exclure qu'il s'agit d'une coalescence d'étoiles binaires dans la galaxie Andromède.

A cause de la faible amplitude des signaux attendus et de la nécessité de localiser la source dans le ciel, il est impératif de travailler en réseau. En 2007, la LIGO Scientific Collaboration (LSC) et la Collaboration Virgo ont signé un accord de coopération et d'échange des premières données collectées (S5-VSR1).

En juillet 2009, une deuxième prise de données scientifiques commence (S6-VSR2). Une des nouveautés de cette prise de données est d'avoir une reconstruction des événements gravitationnels en temps réel pour pouvoir envoyer la position d'une source dans le ciel et d'y pointer rapidement des télescopes (par exemple, le télescope spatial SWIFT ou les télescopes robotisés TAROT).

Les détecteur d'ondes gravitationnelles : l'horizon 2015

Les sensibilités obtenues par Virgo et LIGO sont au niveau des sensibilités de design. La compréhension exhaustive des bruits des détecteurs et la fiabilité des instruments (cycles utiles supérieurs à 80% pour Virgo) confirment la validité des technologies utilisées et permettent de faire des projections solides sur les futurs détecteurs.

Les détecteurs de deuxième génération, advanced Virgo et advanced LIGO doivent entrer en fonction vers 2015. Ils bénéficient des mêmes infrastructures que les interféromètres de première génération (bâtiments, tubes à vide) mais seront dotés de schémas optiques plus performants, de lasers plus puissants, de suspensions et de miroirs plus perfectionnés. Cela se traduit par une augmentation de la sensibilité par un facteur dix par rapport à Virgo et LIGO et donc un taux d'événements détectables qui sera 1000 fois plus important.

Advanced Virgo pourra détecter des coalescences d'étoiles à neutrons jusqu'à une distance de 325 Mpc. Cela se traduit par des taux de détection pour les coalescences d'étoiles binaires de quelques événements par an pour les modèles les plus pessimistes à une centaine d'événements par an pour les modèles les plus optimistes. Ce qui veut dire une première détection quasiment garantie et la possibilité d'effectuer plusieurs recherches en coïncidence avec d'autres détecteurs électromagnétiques et neutrinos.

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles après 2015 : le projet spatial LISA, les pulsars milliseconde et Einstein Telescope

Les interféromètres spatiaux représentent un complément logique aux interféromètres terrestres, en ayant la possibilité de regarder à très basse fréquence (< 1 Hz), région interdite aux interféromètres terrestres à cause du bruit sismique et des gradients de gravité. Le spectre d'observation de la mission ESA/NASA LISA couvrira de 0.1 mHz à 0.1 Hz, région qui présente une grande richesse de sources, comme les coalescences de trous noirs massifs et les EMRI (extreme-mass ratio inspirals).

Si le lancement de LISA est prévu autour de 2020, celui de la mission technologique LISA pathfinder (étape intermédiaire cruciale pour la suite du projet) est proche, (2011).

Toujours dans le domaine des basses fréquences, la possibilité de détecter les ondes gravitationnelles par les fluctuations dans les signaux radio de plusieurs pulsars milliseconde (PTA) se concrétise. Ces ondes gravitationnelles de très basse fréquence (nHz) pourraient être détectées par l'observation de 20 pulsars en intégrant sur cinq ans et donc dans un intervalle de temps compatible avec l'entrée en fonction d'advanced Virgo et advanced LIGO. A plus long terme, le square kilometer array (SKA), prévu pour 2020, devrait permettre d'étendre la fenêtre spectrale à la région du mHz.

Einstein Telescope est un interféromètre de troisième génération dont le design study vient d'être financé par la communauté européenne. Cet instrument, probablement souterrain, avec des bras de 10 km, et une installation cryogénique pour refroidir les miroirs pourrait entrer en fonction vers 2020-2025, avec une sensibilité 10 fois meilleure qu'advanced Virgo et advanced LIGO et donc un taux d'événements 1000 fois plus important.

3.5.3 Astronomie des neutrinos de haute énergie

Les enjeux

L'astronomie des neutrinos de haute énergie utilise les propriétés uniques de cette particule afin de sonder l'Univers de manière fondamentalement nouvelle par rapport à l'astronomie photonique. Le neutrino est un constituant élémentaire de la matière qui est émis dans les processus nucléaires et dans les interactions entre particules. De part sa nature leptonique et sa neutralité vis-à-vis de l'interaction électromagnétique, le neutrino est une particule uniquement sensible aux interactions faibles avec la matière. Elle rend en quelque sorte l'Univers transparent. Cette propriété qui le distingue des autres messagers implique que les détecteurs de neutrinos doivent être très massifs pour observer un nombre significatif d'interactions. Sa neutralité électrique lui permet d'échapper aux champs magnétiques contrairement aux protons du rayonnement cosmique dont les trajectoires sont courbées durant leur propagation depuis des sources lointaines.

