



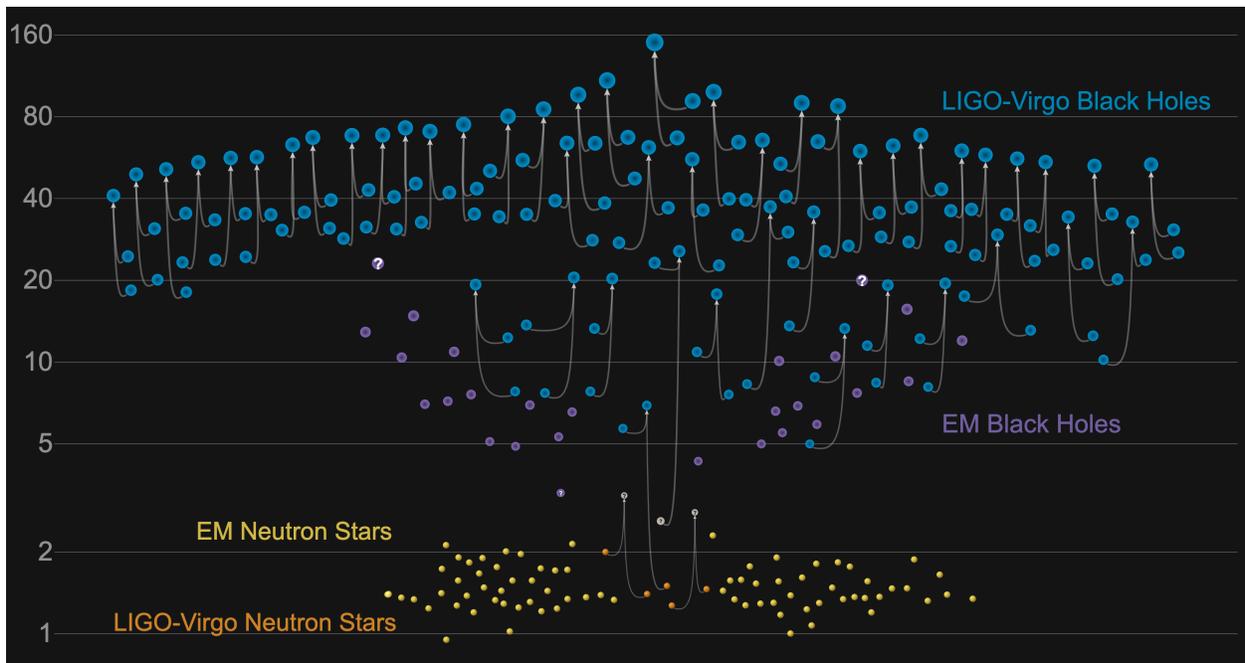
Bilan (2016-2021) et Projet (2021-2025)

rédigé par Susanna D. Vergani (directrice),
Régis Terrier (président du CS) et le Conseil Scientifique :
Francesca Calore, Mickael Coriat, Thierry Foglizzo, Lucas Guillemot, Martin
Lemoine, Frédérique Marion, Pierrick Martin, David Maurin, Pierre-Olivier
Petrucci, Thierry Pradier, Jérôme Rodriguez, Fabian Schüssler

31 mai 2021

Ce document est partiellement basé sur
le *Document de prospective INSU/AA 2020-2025* du Groupe A *Thématiques*
et sur le document *Bilan (2012-2016) et Projet (2017-2022) du PNHE*

1. Introduction	3
1.1 L'astrophysique des hautes énergies et les objectifs du PNHE	3
1.2 La communauté PNHE	4
2. Contexte scientifique	5
2.1 Les grandes questions	5
2.2 Les interfaces	8
2.3 Faits saillants	9
2.4 Forces et faiblesses	11
3. Fonctionnement du PNHE	12
3.1 Composition du conseil scientifique	12
3.2 Appel d'offre	13
3.4 Réunions du PNHE	16
3.5 Autres actions	18
4. Projet de renouvellement	20
4.1 Evolution thématiques et instrumentales	20
4.2 Rôle et actions du PNHE	23
4.3 Renouvellement du CS	24



The masses in the *Stellar Graveyard* as observed from the LIGO-Virgo interferometers
 (adapted from LIGO -Virgo / Frank Elavsky, Aaron Geller / Northwestern)

1. Introduction

1.1 L'astrophysique des hautes énergies et les objectifs du PNHE

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; production de neutrinos de haute énergie; recherche de nouvelle physique, etc. Les observations s'étendent à tout le spectre électromagnétique ainsi qu'aux messagers non photoniques (neutrinos, ondes gravitationnelles, rayons cosmiques).

