



Document PNHE de prospective INSU

Guillaume Dubus, Catherine Boisson, et le conseil scientifique du PNHE: Denis Allard, Jean Ballet, Pierre Brun, Frédéric Daigne, Thierry Foglizzo, Berrie Giebels, René Goosmann, Jürgen Knödlseeder, Antoine Kouchner, Marianne Lemoine-Goumard, Benoit Mours, Thierry Stolarczyk, Jean-Philippe Uzan

L'astrophysique des hautes énergies étudie les phénomènes les plus extrêmes dans l'Univers : explosions des étoiles; nature, formation et évolution des objets compacts; accélération de particules à des énergies relativistes; émission d'ondes gravitationnelles; création de neutrinos de haute énergie, etc. Les observations s'étendent à tout le spectre électromagnétique ainsi qu'aux messagers non-photoniques. L'observation de contreparties X et γ est souvent essentielle afin de comprendre la physique extrême qui est à l'oeuvre.

L'astrophysique des hautes énergies est un domaine interdisciplinaire qui réunit des physiciens des particules, des physiciens nucléaires, et des astrophysiciens. Comprendre l'accélération de particules et leurs interactions avec la matière fait appel à la physique des particules ainsi qu'à la physique des chocs astrophysiques et du milieu interstellaire. Étudier la matière dense dans les étoiles à neutrons réunit physiciens nucléaires et astrophysiciens. La nucléosynthèse explosive requiert des connaissances en évolution stellaire, physique nucléaire et astronomie gamma. Les observatoires mis en place pour détecter les rayons de plus hautes énergies sont fondés sur les méthodes de détection propres à la physique des particules, et leur exploitation requiert des connaissances en physique de particules et/ou en physique nucléaire.

Créé en 2012, suite à la prospective INSU, le [*Programme National Hautes Énergies*](#), est soutenu par le CNES, le CNRS/INSU, le CNRS/IN2P3 et le CEA/IRFU. Le PNHE est structuré autour de cinq thèmes : l'univers comme laboratoire, les objets compacts et leur environnement, les phénomènes explosifs, les rayons cosmiques, les nouveaux messagers.

1) Faits saillants

Trois faits saillants impliquant la communauté française ressortent sur la période 2010-4 : la moisson de résultats γ de *Fermi*, la découverte d'un candidat trou noir de masse intermédiaire, les connaissances acquises sur l'activité du trou noir central de notre Galaxie.

La moisson de résultats de l'observatoire γ Fermi

Le satellite de la NASA *Fermi* a été lancé en juin 2008. L'instrument principal, le LAT, détecte les rayons γ du GeV. Il balaie le ciel en permanence et fournit à la fois des alertes et un relevé complet (Figure 1). Les laboratoires français (IN2P3, INSU et CEA) sont particulièrement impliqués dans les résultats très visibles que sont les catalogues : catalogue général (le « 2FGL », 2012, ApJS, 199, 31 est la publication de 2012 la plus citée en astrophysique; le prochain, contenant 3000 sources γ , sera publié en 2014) ; AGN ; pulsars ; sursauts γ . Plus de 500 sources ont été détectées au-delà de 10 GeV et servent de référence pour les observations au TeV aujourd'hui et demain (CTA). Ces catalogues permettent de passer de l'étude de sources à l'étude de populations. L'ampleur, la variété et l'impact des résultats sont majeurs: le « h-index » des papiers publiés depuis 2010 par la collaboration *Fermi* est supérieur à 50.

Parmi ces résultats, la détection de plus de 50 pulsars milliseconde, dont beaucoup n'étaient pas connus au préalable, est un résultat particulièrement marquant associant les γ et la radio avec une contribution française clef (chronométrage, observations Nançay). L'émission provient de la magnétosphère externe, selon un mécanisme sans doute commun aux pulsars jeunes mais pas encore bien élucidé. Ces détections enrichissent fortement le catalogue de pulsars très stables nécessaire à l'élaboration d'un détecteur d'ondes gravitationnelles par chronométrage (EPTA).

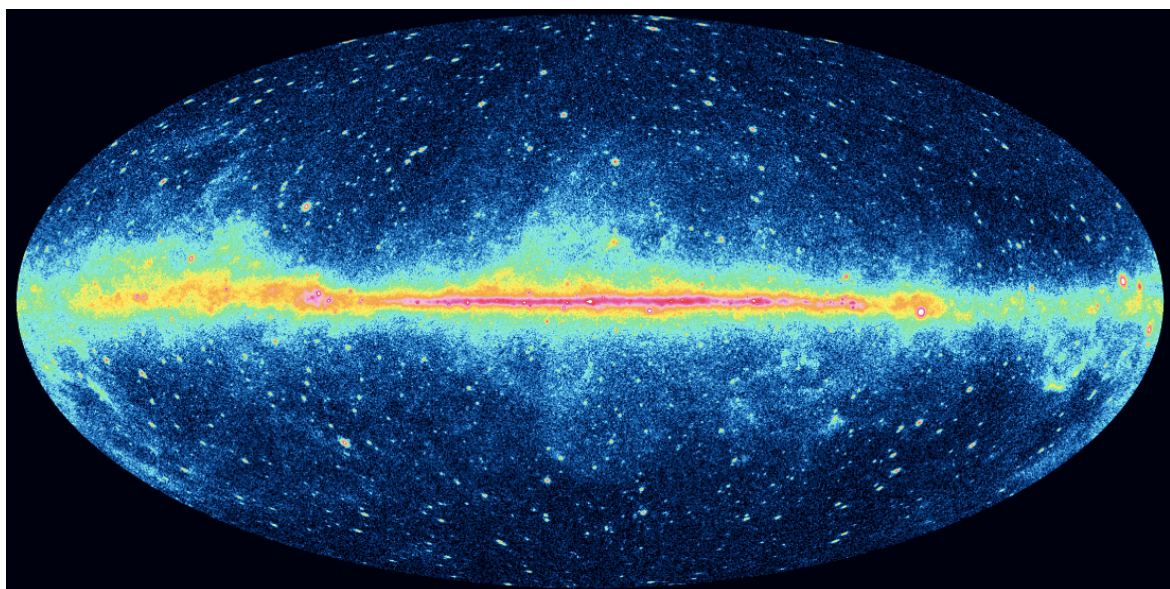


Figure 1: Carte du ciel au-delà de 1 GeV en coordonnées Galactiques. L'émission interstellaire, les pulsars brillants et les blazars extragalactiques sont bien visibles.