Parce que les neutrinos sont émis lors de processus hadroniques, la localisation d'une source de neutrino de haute énergie indique forcément un accélérateur de rayons cosmiques, ce rayonnement qui bombarde l'atmosphère terrestre en permanence, avec des flux dont l'énergie totale est comparable à ce qui est mesuré pour le flux de photons reçu de toutes les étoiles de l'Univers visible. L'observation de sources de neutrinos de haute énergie peut donc permettre de contribuer à résoudre l'énigme de l'origine de ce rayonnement, vieille de presque 100 ans (cf 3.4).

Les restes de supernovae sont aujourd'hui les sources les plus probables de rayons cosmiques dans la Galaxie. Certaines observations par les télescopes gamma au TeV ont tendance à l'indiquer, mais les photons pouvant être produits par des processus purement leptoniques, aucune conclusion définitive ne peut être tirée quant à l'accélération d'hadrons. Une observation de neutrinos en provenance de tels objets permettrait d'éclaircir les phénomènes mis en jeu. D'autres types d'accélérateurs cosmiques existent également dans notre Galaxie, comme les microquasars ou les pulsars. Au delà de notre Galaxie, la situation est beaucoup moins claire mais les sursauts gamma et les noyaux actifs de galaxies constituent des sources possibles de rayons cosmiques et neutrinos. Pour ces types de sources, une forte absorption des rayons gamma par la matière qui environne la source est envisageable : elles pourraient donc être plus brillantes en neutrinos que prévu. Les photons sont en outre absorbés par le rayonnement diffus (radio, infrarouge) de l'espace intergalactique durant leur propagation.

Si la détection de sources de rayons cosmiques en neutrinos est rendue difficile par la faible probabilité d'interaction de cette particule, les télescopes à neutrinos ont l'avantage de pouvoir observer la moitié du ciel en permanence, contrairement à la plupart des observatoires gamma qui ne peuvent observer que dans un champ de vue limité. Les télescopes à neutrinos présentent donc un avantage certain pour des observations inattendues.

Le neutrino est également un excellent outil pour rechercher la Matière Noire. L'existence de la Matière Noire et sa domination sur la matière ordinaire dans l'Univers est bien établie par de nombreuses observations depuis l'hypothèse d'origine, émise par Zwicky dans les années 1930, pour expliquer la stabilité des amas de galaxies. Cependant la nature exacte de la Matière Noire est encore aujourd'hui inconnue. Si la Matière Noire est composée de WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), ils doivent se condenser au cœur des corps célestes massifs tels que le

Soleil, la Terre et le centre Galactique. Dans certains modèles de Matière Noire, les neutrinos seraient des produits de leur annihilation, qui seraient détectables par les télescopes à neutrinos. La découverte de signaux en provenance du cœur du Soleil, et qui signerait une concentration de Matière Noire, serait un immense progrès dans notre compréhension de l'Univers.

Le présent & l'horizon 2015

Les télescopes à neutrinos qui sont actuellement en fonctionnement utilisent tous le même principe de détection : l'observation de la lumière produite par processus Tcherenkov dans un milieu transparent (eau ou glace) par des particules chargées (principalement des muons) émises suite à une interaction du neutrino dans la matière au voisinage du détecteur. Le détecteur le plus avancé aujourd'hui est IceCube installé dans la calotte glaciaire du Pôle Sud. ANTARES, expérience initiée en France par le CNRS et le CEA, est situé au fond de la mer Méditerranée au large des côtes françaises. De part son emplacement dans l'hémisphère nord, ANTARES observe une région différente de l'Univers par rapport à IceCube, et possède en outre l'avantage de pouvoir découvrir des sources de neutrinos dans la région centrale de la Galaxie, région potentiellement riche en sources de particules de haute énergie. De plus les propriétés optiques de l'eau de mer sont supérieures à celles de la glace, ce qui permet une bien meilleure résolution angulaire sur la localisation de sources de neutrinos.