L'astrophysique des hautes énergies ne se définit donc pas en rapport à un domaine de longueur d'ondes, même si 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 astrophysiciens, des physiciens des particules, des physiciens des plasmas et des physiciens nucléaires. Le terme «astroparticules» marque cette convergence d'intérêts entre physiciens des particules et astrophysiciens sur de multiples sujets. L'émergence du terme astrophysique «multi-messagers» marque la possibilité d'étudier les phénomènes et les utiliser pour comprendre l'univers et faire progresser nos connaissances de ses lois physiques en combinant l'information obtenue par les photons à celle des messagers non photoniques.

Le Programme National Hautes Energies (PNHE) fait partie des Programmes Nationaux du CNRS/INSU et est soutenu également par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA/IRFU), l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (CNRS/IN2P3) et par l'Institut National de Physique (CNRS/INP).

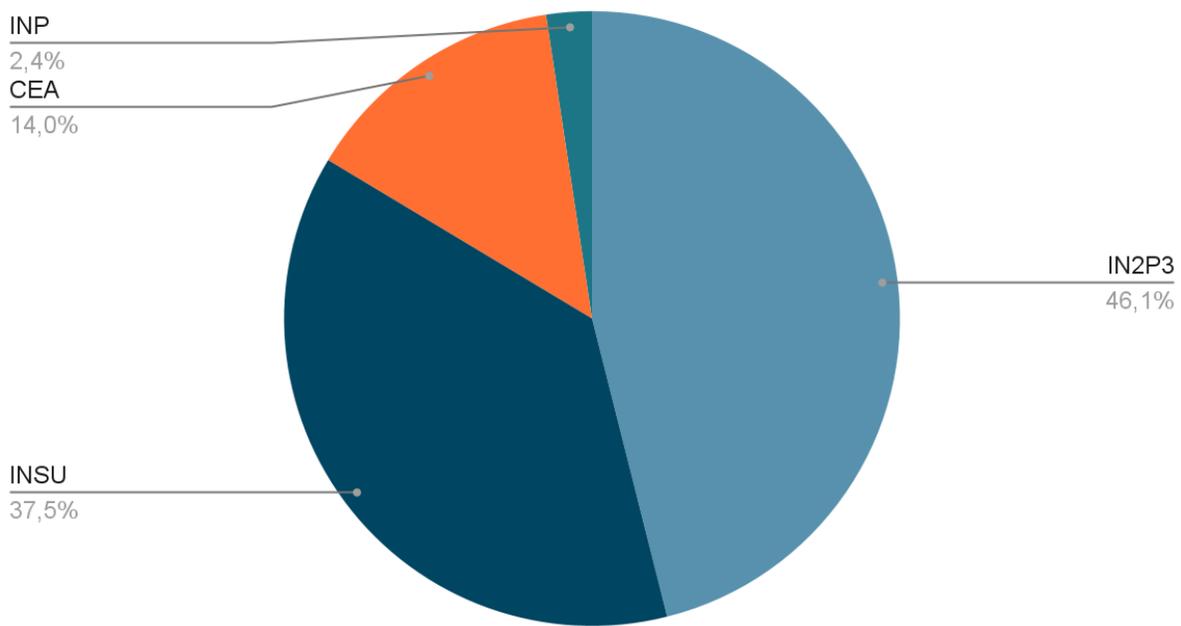
Le PNHE a pour vocation de représenter, de coordonner, et de soutenir les activités de recherche relevant de l'astrophysique des phénomènes d'hautes énergies en France. Le PNHE est structuré autour de cinq thèmes fédérateurs :

- L'univers comme laboratoire ;
- Objets compacts et leurs environnements ;
- Phénomènes explosifs ;
- Rayons cosmiques ;
- Nouveaux messagers.

1.2 La communauté PNHE

La liste de diffusion du PNHE comporte actuellement près de 320 inscrits. Bien qu'incomplète et hétérogène, cette liste permet de définir une « communauté PNHE ». Les inscrits sont répartis approximativement en 45% IN2P3, 38% INSU, 14% CEA, 3% INP. Afin de s'assurer de la représentativité de la liste, nous n'avons conservé que 270 membres identifiés comme actifs dans le domaine par les membres du Conseil Scientifique (CS).