Un autre résultat marquant associé aux équipes françaises est la détection de galaxies proches (LMC, M31), indiquant que l'accélération de rayons cosmiques est un phénomène général associé à la formation d'étoiles (aux supernovae). Cette corrélation se poursuit avec les galaxies à flambée d'étoiles, dont la luminosité γ est proportionnelle aux luminosités infrarouge et radio. Ces galaxies contribuent sans doute au moins autant que les noyaux actifs au fond diffus γ .

Les sources X ultra-lumineuses et le meilleur candidat trou noir de masse intermédiaire

Les sources X ultra-lumineuses (ULXs) ont des luminosités $L_X > 10^{39}$ erg/s tout en étant situées hors du noyau de leur galaxie hôte. Ces fortes luminosités peuvent être expliquées soit par accréation « super-Eddington » sur un trou noir de masse stellaire ($< 100 M_\odot$), soit par accréation « sous-Eddington » sur un trou noir de masse intermédiaire (IMBH, 10^2 - $10^5 M_\odot$). De tels trous noirs ne peuvent pas naître de l'effondrement d'une étoile, leur formation est donc liée à celle des trous noirs supermassifs. Dans la plupart des cas, le premier scénario est préféré et une collaboration pilotée à Strasbourg a établi pour la première fois que des ULXs lancent des jets puissants analogues aux microquasars (Pakull et al. 2010, Nature, 466, 209).

Cependant, la source ESO 243-49 HLX-1 découverte par une équipe de l'IRAP, semble bien impliquer un trou noir de masse intermédiaire (Webb et al. 2012, Science, 337, 554). La source X est associée à une source radio et visible dont le spectre montre une raie correspondant à H_α au redshift de la galaxie (Figure 2). Sa luminosité très élevée (10^{42} erg/s) et son spectre X en font le meilleur candidat IMBH connu. Sa variabilité temporelle, typique d'une binaire X, et l'origine de la matière accrétée ($\sim 10^{-4} M_\odot/\text{an}$) ne sont pas encore comprises.

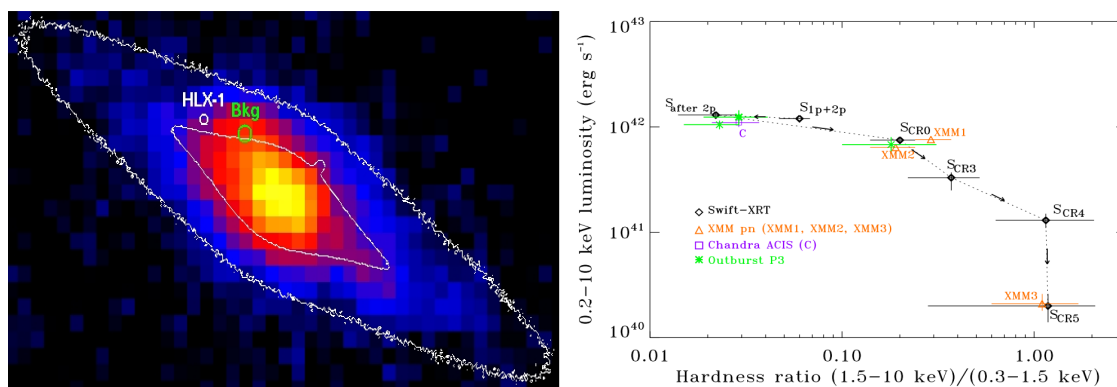


Figure 2 Gauche: Image Swift (UV) de la galaxie hôte de HLX-1 (Farrell et al. 2010, Astron. Nach., 332, 392). Droite: diagramme intensité - couleur en rayons X montrant un comportement typique de trou noir stellaire, exceptée la luminosité élevée (Godet et al. 2012, ApJ, 752, 34).

L'activité présente et passée du trou noir central de la Galaxie

Le centre de notre galaxie contient un trou noir de $4 \times 10^6 M_{\odot}$ particulièrement peu lumineux, Sgr A*. Les équipes françaises ont obtenu plusieurs campagnes d'observations longues avec XMM-Newton (Terrier en 2011, Grosso en 2014) qui, combinées avec INTEGRAL, VLT et Chandra, ont permis de contraindre l'origine des éruptions de Sgr A* (Trap et al. 2011, A&A, 528, 140), de montrer que plus de 99% du flot d'accrétion n'atteint pas le trou noir central mais est éjecté sous forme de vent (Wang et al. 2013, Science, 341, 981), et de découvrir que le trou noir était 1 million de fois plus lumineux il y a plus de 100 ans (Figure 3, Terrier et al. 2010, ApJ, 719, 143).