La construction d'ANTARES a pris fin en mai 2008 et le détecteur a enregistré un grand nombre de données de très bonne qualité. Les toutes premières analyses réalisées avec un détecteur à moitié complet en 2007, et seulement 6 mois de données, montrent qu'Antares surpasse déjà en sensibilité toutes les mesures faites en neutrinos depuis l'hémisphère nord à ce jour. La prochaine étape est le projet KM₃NeT qui vise un volume instrumenté de plus d'un km³ pour un détecteur sous-marin en mer Méditerranée et dont le Technical Design Report sera publié prochainement. Ce télescope devrait améliorer d'un facteur 30 la sensibilité actuellement accessible avec ANTARES dans la gamme d'énergie du TeV-PeV, offrant ainsi une vue inégalée en neutrino du ciel de l'hémisphère sud.

Prospectives aux plus haute énergies

Aux plus hautes énergies (100 PeV et au-delà), les neutrinos peuvent être générés par les interactions GZK de protons du rayonnement cosmique de ultra-haute énergie. Leur détection nécessite des détecteurs de taille encore plus importante, faisant appel à des techniques nouvelles :

Optique : il s'agit d'identifier des gerbes atmosphériques horizontales initiées par des interactions profondes dans l'atmosphère. Avec un instrument du type Auger, la fenêtre en énergie optimale est 0.1-10 EeV, avec une masse effective de l'ordre de 1 à 20 Gigatonnes, qui peut être augmentée dans le cas des neutrinos tau, qui possèdent une signature particulière. Aux énergies les plus extrêmes, un détecteur spatial peut être utilisé, qui permet d'observer un plus grand volume. C'est le cas dans JEM-EUSO (horizon 2015) dont les miroirs détectent la lumière de fluorescence de l'Azote excité par l'interaction des neutrinos. La masse monitorée correspondante pourrait être de l'ordre de 10 Teratonnes, pour un seuil en énergie de l'ordre de 10 EeV.

Acoustique : cette technique prometteuse est encore en phase de R&D. Elle repose sur la perte d'ionisation dans les cascades transformée en chaleur. La rapide

expansion qui s'ensuit résulte en une courte onde acoustique impulsionnelle. La densité spectrale du signal est maximum à 20 Hz, où la longueur d'atténuation de l'eau de mer et de la glace est de l'ordre de quelques kilomètres, contre quelques dizaines de mètres pour la lumière Tcherenkov. Des détecteurs acoustiques pourraient entourer les détecteurs optiques sous-marins, et étendre leur sensibilité aux plus hautes énergies. Un tel système de détection (Amadeus) est actuellement installé et en phase de test dans le télescope ANTARES.

Radio : les cascades électromagnétiques générées par les interactions de neutrinos émettent de la lumière Tcherenkov cohérente, présente aussi dans le domaine radio. Le signal est proportionnel à E^2 , ce qui rend cette technique intéressante à haute énergie. Des longueurs d'atténuation de plusieurs kilomètres peuvent être atteintes dans la glace et le sel. Il suffit donc de rechercher des pulses radios en observant la glace (RICE ou ANITA, expérience ballon au Pôle Sud, FORTE), ou des particules traversant la Lune (GLUE, LOFAR, NuMoon). A noter aussi le développement de la détection Radio sur le site Auger-Sud, par les physiciens de la Collaboration française CODALEMA.

Ces observations aux plus hautes énergies sont prometteuses pour étudier des signaux potentiels de nouvelle physique au-delà du modèle standard de la physique des particules, ainsi que les signaux d'origine GZK.

Vers des observations multi-messagers

La mise en évidence du caractère astrophysique d'un neutrino détecté par ANTARES, IceCube ou le télescope développé par KM₃NeT, est un défi scientifique. Une des possibilités pour une signature non équivoque réside dans l'observation simultanée d'un signal provenant d'un autre instrument. Outre la confirmation de la détection, ces observations multi-messagers ont l'avantage, tout comme les études multi-longueurs d'ondes, de fournir des informations uniques sur les processus internes des sources astrophysiques à l'origine de ces émissions de haute énergie. Le projet TaToO, émanant d'ANTARES, vise ainsi à la recherche et au suivi de contreparties optiques de signal neutrinique (censé devancer le signal optique pour nombre de sources), en collaboration avec les télescopes Tarot. Des alertes sont envoyées, avec un faible taux, vers ces télescopes optiques, lorsqu'un doublet de candidats neutrinos dans une courte fenêtre en temps ou un neutrino unique de très haute énergie, est détecté par ANTARES, pour identification et suivi de la source probable. Là encore, la découverte d'une contrepartie optique à un candidat neutrino observé par un télescope à neutrinos permet de valider l'origine non atmosphérique d'une telle particule. Les processus d'accrétion et d'éjection se manifestant aussi sous la forme d'émission X et radio, il est question d'élargir ce système d'alertes à des télescopes/satellites X ou radio.