Répartition par institut



La répartition hommes / femmes est de 78 % / 22 %. La fraction des chercheurs permanents est de 85% . Nous estimons que le pourcentage de chercheurs non permanents actifs dans la communauté est plus élevé que ce que nous pouvons recenser. Ces personnels sont répartis dans une trentaine de laboratoires dont les trois plus importants (de 20 à 30 permanents relevant du PNHE) sont l'APC, AIM, et l'IRAP.

2. Contexte scientifique

2.1 Les grandes questions

Les thèmes fédérateurs du PNHE peuvent se décliner en cinq questions majeures.

[Quelle est la nature de la matière noire ?](#)

La matière noire semble se comporter comme un gaz non-collisionnel de particules massives. Ces caractéristiques sont obtenues dans une grande variété de modèles, dont les « WIMPs » motivés par la physique des particules au-delà du modèle standard 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.

Certains candidats ont la propriété de s'annihiler ou de se désintégrer, phénomènes s'accompagnant d'émissions spécifiques (rayonnement cosmique, électromagnétique, et/ou neutrinos); d'autres, comme les axions, peuvent être créés par conversion de photons thermiques dans les étoiles ou de photons de haute énergie issus des grands accélérateurs cosmiques; d'autres encore comme les trous noirs primordiaux peuvent laisser des traces dans le rayonnement cosmique et/ou dans les événements d'ondes gravitationnelles. L'étude des phénomènes cosmiques de haute énergie constitue ainsi une voie pour l'identification de la matière noire.

[Quel ciel nous révèlent les ondes gravitationnelles et les neutrinos ?](#)

Les résultats des observations d'ondes gravitationnelles témoignent déjà de la variété et de la richesse d'information astrophysique de ces détections et nous ont permis d'entrevoir la population de trous noirs de masses intermédiaires.

L'observation de contreparties photoniques d'ondes gravitationnelles lors de la coalescence d'un système binaire d'étoiles à neutrons a montré la puissance des observations multi-messagers pour l'étude des mécanismes mis en jeu dans des phénomènes violents tels que les sursauts γ courts, pour étudier la structure des jets, pour contraindre l'équation d'état de la matière dense, pour déterminer de manière indépendante la constante de Hubble, pour comprendre le rôle de ces phénomènes dans la nucléosynthèse des éléments lourds et pour contraindre les candidats de matière noire. Les futures campagnes d'observation nous permettront de sonder

systematiquement ces aspects et de mieux comprendre la formation et l'évolution des objets compacts.

Les neutrinos de haute énergie, parce qu'ils interagissent très peu avec la matière et ne sont donc pas déviés de leur trajectoire initiale, apportent un éclairage unique sur les sources du rayonnement cosmique et peuvent révéler des objets profondément enfouis. La première détection de neutrinos cosmiques de haute énergie par IceCube a été une avancée majeure pour l'astronomie des neutrinos. Les directions d'arrivée de ces neutrinos sont compatibles avec une distribution uniforme sur le ciel. De tels niveaux d'émission neutrino ont été prédits pour plusieurs catégories de sources, des sursauts gamma aux galaxies à flambée d'étoile en passant par les blazars. La découverte récente d'une émission neutrino simultanément à une éruption gamma en direction du blazar TXS 0656+056 constitue la première identification plausible d'une source de neutrino de très haute énergie et indique que ces derniers peuvent être produits dans les jets de noyaux actifs de galaxie. Identifier les populations de sources de neutrinos sera l'objectif principal des années à venir.

[Quelle physique pour les objets compacts et leur environnement?](#)

Les objets compacts mettent en jeu des énergies considérables, qu'elles soient d'origine gravitationnelle (e.g. accréation), qu'elles résultent de la rotation de l'objet compact (e.g. pulsars) ou même d'un réservoir d'énergie magnétique (e.g. magnetars). L'enjeu est de comprendre où et comment cette énergie est transportée (vents, jets, rayonnement), dissipée (accélération de particules), 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 plasmas). Les problèmes abordés concernent la physique des flots d'accréation, le lien accréation-éjection, le rôle joué par la rotation de l'objet compact, la physique des jets et des vents relativistes, l'électrodynamique relativiste dans les pulsars, l'accélération de particules par reconnexion ou par processus de Fermi, etc. La part et l'impact de l'énergie libérée dans le milieu ambiant est une problématique majeure en raison des effets de rétroaction qu'elle peut induire.

La détection des contreparties électromagnétiques des ondes gravitationnelles produites lors de la coalescence d'un système binaire d'étoiles à neutrons nous permet, dans certains cas, d'explorer aussi ces questions d'un point de vue multi-messagers.