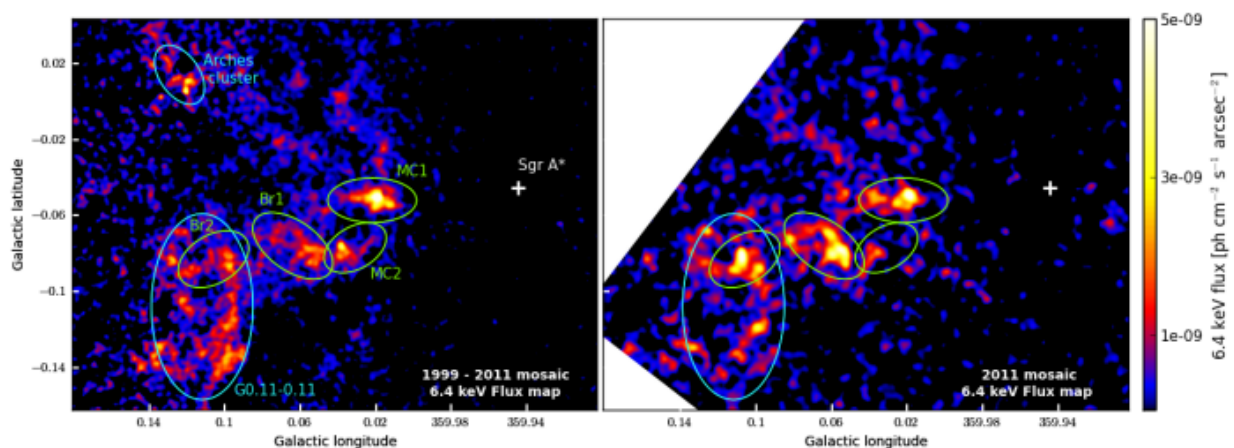


Figure 3: Images Chandra de la région environnant le trou noir supermassif au centre Galactique dans la raie Fe K à 6,4 keV, due à la fluorescence du fer des nuages interstellaires. La variabilité entre la moyenne (à gauche) et l'image 2011 (à droite) est reliée à un changement de l'irradiation X provenant de Sgr A* (Clavel et al. 2013, A&A 558, A32).

Faits saillants de la communauté « hautes énergies » internationale

Nous présentons quatre faits saillants qui n'impliquent pas directement (ou peu) la communauté française mais ayant eu un impact important sur la période considérée.

Première détection de neutrinos cosmiques de haute énergie

IceCube a observé un excès significatif (6σ) d'événements compatible avec l'observation d'un flux diffus de neutrinos d'origine extraterrestre (Aartsen et al. 2013, Science, 342, 6161 et 2014, Phys. Rev. Lett., 113, 101101). Il s'agit de la première détection de neutrinos cosmiques de haute énergie, une avancée majeure pour l'astronomie des neutrinos. La répartition des événements montre des accumulations qui restent compatibles avec un flux isotrope. L'analyse des données d'ANTARES permet d'exclure que l'accumulation observée près du centre Galactique soit produite par une seule source (Adrian-Martinez et al. 2014, ApJ, 786, L5).

Le pulsar du Crabe et sa nébuleuse: de surprise en surprise

Le pulsar du Crabe et la nébuleuse qu'il alimente ont été le sujet de découvertes inattendues : la détection de pulsations au-delà de 100 GeV par VERITAS (Aliu et al. 2011, Science, 334, 69) est un défi pour les modèles d'émission γ des pulsars ; l'observation d'éruptions GeV provenant de la nébuleuse par AGILE et *Fermi* a remis en cause son statut de chandelle standard (Abdo et al. 2011, Science, 331, 739). L'augmentation brusque du flux, l'absence de contreparties à d'autres longueurs d'onde, le spectre γ , suggèrent que le mécanisme en jeu est la reconnexion relativiste.

Les découvertes en X durs de NuSTAR

NuSTAR, lancé en 2012 par la NASA, est le premier observatoire qui focalise les X durs (6-79 keV, bande qui était visée par *Symbol-X*). Sa sensibilité, sa résolution spatiale et le contrôle du bruit de fond sont sans précédent. Parmi les premiers résultats figurent la mesure du moment cinétique du trou noir dans NGC1365 (Risaliti et al. 2013, Nature, 494, 449), l'émission asymétrique du ^{44}Ti dans le reste de supernova Cas A (Grefenstette et al. 2014, Nature, 506, 339), la variabilité des éruptions de Sgr A* (Barrière et al. 2014, ApJ, 786, 46).

Avancées en simulation numérique

La simulation numérique s'attaque maintenant frontalement à des problèmes anciens. Les dernières années ont ainsi vu les premières modélisations numériques du kick des pulsars lors de l'explosion de supernovae (simulations « multi-fluides » de Wongwathanarat et al., 2010, ApJ, 725, L106), l'étude systématique de l'accélération de particules dans un choc relativiste (simulations « particle-in-cell » de Sironi & Spitkovsky 2009, ApJ, 698, 1523), la mesure de l'énergie extraite d'un trou noir en rotation lors du lancement d'un jet relativiste (simulations « GR-MHD » de Tchekhovskoy et al. 2011, MNRAS, 418, L79).

2) Grandes questions

Quelle est la nature de la matière noire ?

La matière noire semble se comporter comme un gaz non-collisionnel de particules massives. Ceci peut être réalisé dans une grande variété de modèles, dont les « WIMPS » motivés par la physique des particules à l'échelle électrofaible. D'autres candidats sont à l'étude comme les neutrinos droits, les axions, les particules massives auto-diffusantes ou encore des particules lourdes associées à des transitions de phases dans l'univers primordial. Les environnements astrophysiques extrêmes et les régions à forte densité de matière noire constituent des laboratoires de premier choix pour son étude. Les particules de matière noire peuvent y être produites, et de façon générique, les collisions de ces particules ou leur éventuelle

désintégration sont potentiellement des sources de particules et/ou de rayonnement de haute énergie produits de façon « top-down ». L'étude des phénomènes cosmiques de haute énergie constitue ainsi une voie pour l'identification de la matière noire.

Quelle est l'influence des objets compacts sur leur environnement ?

Les objets compacts mettent en jeu des énergies considérables, qu'elles soient d'origine gravitationnelle ou résultant de la rotation de l'objet. L'enjeu est de comprendre où et comment cette énergie est libérée, et de sonder ainsi l'environnement proche et lointain de ces objets afin de contraindre leur nature et la physique en jeu (relativité, physique nucléaire, physique des plasma). Les problèmes abordés concernent la physique des flots d'accrétion, le lien accrétion-éjection, le rôle joué par la rotation de l'objet compact, la physique des jets et des vents relativistes, l'accélération de particules, etc. La part et l'impact de l'énergie libérée retournant vers le milieu ambiant est une problématique de plus en plus prégnante.