Le projet GWHEN quant à lui, émanant d'ANTARES et Virgo/LIGO, vise à effectuer une analyse conjointe neutrinos de haute énergie/ondes gravitationnelles impulsives, en provenance de sources telles que des microquasars, des soft-gamma repeaters ou encore des sursauts gamma. Une telle détection coïncidente permettrait tout d'abord de valider les détections gravitationnelles et neutriniques, et d'apporter des informations uniques sur la dynamique interne des objets visés (processus d'accrétion et d'éjection par exemple). A plus long terme, de telles coïncidences permettent des études de physique plus fondamentale (gravité quantique). De telles corrélations seront possibles dès 2009 avec la prise de données conjointes de

Virgo/LIGO (VSR2 et S6) et d'ANTARES 12 Lignes, et à partir de 2015 avec le fonctionnement du télescope km³ en Méditerranée et des interféromètres Advanced Virgo/Advanced LIGO.

4 Moyens

4.1 Contexte

L'étude des phénomènes cosmiques de haute énergie nécessite un large spectre de moyens d'observation qui comprend des télescopes à rayons X et gamma dans l'espace, des observatoires Tcherenkov au sol pour l'observation du ciel gamma de très haute énergie, des observatoires radio ainsi que des détecteurs pour la détection des messagers non-photoniques comme les rayons cosmiques, les ondes gravitationnelles et les neutrinos. Des simulations numériques lourdes sont également parfois nécessaires. Elles demandent des moyens de calcul importants qui dépassent parfois ceux disponibles dans les laboratoires.

Le tableau suivant résume pour chacune des 5 thématiques scientifiques les moyens observationnels existants et futurs dans lesquels la France a une implication instrumentale.

	L'Univers comme laboratoire	Objets compacts et leur environnement	Phénomènes explosifs	Rayons cosmiques	Nouveaux messagers
Instruments existants	Fermi HESS INTEGRAL XMM-Newton	Fermi HESS INTEGRAL Nançay LOFAR SWIFT XMM-Newton X-SHOOTER*	Fermi INTEGRAL LOFAR SWIFT XMM-Newton X-SHOOTER*	Auger Sud CREAM (ballon) Fermi HESS CODALEMA	Virgo ANTARES
Nouveaux instruments	AMS-02 CTA IXO SVOM	CTA IXO LISA SKA SVOM	GFT* IXO SVOM	AMS-02 Auger Nord CTA JEM-EUSO	Advanced Virgo Einstein Telescope KM ₃ NeT LISA

Tableau 1 : Moyens d'observation dans le domaine de l'astrophysique des hautes énergies. Les moyens d'accompagnement qui ne servent pas spécifiquement à l'observation des phénomènes de haute énergie sont marqués avec un astérisque.

4.2 Évolutions & développements instrumentaux

4.2.1 Astronomie X

Avec l'abandon du projet Simbol-X, l'astronomie X en France se voit dépourvue de perspective instrumentale à court et moyen terme. Il semble urgent que la communauté de l'astronomie X française se mobilise pour participer aux projets futurs qui existent dans ce domaine comme NuStar (Etats-Unis), le polarimètre X (Etats-Unis), ASTRO-H (Japon) et eROSITA (Russie-Allemagne) afin de maintenir son expertise dans ce domaine. A long terme, la participation de la communauté française au projet IXO est indispensable.

Depuis 1997 (découverte des rémanences des sursauts gamma), l'étude des sursauts gamma est un sujet très actif de l'astrophysique des hautes énergies. La compréhension physique de ces phénomènes progresse, en particulier grâce à un meilleur suivi temporel (étude de la rémanence précoce par Swift) et spectral (étude de l'émission gamma de haute énergie par Fermi). L'utilisation des sursauts gamma comme sondes de l'Univers lointain est également de plus en plus envisagée. Leur potentiel dans ce domaine a été récemment confirmé par la découverte de plusieurs sursauts au-delà de $z=5$ (y compris un sursaut à $z=8,2$ en 2009). Le sujet des sursauts gamma s'élargit donc et porte désormais sur des questions relevant de plusieurs domaines allant de la physique stellaire à la cosmologie. Même la physique fondamentale est concernée (avec par exemple l'utilisation des sursauts observés par Fermi pour contraindre l'échelle de la gravité quantique). La communauté française est bien investie dans l'étude des sursauts gamma depuis de nombreuses années, tant au plan de l'observation (avec en particulier récemment l'implication dans les projets TAROT, HETE2, INTEGRAL, Fermi, X-SHOOTER) qu'au plan de la modélisation. Cet effort va continuer dans les années à venir autour d'un projet fédérateur, le satellite franco-chinois SVOM. Les instruments développés pour SVOM tiennent compte des progrès récents et d'une meilleure compréhension de la chaîne instrumentale complexe qui doit se développer de l'espace vers le sol pour une observation optimale des sursauts et de leurs rémanences, en particulier en ce qui concerne les sursauts les plus lointains. Il convient d'accompagner le projet SVOM des moyens adéquats pour le suivi des sursauts au sol, afin de garantir le meilleur retour scientifique à la communauté française.