[Comment explosent les astres ?](#)

Le destin explosif des étoiles est un enjeu majeur pour la formation des objets compacts, les signatures de la première génération d'étoiles, l'enrichissement du milieu environnant, la physique de l'éjecta, etc. La théorie des supernovae thermonucléaires a fortement progressé avec les simulations de nouveaux scénarios (collision de naines blanches, double détonations He/C, explosions sous-lumineuses) et l'identification observationnelle de nouvelles catégories. Les simulations de supernovae gravitationnelles suggèrent que l'explosion est liée aux instabilités hydrodynamiques qui induisent une nucléosynthèse inhomogène et déterminent la vitesse et la rotation des pulsars à leur naissance. La signature du mécanisme d'explosion est plus directement associée à la modulation temporelle du flash de neutrinos.

L'observation de supernovae superlumineuses suggère d'autres mécanismes fondés sur l'interaction des éjecta avec des coquilles circumstellaires, l'explosion par instabilité de paires ou

la décélération rotationnelle d'un magnétar. Même s'il est désormais bien établi que les sursauts-gamma longs sont associés à l'effondrement de certaines étoiles massives et que la métallicité joue un rôle important dans l'évolution de leurs étoiles progénitrices, on est encore loin d'une connaissance précise des conditions nécessaires à la formation de ces jets. Les observations multi-messagers ont confirmé l'existence des kilonovae. Leur association avec les sursauts gamma courts, leur physique et leur rôle dans l'enrichissement en éléments lourds dans l'univers restent à confirmer et étudier. Les grandes relevées du ciel transitoire permettent de découvrir de nouvelles classes de phénomènes, comme les FBOT (*Fast Blue Optical Transients*), qui ajoutent des informations nouvelles à interpréter pour la compréhension de l'explosions des astres.

[Quelle est la nature et l'origine des rayons cosmiques de haute à ultra-haute énergie ?](#)

L'étude, centenaire, du rayonnement cosmique reste d'actualité avec de nombreuses mesures en cours sur une gamme d'énergie couvrant presque 14 ordres de grandeur (e.g. AMS-02, CALET, DAMPE, Nucleon, Fermi-LAT, H.E.S.S, Observatoire Pierre Auger, Telescope Array, Voyager). Les multiples brisures spectrales, abondances et anisotropies observées nous donnent toujours plus d'indices pour identifier les sources et comprendre le transport du rayonnement cosmique galactique (MeV-PeV) et extra-galactique (aux plus hautes énergies).

Aux énergies galactiques, le spectre des noyaux apporte des contraintes sur la propagation des particules chargées. La mise en évidence d'une nouvelle brisure spectrale à quelques centaines de GeV et l'observation de poches de diffusion "lente" autour des restes de supernovae met en évidence les mécanismes de rétroaction entre le rayonnement cosmique et la turbulence magnétique. Le rayonnement cosmique de basse énergie joue par ailleurs un rôle essentiel dans la physico-chimie du milieu interstellaire, et plus généralement dans la dynamique du gaz à l'échelle galactique. La recherche des sources du rayonnement cosmique galactique progresse avec les observations de restes de supernovae, d'amas d'étoiles voire des régions centrales de la galaxie, avec la détection d'émissions diffuses galactiques de la radio aux γ , s'étendant aujourd'hui jusqu'au domaine du PeV. Aux plus hautes énergies, les données récentes confirment l'alourdissement de la composition avec l'énergie au-delà de 1 EeV. L'origine des particules reste mystérieuse même si la détection d'une composante dipolaire des directions d'arrivées, de plus faibles anisotropies aux énergies extrêmes, ou même l'observation d'événements simultanés gammas/neutrinos (en provenance d'un blazar; voir section précédente) ouvre de nouvelles perspectives.

La question de l'origine des rayons cosmiques est intrinsèquement une question d'astrophysique multi-messager (les interactions hadroniques de noyaux accélérés produisent des neutrinos et des photons de haute énergie) et multi-échelle (microphysique de la turbulence, chocs et rétroaction avec le gaz, rayonnement cosmique et rayonnement). Elle bénéficie donc des progrès réalisés dans l'amélioration des observations et de leurs interprétations, mais aussi dans la modélisation microphysique (plasma) de ces phénomènes et des avancées numériques dans ce domaine.