Comment explosent les astres ?

Le destin explosif des étoiles est bien documenté par les observations, mais reste énigmatique sur le plan théorique malgré son importance pour la formation des objets compacts, les premières étoiles, l'enrichissement du milieu, les effets de l'éjecta, les sursauts gamma, etc. Les simulations numériques de supernova gravitationnelle suggèrent que l'explosion est liée aux instabilités hydrodynamiques qui brisent la symétrie sphérique, induisent une nucléosynthèse explosive inhomogène et déterminent la quantité de mouvement et le moment cinétique des pulsars à leur naissance. La signature du mécanisme d'explosion est plus directement portée par les ondes gravitationnelles et par la modulation temporelle du flash de neutrinos. Malgré ces progrès, les conditions donnant naissance à un sursaut gamma sont encore inconnues.

Quelle est la nature, l'origine et le rôle des particules de haute à ultra-haute énergie ?

L'étude, centenaire, du rayonnement cosmique reste d'actualité avec de nombreuses mesures en cours (CREAM, AMS, Auger) et des questions renouvelées. Le spectre de ses différentes composantes apporte des contraintes sur la propagation des particules chargées et est scruté pour la signature de matière noire (e^+/e^-) ou de nouvelle physique (UHECR). La recherche des sources progresse avec les observations γ et l'approfondissement de la modélisation théorique. A basse énergie, le rayonnement cosmique joue un rôle essentiel dans la physico-chimie du milieu interstellaire. A ultra-haute énergie, l'origine des particules reste mystérieuse avec une faible anisotropie du flux et des indices d'alourdissement de la composition avec l'énergie.

Quel ciel nous révélera l'astronomie des ondes gravitationnelles et des neutrinos ?

L'observation d'ondes gravitationnelles, au-delà de la prouesse expérimentale, permettrait de tester la relativité générale en champ fort, l'équation d'état des étoiles à neutrons, et l'exploration des binaires compactes. L'observation de contreparties photoniques éclairerait les mécanismes mis en jeu dans des phénomènes violents tels que supernovae ou sursauts γ courts et permettrait une détermination indépendante de la constante de Hubble. Les neutrinos de haute énergie, parce qu'ils interagissent très peu et ne sont pas déviés, apportent un éclairage unique sur les sources du rayonnement cosmique et peuvent révéler des objets profondément enfouis. Le fonctionnement d'ANTARES et les résultats d'IceCube démontrent une maturité technologique. La prochaine étape consiste en l'identification de sources. C'est l'objectif principal de KM3NeT, dont la construction a commencé et qui atteindra à terme plusieurs km^3 de volume instrumenté.

3) Evolutions thématiques

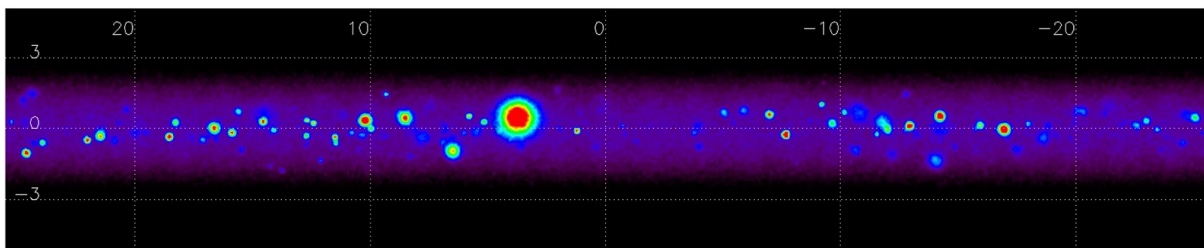


Figure 4: Simulation d'observations avec CTA du rayonnement gamma de très haute énergie dans la région centrale de notre Galaxie (P. Martin, IRAP). Le balayage du plan de la Galaxie devrait permettre la détection de plusieurs centaines de sources (Dubus et al., 2013, *Astrop. Phys.*, 43, 317).

L'astronomie γ a connu une véritable révolution avec la mise en service dans les années 2000 des télescopes Tcherenkov (dont H.E.S.S.) puis des satellites *AGILE* et *Fermi*. Les observations révèlent une richesse insoupçonnée de sources, qui témoignent de l'ubiquité de l'accélération de particules dans des sites aussi divers que les environnements des trous noirs supermassifs, les nébuleuses de pulsars, les restes de supernovae, les systèmes binaires galactiques, mais également les galaxies à flambée d'étoiles ou les galaxies radio. Le rayonnement γ devient un outil puissant qui intéresse au-delà de la communauté historique. Par exemple, le spectre γ des blazars renseigne sur le fond diffus infrarouge-UV, complémentaire des mesures issues des comptages de galaxies. Plus localement, l'émission γ diffuse trace le contenu en gaz des galaxies, mettant en évidence une composante de gaz sombre qui fut également identifiée dans les données de *Planck*. L'instrument qui promet de rendre l'astronomie γ très haute énergie accessible à toute la communauté est le *Cherenkov Telescope Array* (CTA, Figure 4). CTA sera constitué de deux réseaux de télescopes Tcherenkov dans les hémisphères sud et nord. CTA sera une infrastructure de recherche transnationale, qui assurera l'accès à l'Univers des très hautes énergies pour les prochaines décennies. Avec l'augmentation du nombre de sources attendu, une large fraction du temps d'observation sera ouvert sur appels d'offre, les données seront archivées et rendues accessibles via l'observatoire virtuel, ce qui révolutionnera le fonctionnement de

l'astronomie γ au TeV. Les communautés existantes évolueront dans un contexte plus compétitif, tandis que de nouvelles communautés s'approprièrent l'outil pour enrichir leurs recherches.