4.2.2 Astronomie gamma

L'astronomie gamma est actuellement en plein essor, en particulier grâce aux télescopes HESS au sol et Fermi et INTEGRAL dans l'espace dans lesquels la communauté française est fortement impliquée. C'est probablement le domaine où l'interaction entre physiciens des particules et astrophysiciens est aujourd'hui la plus forte en France. Le projet CTA qui est hautement prioritaire dans les feuilles de route ASTRONET, ASPERA, ESFRI et du CNRS s'inscrit dans la prolongation du succès scientifique de HESS, avec un changement majeur qui est le passage d'une expérience PI (pour le projet HESS) à un observatoire ouvert à la communauté scientifique (pour le projet CTA). Dans ce contexte d'ouverture, CTA bénéficiera certainement d'une implication encore plus importante de la communauté astronomique française, avec son expérience de la gestion des grands observatoires et des données publiques.

Les développements en astronomie gamma sont encore relativement rapides et on peut espérer la mise en service de CTA sur une échelle de temps raisonnable. Avec une sensibilité dix fois meilleure que les instruments actuels, CTA devrait permettre de détecter plus d'un millier de sources dont de nombreuses nébuleuses de pulsars, binaires et noyaux actifs de galaxies.

4.2.3 Détection des rayons cosmiques

La détection des rayons cosmiques comme messagers de l'Univers a connu récemment des progrès significatifs apportés par l'observatoire Auger Sud (coupure GZK, anisotropie des rayons cosmiques). Cependant, la possibilité d'une astronomie

des rayons cosmiques (observations des sources des rayons cosmiques grâce à la mesure de la direction d'arrivée des particules) reste une question en suspens. L'utilisation des rayons cosmiques pour mener des études astronomiques nécessite une bien meilleure statistique d'événements. Pour cette raison, il est indispensable de continuer l'exploitation d'Auger Sud afin d'obtenir une vision plus claire du potentiel scientifique des observations. Il semble néanmoins qu'une prochaine génération d'observatoires de plus grande acceptance tels Auger Nord ou JEM-EUSO sera nécessaire pour tenter de comprendre le ciel à ultra-haute énergie.

Des progrès récents dans la radiodétection des gerbes électromagnétiques (projet CODALEMA) sont prometteurs et la continuation des efforts de développement est souhaitable pour l'avenir de la détection des rayons cosmiques.

4.2.4 Détection des neutrinos de haute énergie

La détection de neutrinos de haute énergie provenant de sources astrophysiques est un objectif majeur de la communauté « astroparticules ». Après les expériences ANTARES et AMANDA, la prochaine génération de détecteurs est censée permettre pour la première fois cette détection. IceCube (successeur d'AMANDA) est actuellement dans sa phase de déploiement au pôle Sud. Le projet européen KM3NeT (inscrit sur les feuilles de route ASTRONET, ASPERA, ESFRI) est étudié comme successeur d'ANTARES pour une installation dans les fonds marins. IceCube et KM3NeT seront complémentaires sous l'hypothèse que les deux sont capables de détecter des neutrinos astrophysiques car ils explorent deux hémisphères différents du ciel.

4.2.5 Détection des ondes gravitationnelles

La détection des ondes gravitationnelles est un enjeu majeur pour tester la Relativité Générale et pour étudier les phénomènes violents dans l'Univers liés aux déplacements de masses importantes (coalescence de trous noirs, explosions d'étoiles, sursauts gamma, etc.). L'expérience Virgo, et sa version améliorée Advanced Virgo, est une voie très prometteuse pour atteindre ce but dans un avenir proche. Son développement doit donc être poursuivi vigoureusement. Le développement de la prochaine génération d'instruments doit être préparé.