2.2 Les interfaces

Outre les interfaces inter-instituts soulignées en Section 1.1, le PNHE a des interfaces avec la plupart des Programmes Nationaux et avec les [GDR « Ondes gravitationnelles »](#) et [RESANET](#).

Au-delà du soutien à des projets multi-PN proposés dans le cadre de l'appel d'offre (AO) INSU, ces interfaces sont mises en valeur par l'organisation par les CS respectifs d'ateliers ou écoles communs (voir sections [3.4](#), [3.5](#) et [site web du PNHE](#)).

Une plus-value pour le développement des synergies des interfaces est aussi la présence de membres communs aux CS d'autres PN ou GDR. Cette pratique est à encourager. Pour la période 2016-2021, cela a été le cas avec le PNCG (pendant 2 ans) et avec le GDR « Ondes gravitationnelles » (depuis sa création).

PCMI Les rayons cosmiques sont une composante importante du milieu interstellaire que les rayonnements radio, X, γ permettent de tracer. Par exemple, l'émission au GeV est utilisée pour mesurer la masse du gaz galactique, information utile en lien avec les « avant-plans » de Planck. L'émission γ proche de restes de supernovae trace l'interaction des rayons cosmiques avec les nuages moléculaires, engendrant une sur-ionisation qui est observable en millimétrique. 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 le spectre des particules du rayonnement cosmique mesuré par AMS-02.

PNCG Plusieurs thématiques émergent à l'interface. (1) Les sursauts γ sont parmi les événements les plus lumineux et les plus lointains observés. Ils apparaissent sans doute dès les premières générations d'étoiles et permettent 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 et γ , dans le flux de neutrinos ou de rayons cosmiques, nécessitant à la fois une bonne connaissance de sa distribution dans la/les galaxie/s et des avant-plans astrophysiques. (3) La coévolution 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). (4) Les rayons cosmiques participent à la dynamique du gaz galactique et à la rétro-action des baryons sur la formation et l'évolution des galaxies.

PNGRAM Les tests du principe d'équivalence (invariance de Lorentz); la physique des ondes gravitationnelles, notamment via la modélisation des formes d'ondes dans différents contextes astrophysiques (pulsars, supernovae, inspirals, coalescences); les tests de la théorie de la gravitation via l'imagerie ou la variabilité autour d'objets compacts comme Sgr A*, le trou noir au centre de notre Galaxie, sont à l'interface entre PNGRAM et PNHE.

PNPS Des liens anciens existent autour de la physique des disques et des jets, présents dans les objets stellaires jeunes. Les mécanismes en œuvre dans le transport turbulent de moment cinétique, l'interaction disque-magnétosphère, ou les structures d'accrétion-éjection sont analogues. D'autres thèmes se développent: impact des binaires X massives sur la formation stellaire et leur utilisation comme traceur de celle-ci; rôle de la binarité dans l'évolution des

étoiles massives; étude des progéniteurs de supernovae et sursauts γ . 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 γ 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. 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 car les conditions physiques ambiantes peuvent être très différentes. Des échanges sur ces sujets existent aussi avec la communauté laser-plasma de l'INP et du CEA.

2.3 Faits saillants

Astrophysique multi-messagers

Détection d'ondes gravitationnelles et de leurs contreparties électromagnétiques.

L'année 2017 a marqué la naissance de l'astrophysique multi-messagers des ondes gravitationnelles, avec la détection par les interféromètres Advanced LIGO-Virgo des ondes gravitationnelles générées par la coalescence d'un système binaires d'étoiles à neutrons (GW170817) et l'observation de ses contreparties électromagnétiques. Ces observations ont confirmé plusieurs prédictions théoriques, notamment qu'il existe un type d'explosion stellaire, la kilonova, qui joue un rôle clé dans la production par processus r d'éléments lourds dans l'Univers et que les coalescences de systèmes binaires d'étoiles à neutrons sont bien à l'origine au moins d'une partie des sursauts gamma courts. Ces interféromètres ont permis aussi de sonder la population de systèmes binaires de trous noirs de masses stellaires et ils ont révélé des objets dont l'existence met en difficulté les modèles d'évolution stellaire.

L'envoi d'alertes publiques et automatiques pour faciliter la recherche de contreparties, pendant la période d'observation O3 en 2019-2020, a été une évolution majeure dans ce domaine.

Vers la première détection d'un signal gravitationnel aux très basses fréquences ?