L'étude des sursauts gamma connaît un profond renouvellement avec *Swift* et *Fermi*, et bénéficie d'un contexte instrumental très favorable en France avec le projet franco-chinois SVOM à l'horizon 2020-2023. Le nombre de sursauts détectés sera plus faible qu'avec *Swift*, mais la couverture spectro-temporelle sera meilleure et la diversité de la population sera mieux explorée, permettant l'étude de classes d'explosions intermédiaires entre supernovae et sursauts gamma. SVOM constituera une nouvelle étape dans l'utilisation des sursauts gamma comme sonde de l'univers lointain et des premiers objets (avec l'optimisation du suivi robotique au sol en infrarouge). Par ailleurs, SVOM sera sans doute le seul détecteur dans l'espace quand l'étude des sursauts courts bénéficiera d'ici quelques années des premières détections d'ondes gravitationnelles émises par des coalescences de systèmes binaires compacts. La recherche de contreparties autres que le sursaut gamma proprement dit (kilonova ? émission radio ? cf. Figure 5) deviendra alors un enjeu majeur.

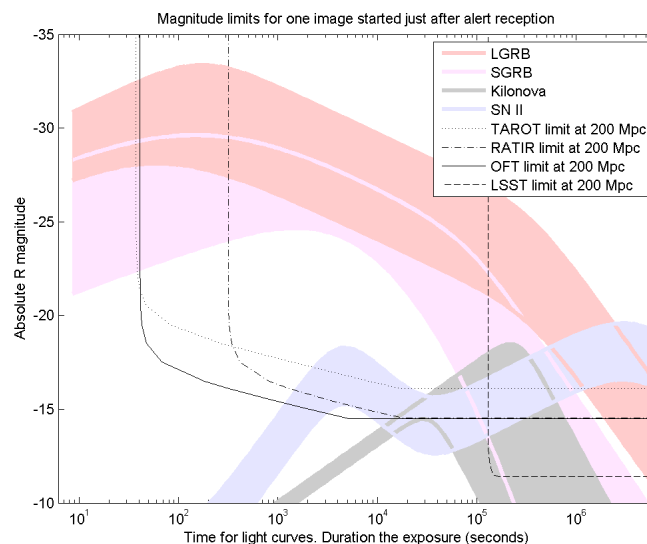


Figure 5: Enveloppes des courbes de lumière de sources potentielles d'ondes gravitationnelles (figure préparée par A. Klotz, IRAP, d'après Kann et al. 2010, Guelbenzu et al. 2012, Metzger & Berger 2012). La limite de détection de différents télescopes (dont le télescope OFT de suivi sol de SVOM) pour des sources à 200 Mpc ($z=0.045$) est indiquée.

L'astronomie des phénomènes transitoires est en plein développement avec (1) l'émergence de nouveaux moyens de recherche de variabilité dans tout le ciel à différentes longueurs d'onde (Pan-STARRS, LSST, LOFAR, SKA), et (2) l'optimisation des moyens robotiques de suivi dans un contexte où plusieurs missions fourniront des alertes (GAIA, SVOM, etc) et où la recherche de contreparties électromagnétiques à des sources non-photoniques (Adv. Virgo) pourrait devenir cruciale (Figure 5). « Tidal disruption events

», « supernova shock breakout », éruptions de magnétars etc, connaissent ainsi un regain d'intérêt récent. On peut s'attendre à une meilleure description (statistique ou multi-longueurs d'onde/multi-messagers) des transitoires déjà connues et à la découverte de nouvelles classes de phénomènes variables. Le débat actuel sur l'origine des « fast radio transients » est illustratif des questionnements qui émergeront alors.

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles, principalement LIGO aux USA et Virgo en Europe, ont établi les premières limites supérieures sur différents mécanismes astrophysiques après plusieurs runs scientifiques à la sensibilité nominale. L'objectif de la nouvelle génération, en cours d'installation, est de pouvoir sonder un volume d'univers 1000 fois plus important. Les estimations actuelles des taux attendus de coalescences d'astres compacts accèdent à la détection de tels signaux dès la sensibilité nominale de cette nouvelle génération atteinte, voire plus tôt si les taux se situent dans la frange haute des estimations. La première prise de données d'Advanced Virgo est attendue pour 2016 avec une évolution progressive vers la sensibilité nominale pour la fin de la décennie. Les prises de données seront coordonnées avec Advanced LIGO qui prévoit de démarrer son programme observationnel fin 2015, et seront renforcées par un programme de suivi électromagnétique en cours de préparation. Advanced LIGO et Virgo seront rejoints vers la fin de la décennie par KAGRA, un autre instrument de 3 km en construction au Japon. A plus long terme, le projet Einstein telescope est en cours d'étude pour une réalisation après 2025. Du côté spatial, la mission LISA-pathfinder déterminera les paramètres de eLISA. D'un point de vue théorique, ces dernières années ont vu la convergence des techniques numériques et analytiques sur la prédiction des formes d'ondes en provenance de binaires spirales, ce qui valide ces deux approches. L'amélioration de ces techniques a un impact important sur le signal sur bruit des détections.

Les thèmes des missions L2 (Athena, « the hot and energetic universe ») et L3 (eLISA, « the gravitational universe ») ont été sélectionnés en 2013 par l'ESA. Ces projets, couvrant les thèmes scientifiques du PNHE, s'inscrivent sur le long terme (lancements en 2028 et 2034) et vont donc structurer la communauté pour de nombreuses années. L'implication française est importante, en particulier sur *Athena* qui vise la haute résolution spectrale en X ($R = 1000$). La mission japonaise Astro-H préfigurera en 2015 cette nouvelle génération de spectrométrie X, de la même manière qu'ASCA avait préfiguré XMM et *Chandra*. L'amélioration des données atomiques est un enjeu pour l'interprétation de ces données X à haute résolution spectrale. Des calculs théoriques et des mesures de laboratoire devront améliorer la précision avec laquelle sont connus les spectres de raies de certains éléments (Si par exemple). Des collaborations au niveau international (incluant des chercheurs français) sont établies ou en train de s'établir dans ce but. En parallèle d'Astro-H, eROSITA effectuera le premier relevé complet du ciel depuis ROSAT, beaucoup plus profond. Ces deux missions, où la participation française est modeste, devraient ouvrir considérablement le champ de l'astronomie X, et permettre à XMM et *Chandra* de retrouver une seconde jeunesse, en tant qu'instruments de suivi détaillé en attendant *Athena*.