4.2.6 Moyens d'accompagnement

Le VLT et l'ELT ne répondent que partiellement aux besoins de suivi des sources étudiées en astrophysique des hautes énergies. Ce suivi nécessite des observations régulières ou coordonnées avec d'autres instruments sur de longues périodes de temps et/ou sur des objets transitoires et/ou avec un temps de réponse court. Pour beaucoup, ces objets de magnitude 12-20 sont trop lumineux pour un 8m et trop faibles pour les petits télescopes robotiques ou amateurs (nonobstant une instrumentation inadaptée). Il est absolument indispensable d'avoir accès à des télescopes de 2 à 4 mètres robotisés avec un mode de fonctionnement souple. Le GFT accompagnant la mission SVOM avec une instrumentation IR en est un excellent exemple.

Cela dit, il ne faut pourtant pas négliger les grands télescopes comme le VLT qui restent très utiles pour certains aspects du suivi des objets à haute énergie, comme par exemple la spectroscopie fine de la rémanence des sursauts gamma (instrument X-SHOOTER). Cette spectroscopie fine est particulièrement utile pour la cosmologie (milieu intergalactique par exemple), mais peut également aider à mieux identifier les progéniteurs des sursauts.

L'implication de la communauté française de l'astrophysique des hautes énergies dans les projets radio comme LOFAR et SKA (le dernier est inscrit dans les feuilles de route ASTRONET & ESFRI) reste pour le moment assez modeste. Cependant, les thématiques « hautes énergies » de LOFAR & SKA sont particulièrement bien représentées en France, pour tout ce qui touche aux sources à jets ou aux plérions (avec l'exploitation des données de Fermi et HESS par exemple). Il est important que la communauté française saisisse le potentiel scientifique de ces instruments et qu'elle se structure afin de participer activement à leur exploitation scientifique.

5 Liens thématiques

Le domaine de l'astrophysique des hautes énergies se caractérise par ses nombreux liens avec les autres thématiques de l'astrophysique française. Même si ces liens existent, un effort particulier est nécessaire pour dynamiser les relations entre les différentes communautés impliquées :

Physique et Chimie du Milieu Interstellaire

- Rayons cosmiques et leurs rôles dans la formation et la dynamique des structures du MIS et de l'astrochimie, émissions diffuses
- Champs magnétiques galactiques et transport des particules chargées
- Les sursauts gamma comme sondes du MIS des galaxies jeunes

Cosmologie et Galaxies

- Les sursauts gamma comme sondes de l'Univers lointain
- L'étude des noyaux actifs de galaxies et leur impact sur leur environnement
- La nature de la matière noire

Physique Stellaire

- Formation et évolution des objets compacts galactiques
- Nucléosynthèse stellaire et astronomie gamma nucléaire
- Physique des disques

Physique des Plasmas et Soleil

- Physique des chocs non-collisionnels
- Transport de particules
- Émission à haute énergie du soleil

Physique nucléaire:

- Équation d'état de la matière nucléaire (étoiles à neutrons)
- Taux de capture électroniques (supernovae gravitationnelles)
- Réactions des neutrinos dans la matière nucléaire (SN gravitationnelles)

6 Recommandations

6.1 *Recommandations structurelles*

Le domaine de l'astrophysique des hautes énergies est en pleine évolution car les frontières traditionnelles entre astronomes, astrophysiciens, physiciens de particules et physiciens nucléaires sont en train de disparaître. Même si ces changements sont souvent une question de génération, on voit naître une nouvelle génération de chercheurs pour qui la différence entre ces multiples domaines n'existe plus. Ainsi, d'une rencontre entre différentes voies de recherche une nouvelle discipline est en train de poindre. Les différents instituts du CNRS impliqués dans cette discipline (INSU, IN2P3, INP) ainsi que le CEA doivent tout mettre en œuvre pour maintenir ensemble cette nouvelle dynamique.

Pendant 9 ans, le GdR PCHE et le programme interdisciplinaire Particules & Univers (PID P&U) ont servi à l'émergence de cette nouvelle discipline. Le PID P&U ainsi que le GdR PCHE vont arriver à échéance en 2012 et la question de la pérennité de leurs actions se pose. Une solution sera la création d'un programme national « Hautes Energies » à l'instar des autres programmes nationaux qui existent à l'INSU (et en particulier à l'instar du Programme National Cosmologie et Galaxies (PNCG) qui réunit déjà aujourd'hui les chercheurs de l'INSU, de l'IN2P3, de l'INP et du CEA). Quelle que soit la solution envisagée, il conviendrait de garder une structure réunissant les instituts concernés avec un conseil scientifique interdisciplinaire à l'image de ce qui existe actuellement. Ainsi, cette discipline aura le cadre et les moyens de poursuivre son plein développement.