La simulation numérique prend une importance croissante dans la modélisation au fur et à mesure que les méthodes et les outils se démocratisent et que la puissance de calcul permet de d'approcher au mieux la physique en jeu. Les codes ouverts (RAMSES) facilitent l'accès à la simulation au chercheur non-numéricien et servent une communauté croissante d'utilisateurs qui, en retour, contribuent des modules étendant leur domaine d'application. On se rapproche ainsi du fonctionnement d'un observatoire avec son jeu d'instruments, ses utilisateurs, et dont les applications les plus exigeantes nécessitent des compétences spécifiques. Deux évolutions se dessinent à moyen terme: d'une part un effort pour comprendre ab initio des processus physiques fondamentaux (par ex., l'accélération de particules), d'autre part un effort visant le calcul d'observables à partir de simulations globales, en paramétrisant certains processus physiques, pour permettre une comparaison directe aux données (par ex., cartes d'émission de restes de supernovae ou courbes de lumière de sursauts gamma).

4) Interdisciplinarité et interfaces

L'astrophysique des hautes énergies est par essence un domaine interdisciplinaire qui réunit des physiciens des particules, des physiciens nucléaires, et des astrophysiciens. Ces scientifiques viennent de thématiques et de laboratoires de taille et de structure très différentes au CNRS et au CEA. Le PNHE permet à cette discipline de cultiver son identité face aux domaines dont elle est issue, et d'estomper les frontières créées par les grandes collaborations. La construction de cette communauté a été encouragée et facilitée par plusieurs programmes interdisciplinaires du CNRS et par la CID 47, qui avaient permis de réunir des experts du domaine. La disparition de ces actions crée une inquiétude (cf. 5), notamment sur le recrutement. Un plus grand échange entre sections sur les méthodes et les critères d'évaluation de ces profils serait utile afin que les candidats formés dans une thématique interdisciplinaire ne soient pas défavorisés.

Le PNHE a des interfaces avec la plupart des autres programmes nationaux de l'INSU.

PCMI Les rayons cosmiques sont une composante importante du milieu interstellaire que le rayonnement radio, X, γ permet de tracer. Par exemple, l'émission GeV est utilisée pour mesurer la masse du gaz galactique, information utile en liaison avec les « avant-plans » de *Planck*. L'émission TeV proche de restes de supernovae trace l'interaction des rayons cosmiques avec les nuages moléculaires, engendrant une sur-ionisation qui est observable en millimétrique (IRAM, APEX). La propagation des particules relativistes chargées dans les champs magnétiques est également un sujet qui lie les deux communautés, illustré récemment par les travaux sur l'annihilation e^+e^- observée par le télescope INTEGRAL/SPI.

PNCG Trois thématiques sont à l'interface. (1) Les sursauts gamma sont parmi les événements les plus lumineux et les plus lointains observés. Ils sont liés aux premières générations d'étoiles et permettant de sonder les structures baryoniques présentes le long des

lignes de visée. (2) La nature de la matière noire peut être révélée par des signatures observables en rayons X/ γ , dans le flux de neutrinos ou de cosmiques, nécessitant une bonne connaissance des « avant-plans » astrophysiques. (3) La co-évolution des trous noirs supermassifs avec leur galaxie hôte et la naissance des grandes structures (amas) fait appel à la physique de l'accrétion-éjection et des chocs (gaz chaud, cosmiques). Cette dernière thématique devrait beaucoup bénéficier de l'apport d'*Astro-H* et, à plus long terme, de la mission L2 *Athena* dont c'est un des principaux objectifs.

PNPS Des liens anciens existent autour de la physique des disques et des jets avec des analogies entre objets jeunes et compacts. D'autres thèmes se développent : impact des objets compacts sur la formation stellaire et leur utilisation comme traceur de celle-ci (binaires X massives), rôle de la binarité dans l'évolution des étoiles massives, étude des progéniteurs de supernovae et sursauts gamma. Le mécanisme d'explosion des supernovae exige des profils de rotation et de champ magnétique calculés de façon cohérente par des modèles d'évolution stellaire. La coalescence de deux étoiles à neutrons joue un rôle pour la nucléosynthèse explosive des éléments lourds, pour expliquer la fréquence des sursauts gamma courts et pour estimer l'intensité des ondes gravitationnelles détectables sur Terre. Ces coalescences résultent de l'évolution des systèmes binaires d'étoiles massives, qui dépend de la vigueur des épisodes de perte de masse par vent et pendant les phases d'enveloppe commune.

PNST La physique des plasmas est un outil commun et une interface existe sur l'accélération de particules. Notre environnement proche est riche d'analogies : par exemple, l'accélération au choc terminal de l'héliosphère impliquerait la reconnexion dans une nappe de courant comprimée comme dans les nébuleuses de pulsar (Drake et al. 2010, ApJ, 709, 963). L'observation offre également des passerelles : étude des milieux neutres par l'observation X de réactions d'échange de charge, observations γ du Soleil et de flashes terrestres. Les codes « particle-in-cell », bien connus du PNST, se développent au PNHE : les échanges peuvent être stimulants même si la mise en commun s'avère difficile (plasmas relativistes au PNHE).

AS GRAM Les tests du principe d'équivalence (invariance de Lorentz) et la physique des ondes gravitationnelles sont à l'interface avec l'AS GRAM.

5) Forces et faiblesses

La communauté dispose de forces appréciables en ingénieurs et techniciens bien qu'elle n'ait pas échappé ces dernières années à la réduction générale des effectifs. Ce savoir-faire expérimental reconnu ouvre des opportunités et permet une **participation de haut niveau aux R&D** instrumentales. La communauté PNHE est ainsi présente dans la quasi-totalité des grands projets sol/spatial du domaine en Europe, avec un rôle moteur reconnu pour nombre d'entre eux (*Athena*/IFU, Virgo, CTA, KM3NeT, etc.). En parallèle, une difficulté persiste sur l'exploitation scientifique à laquelle une part trop faible des ressources est consacrée. La multiplication des appels d'offre épuise les chercheurs ; elle finit par assécher le financement

en l'éparpillant, tandis que le manque de ressources dans nos instituts complique la mise en oeuvre d'une stratégie à long terme. Cette stratégie est nécessaire pour **maintenir la taille critique** permettant de bénéficier des investissements dans des projets de plus en plus lourds.

Le soutien des instituts via des structures nationales (cf. 4) a permis l'**émergence d'une communauté astroparticules** réunissant des chercheurs d'horizon divers. C'est un avantage certain sur le long terme pour l'animation, l'analyse, et l'exploitation scientifique. Toutefois, cette dynamique d'intégration forte, comparée à d'autres pays, **peut s'essouffler** face à la réduction des ressources des instituts. Un repli sur le « coeur de métier » au détriment des interfaces aurait à terme un impact sur le retour scientifique en re-cloisonnant les expertises.

Un accès privilégié aux ressources du **centre de calcul** de Lyon (CC-IN2P3) a permis à de nombreux groupes français d'avoir des contributions visibles, et une production scientifique compétitive, par rapport aux concurrents étrangers. Certains laboratoires, groupements de laboratoires, ou instituts, s'appuient pour leurs besoin de stockage et de calcul (simulations Monte Carlo) sur les **grilles** en contribuant à des mésocentres (p. ex. la « Grille au service de la Recherche en Ile-de-France »), et/ou en se dotant d'un point d'accès à la grille de calcul européenne EGI. L'importance de ces ressources pour les projets ne saurait être minimisée : elles contribuent largement à notre compétitivité et doivent être soutenues.

La communauté française a largement contribué à l'émergence de l'**astronomie γ de très hautes énergies** depuis la fin des années 1980. En développant les caméras des télescopes H.E.S.S., la France se situe au cœur du succès scientifique de l'expérience. Avec environ 100 chercheurs travaillant dans le domaine de l'astronomie γ , la France compte une des plus grandes communautés mondiales. Aujourd'hui, une large fraction de cette communauté est investie dans le développement de l'observatoire CTA.

Le projet **SVOM est un atout** pour la communauté française à l'horizon 2020-3 (cf. 3). Une communauté expérimentée existe déjà mais qui doit être renforcée autour du suivi sol et de l'utilisation « hors sursauts ». L'investissement de la communauté PNHE dans les grands relevés synoptiques est actuellement assez faible. En revanche, la conjonction de l'investissement important de cette communauté dans les projets de détection d'ondes gravitationnelles avec les observatoires X et γ actuels constitue une configuration assez unique, potentiellement très riche de retombées scientifiques. Même si un effort de coordination existe déjà pour la recherche de contreparties croisées, cet effort doit encore être renforcé pour atteindre une taille critique en chercheurs et moyens concernés.

Le faible nombre de chercheurs du PNHE spécialisés dans la **simulation numérique** risque à long terme de limiter le champ d'action de la communauté en France et en Europe. La simulation numérique n'est pas la panacée à toutes les questions théoriques, différents niveaux de complexité sont utiles à la modélisation et l'interprétation, mais force est de constater qu'elle devient un outil incontournable pour valider ou explorer certaines idées. La

formation de nos chercheurs à son utilisation raisonnée nous semble être un enjeu important pour l'ensemble des PN et une action commune est souhaitable.

6) Moyens et priorités

X/gamma. H.E.S.S. reste un des instruments phares du PNHE après 10 ans de fonctionnement, avec une collection de résultats scientifiques qui faiblit peu. L'arrivée sur le ciel de H.E.S.S.-2 renforce les synergies avec *Fermi* et va bénéficier à la recherche de signaux matière noire, de pulsars, de sursauts gamma, à la physique des AGN et l'étude du fonds diffus infrarouge. L'implication française, l'impact et le retour scientifique attendus de CTA en font la priorité pour les cinq prochaines années (cf. 4). Dans l'espace, il est indispensable de poursuivre, tant que cela est techniquement réalisable, l'exploitation de XMM-Newton et *Fermi*. La communauté utilisatrice d'observations X est large, bien au-delà du PNHE (cf. l'[exercice de prospective rayons X](#) mené en 2013), ce qui devrait permettre d'assurer une forte participation française au futur grand observatoire X, *Athena*. Le développement d'une mission dans le domaine du MeV est un objectif à moyen terme.

Visible/IR. Le suivi sol des sursauts gamma est prioritaire, maintenant que SVOM est décidé au plus haut niveau (cf. 7). VLT, NTT, et le futur ELT font partie de la panoplie indispensable au suivi et à la caractérisation des sources de haute énergie. Les instruments sont généralement motivés par des thématiques hors PNHE (excepté X-Shooter) mais leur souplesse d'utilisation permet le développement de nos programmes d'observation. Les progrès de l'interférométrie (VLTI) vont ouvrir cette technique à plusieurs objets d'intérêt pour le PNHE (Centre Galactique, AGN, binaires évoluées). Le LSST aura un impact important sur de nombreux thèmes PNHE mais notre communauté ne se mobilise pas.

Radio/mm. Le suivi des éphémérides de pulsars à Nançay est indispensable à la recherche de pulsations γ et au réseau de détection d'ondes gravitationnelles EPTA. LOFAR et NenuFAR préfigurent les futurs télescopes radio avec la possibilité de couvrir de larges régions du ciel ou de repointer a posteriori sur alerte ; leur exploitation scientifique ne fait que commencer. Les objectifs scientifiques de SKA dans sa phase complète sont extrêmement séduisants. Toutefois, la part de la France et sa visibilité dans ce très grand projet restent à définir.