6.2 *Recommandations sur les moyens*

S'investir sans délai dans la réalisation de CTA et advanced Virgo

Dans les dernières années, les télescopes Tcherenkov HESS, MAGIC et VERITAS ont dévoilé un ciel gamma de très haute énergie extrêmement riche et plein de surprises. La technologie actuelle permet aisément une amélioration significative des performances scientifiques (sensibilité, résolution angulaire) pour un coût acceptable, garantissant une science novatrice dans le domaine des phénomènes cosmiques de haute énergie. Le développement de CTA est incontournable.

La détection des ondes gravitationnelles est un enjeu majeur pour tester la Relativité Générale et pour étudier les phénomènes violents dans l'Univers liés aux déplacements de masses importantes (coalescence de trous noirs, explosions d'étoiles, sursauts gamma, etc.). L'expérience Virgo (et sa version améliorée Advanced Virgo) semble une voie très prometteuse pour atteindre ce but dans un avenir proche, donc son développement doit être poursuivi vigoureusement avant le développement de la prochaine génération d'instruments (e.g. Einstein Telescope).

Poursuivre tant que cela est techniquement réalisable l'exploitation de XMM-Newton, INTEGRAL et Fermi

Le franchissement d'étapes significatives dans les performances exige des instruments de plus en plus complexes et des investissements de plus en plus

coûteux, ce qui accroît inévitablement les délais entre la mise en exploitation de nouveaux observatoires. Il est donc indispensable dans ce contexte de poursuivre tant que cela est techniquement réalisable l'exploitation des grands instruments : XMM-Newton, INTEGRAL et Fermi.

Développer un télescope robotique dans la classe des 2m pour accompagner la mission SVOM par un suivi sol des sursauts gamma dans l'infrarouge

VLT et ELT ne répondent que partiellement aux besoins de suivi de l'astrophysique des hautes énergies qui nécessite des observations régulières ou coordonnées avec d'autres instruments sur de longues périodes de temps et/ou sur des objets transitoires et/ou avec un temps de réponse court. Pour beaucoup ces objets de magnitude 12-20 sont trop lumineux pour un 8m et trop faibles pour les petits télescopes robotiques ou amateurs (nonobstant une instrumentation inadaptée). Il est absolument indispensable d'avoir accès à des télescopes de 2m-4m robotisés avec un mode de fonctionnement souple. Le GFT accompagnant la mission SVOM avec une instrumentation IR en est un excellent exemple.

Participer au développement du futur grand observatoire en rayons X IXO

Le futur grand observatoire en rayons X promet des avancées significatives dans de nombreux domaines de l'astrophysique des hautes énergies comme l'étude des trous noirs à grand redshift et de la matière sous conditions extrêmes. La France a la capacité de jouer un rôle important dans le développement d'IXO et il convient de s'assurer qu'elle y participe d'une manière significative.

Mener des R&D pour l'instrumentation de l'astronomie du MeV afin de relancer le développement de l'astronomie gamma nucléaire

Pour le domaine de l'astronomie gamma du MeV, une amélioration significative de la sensibilité instrumentale reste un préalable incontournable à tout progrès scientifique. Pourtant, ce domaine est essentiel car il est à la jonction entre rayonnement thermique et non-thermique et ouvrirait des perspectives très intéressantes pour l'étude des objets compacts. De plus, la présence des raies gamma nucléaires dans cette gamme d'énergie rend ce domaine unique pour l'astrophysique nucléaire ainsi que pour l'étude des processus d'annihilation électron-positron. Un renforcement en recherche et développement dans le domaine de l'astronomie gamma du MeV est donc à encourager afin de permettre une évolution dans ce domaine comparable à ce que connaît l'astronomie gamma aux plus hautes énergies.

Participer au développement d'instruments capables de mesurer la polarisation en X ou en gamma

La polarimétrie haute énergie fait l'objet de nombreux développements, inspirés sans doute par les sursauts gamma. Cet outil peut apporter, en complément des études temporelles et spectrales, une information sur la nature de l'émission (synchrotron), sur la géométrie de l'accrétion (inclinaison du disque), de l'éjection (topologie du champ magnétique), ainsi que certaines propriétés de l'objet compact, telles que le

spin. La polarisation fait l'objet d'une activité théorique croissante. Les simulations montrent par exemple que les effets de Relativité Générale influencent la polarisation de l'émission thermique d'un disque d'accrétion autour d'un trou noir. La mesure de la polarisation en rayons X semble donc une autre piste prometteuse qui pourra déboucher sur des réalisations instrumentales.