Les rayons cosmiques sont le moteur historique de l'astroparticule. L'instrumentation actuelle (AMS, CREAM, Auger) est en passe d'obtenir des données sur l'ensemble du spectre d'une qualité qu'il sera difficile de dépasser. Ces instruments doivent pouvoir poursuivre et affiner leurs mesures dans l'immédiat. Auger a obtenu des résultats importants sur la section efficace d'interaction à très haute énergie, sur le spectre, l'anisotropie, et la composition des rayons cosmiques de ultra-haute énergie. La communauté a aussi effectué un travail pionnier pour caractériser et comprendre l'émission radio des gerbes atmosphériques, et s'est engagée dans JEM-EUSO. A terme, les objectifs et les moyens de mesure du

rayonnement cosmique du GeV au ZeV devraient faire l'objet d'une feuille de route : le paysage actuel est confus avec la poursuite en parallèle de multiples pistes expérimentales.

moyens	actuels (P0 , P1, P2)	à venir (P0 , P1, P2)
spatial	XMM, INTEGRAL, <i>Fermi</i> , AMS, CREAM, (*)	SVOM, ISS-CREAM, (*) L2 (Hot Universe), L3 (Grav. Universe)
sol	H.E.S.S. LOFAR/NenuFAR, Nançay, Auger Antares, Codalema, VLT/NTT	Adv. Virgo, CTA, SVOM-OFT SKA KM3NeT, E-ELT, VLTI, (**)

(*) + participation de quelques chercheurs français à NuSTAR (en vol), Astro-H, eROSITA + démonstrateurs LISA Pathfinder et EUSO-Ballon. **Pas de priorité sur le spatial** (cf. CNES).
(**) + un intérêt du PNHE pour NIKA-2¹, lasers de puissance².

Ondes gravitationnelles. Advanced Virgo devrait être en mesure d'ouvrir la fenêtre des ondes gravitationnelles (cf. 3) et son exploitation scientifique est prioritaire, avec la perspective d'un relais à long terme avec eLISA (ESA L3). Le chronométrage des pulsars (EPTA) offre également une réelle opportunité de détection aux très basses fréquences.

Neutrinos. L'astronomie neutrino est un objectif ambitieux, à long terme, qui motive une part importante de la communauté PNHE. Les modèles de sources sont très incertains et l'exploitation astrophysique du signal détecté par IceCube (cf. 1) nécessitera sans doute un détecteur de taille largement supérieure, nécessitant une coordination mondiale.

Calcul. La complexité croissante des instruments, du nombre de voies de détection, des algorithmes de traitement, des simulations associées, font que les besoins en calcul croissent et deviennent comparables avec les besoins des instruments (cf. 5). Si les mésocentres semblent bien remplir leur rôle, la pression beaucoup trop élevée sur les moyens de calculs nationaux et européens risque de nuire au développement de la simulation numérique.

Centre de données. Aujourd'hui, un grand effort de valorisation est consacré en France à la création de catalogues de sources (XMM-SSC, *Fermi*-LAT, ou, plus modestement, le catalogue TeVCAT de sources TeV). Demain, la diffusion et la valorisation des données CTA, SVOM, *Athena* sera une préoccupation importante, d'autant plus que leur exploitation ne se restreint plus aux développeurs des instruments. Même si la création de catalogues de sources restera probablement une activité importante en France, d'autres axes de valorisation

¹ NIKA2 a un intérêt pour la cartographie des émissions diffuses associées à des sources de haute énergie (synchrotron et poussières autour de SNR, binaires, AGN) avec une résolution angulaire comparable à celle des rayons X et γ .

² Les lasers de puissance permettent l'étude en laboratoire de phénomènes comme les chocs radiatifs ou la propagation de jets. Dans le futur (PETAL, HIPER), l'accélération aux chocs, la création de paires, voire des contraintes sur la matière noire pourraient être abordés. La pertinence de ces mesures pour l'astrophysique est encore difficile à juger.

devront être envisagés, comme la pérennisation des moyens d'analyse de données, ou l'intégration des données dans un contexte multi-longueur d'onde et multi-messagers.

7) Recommandations

S'investir sans délai dans la réalisation de CTA. Les chercheurs français jouent un rôle moteur dans ce projet mondial. Une réflexion est à mener sur les moyens de structurer au niveau européen la communauté utilisatrice de cet observatoire afin de préparer au mieux l'exploitation scientifique.

Accompagner la mission SVOM par un suivi sol des sursauts gamma dans l'infrarouge à l'aide d'un télescope dédié (OFT), ce qui permettra l'étude systématique des premières minutes et la localisation précise des sursauts les plus intéressants (haut redshift), garantissant ainsi à la France le meilleur retour scientifique possible. Le PNHE recommande également de renforcer la visibilité de SVOM dans les LIA franco-chinois « origins » et « physique des particules » ; et de mobiliser la communauté sur l'utilisation de SVOM hors sursauts gamma.

Préparer la première détection d'ondes gravitationnelles en soutenant l'implication française dans la réalisation et l'exploitation d'Advanced Virgo puis la mission L3 (eLISA) ; en renforçant les contacts sur la modélisation et sur la recherche de contreparties via, notamment, la participation à LOFAR (rémanences radio) et SVOM (sursauts courts).

Renforcer l'implication de la communauté dans le domaine radio: exploitation scientifique de LOFAR/NenuFAR et mise en place d'une contribution française à SKA.

Assurer une participation française majeure au futur grand observatoire en rayons X (mission L2 *Athena*), une pierre angulaire du domaine à l'horizon 2030 dont la phase de définition couvre cette prospective.

Engager une réflexion prospective sur la physique du rayonnement cosmique, du GeV au ZeV, afin de faire le bilan des avancées apportées par les différents instruments en opération, d'identifier les enjeux scientifiques majeurs en suspens, et de définir une feuille de route expérimentale sur le long terme.