6.3 Recommandations scientifiques

Encourager en France la modélisation des supernovae gravitationnelles

Longtemps absente de cette activité, la communauté française est à nouveau en position d'y contribuer significativement. Le nombre de chercheurs concernés reste faible et il convient de l'aider à grossir.

Renforcer les contacts entre la communauté astrophysique et les communautés nouveaux messagers (ondes gravitationnelles, rayons cosmiques d'ultra haute énergie, neutrinos) afin de préparer l'exploitation scientifique des premières détections

Les prochaines années verront probablement la première détection des ondes gravitationnelles, soit – mais avec une faible probabilité – par Virgo et LIGO, ou avec une plus forte probabilité par advanced Virgo et advanced LIGO (2015). La mission LISA pathfinder, en 2011 devrait confirmer les choix technologiques de LISA, dont le lancement est prévu pour 2020. Les cinq prochaines années seront cruciales pour renforcer les contacts nécessaires entre la communauté des ondes gravitationnelles et celle de l'astrophysique. Les stratégies d'observation s'appuyant sur plusieurs messagers (incluant les ondes gravitationnelles) joueront vraisemblablement un rôle important dans l'optimisation des chances de détection et dans la meilleure compréhension des phénomènes en jeu.

Encourager les collaborations multidisciplinaires sur l'étude du rayonnement cosmique et de son impact sur le milieu interstellaire ou planétaire

Le rayonnement cosmique de basse énergie joue un rôle dans des domaines très divers tels que : l'irradiation cométaire, l'astrochimie, et les études des climats. Ce domaine encore largement inexploité devrait faire l'objet de collaborations accrues entre différents programmes de l'INSU (PCMI, PNST, PNPS) et le GDR PCHE par le biais de rencontres communes ou de projets croisés de type ANR.

Soutenir la communauté française naissante impliquée dans la compréhension des processus physiques fondamentaux dans les disques en liaison avec le PNPS

Dans l'étude des flots d'accrétion, des passerelles se sont créées vers des groupes de physique étudiant expérimentalement les flots cisailés hydro ou magnétohydrodynamique, ce dernier cas pour mettre en évidence un effet de dynamo (planètes, Soleil). La communauté française dans le domaine de la simulation numérique s'est développée au cours de ces dernières années, notamment via la

formation et le recrutement de jeunes chercheurs. Cet effort doit absolument être poursuivi en coordination avec la communauté de physique stellaire.

Stimuler les échanges avec la communauté plasma et PNST sur les chocs non-collisionnels, en particulier autour de l'utilisation de codes numériques susceptibles de modéliser les processus d'accélération de particules

Pour comprendre l'accélération de particules dans les chocs non-collisionnels, les codes PIC (« particle in cell ») permettent maintenant d'aborder le phénomène par le biais de la simulation numérique. Quelques liens existent avec la communauté plasma et magnétosphère à l'origine de ce type de code. Ce domaine de recherche connaît une évolution très rapide et devrait faire le lien dans un futur proche entre processus physiques fondamentaux et modélisation radiative des observations, au moins en ce qui concerne l'accélération des électrons/positrons.

Maximiser le retour scientifique de SVOM et X-SHOOTER en soutenant la préparation des observations « sursauts gamma » mais aussi du programme d'observations hors sursauts

La communauté française des sursauts gamma est déjà bien fédérée par le projet SVOM. Le suivi au sol des alertes doit être préparé au mieux. Le GDRE « Exploring the Dawn of the Universe with Gamma-Ray Bursts » qui a débuté en 2009 devrait y contribuer. Il convient également d'agir pour étendre la communauté sursauts gamma traditionnelle vers les communautés susceptibles d'être concernées par leur rôle de traceurs de l'Univers distant. Une action avec le PNGC pourrait être envisagée à ce sujet.

Renforcer l'implication de la communauté française dans l'exploitation scientifique de futurs télescopes radio

L'observatoire LOFAR est un outil intéressant pour compléter les études des processus cosmiques de haute énergie menées dans les domaines X et gamma ou par détection de rayons cosmiques. Pour la première fois une surveillance globale du ciel radio est possible avec un potentiel important pour les phénomènes transitoires (pulsars, sursauts gamma...). Pour le moment, l'implication de la communauté française hautes énergies dans le projet reste assez limité et il convient de la renforcer pour garantir une bonne exploitation scientifique de l'instrument.