Les Pulsar Timing Arrays (PTAs) sont des ensembles de pulsars à rotation ultra-stable, dont les impulsions radio sont chronométrées par certains grands radiotélescopes dans le monde. Des collaborations internationales (EPTA en Europe, PPTA en Australie, NANOGrav en Amérique, etc.) observent régulièrement ces objets, afin de rechercher dans leurs données de chronométrie les traces du passage d'ondes gravitationnelles de très basse fréquence (typiquement, autour du

nHz) potentiellement engendrées par des systèmes binaires de trous noirs super-massifs à des distances cosmologiques. En 2020, le consortium NANOGrav a publié la détection d'un signal commun à tous les pulsars du PTA, dans la bande 1 à 5 nHz. Le signal a depuis été confirmé par les collaborations EPTA et PPTA. L'amplitude et l'indice spectral de ce signal commun sont compatibles avec l'émission attendue de trous noirs binaires super-massifs, mais la corrélation spatiale quadrupolaire, preuve définitive d'une émission gravitationnelle, n'a pas encore été mise en évidence.

[Observation d'une corrélation temporelle et angulaire entre des neutrinos et des photons de haute énergie](#)

L'année 2017 a vu la mise en évidence d'une corrélation entre un neutrino de haute énergie détecté par IceCube, et des émissions gammas de haute énergie observées avec Fermi et MAGIC, en provenance d'un blazar. Ce résultat semble indiquer que des rayons cosmiques hadroniques sont accélérés jusqu'à de hautes énergies dans les jets alimentés par le trou noir supermassif au centre du blazar.

Physique et astrophysique des objets compacts

[Premières observations GRAVITY du centre Galactique](#)

Grâce aux observations de l'EHT du trou noir supermassif au centre de M87 on a pu obtenir les premières images de l'ombre d'un trou noir. Ces images confirment la théorie d'Einstein et montrent clairement la présence de rotation. En ce qui concerne la Voie Lactée, le niveau de précision astrométrique atteint par l'instrument GRAVITY apporte des contraintes spectaculaires sur l'environnement du trou noir central de notre Galaxie. Les mesures de position de l'étoile S2 ont mis en évidence l'effet de rougissement gravitationnel prédit par la théorie d'Einstein. GRAVITY a pu observer la trajectoire circulaire de la matière à la périphérie de l'horizon des événements lors d'observations de sursauts de lumière en provenance de l'environnement immédiat du trou noir.

[Premières détections VHE des sursauts gamma](#)

Les premières détections de l'émission de rayons gamma VHE de plusieurs sursauts gamma par des télescopes Cherenkov au sol ont fourni de nouvelles informations importantes sur les processus d'émission de ces phénomènes. Des observations supplémentaires et plus détaillées avec la génération actuelle de ces instruments et bientôt complétées par les observations avec CTA, en partie déclenchées par le satellite SVOM, devraient permettre des avancées significatives de la compréhension des sursauts gamma.

[Fast radio bursts](#)

Ces dernières années ont vu une forte augmentation des détections de sursauts radio rapides (Fast Radio Bursts - FRB). Ces flash radio intenses et très brefs (quelques millisecondes) se situent bien au-delà de notre Galaxie à des distances parfois cosmologiques. L'essentiel des FRB sont des événements non récurrents, rendant l'identification de contreparties difficile. L'origine de ces sursauts et la nature des progéniteurs restent inconnues. Parmi les FRB découverts à ce jour, plusieurs sources montrent des sursauts répétés, laissant espérer une prochaine identification des progéniteurs. L'observation de la coïncidence d'un sursaut radio et d'un sursaut en rayons X

provenant du magnétar galactique SGR1935-243 en 2020 a récemment fourni les premières indications.

Rayonnement cosmique et astronomie gamma

Les expériences Voyager (MeV-GeV), AMS-02 (GeV-TeV), ainsi que CALET et DAMPE (jusqu'à ~10 TeV) ont fourni des mesures de haute précision du spectre local du rayonnement cosmique qui stimulent les efforts de modélisation, et créent des synergies avec des domaines connexes : physique des plasmas (via le transport de particules dans la turbulence ainsi que l'accélération de particules), physique nucléaire (via les sections efficaces), physique stellaire (via les sources) ou même physique du milieu interstellaire (via les phénomènes d'ionisation).

En parallèle, le relevé profond du plan galactique au-delà de 200 GeV par la collaboration H.E.S.S. a permis d'étudier les populations d'objets accélérateurs de particules dans la Galaxie, parmi lesquels une majorité de nébuleuses de pulsar. Une vue complémentaire a été fournie par l'expérience HAWC qui a découvert des halos d'émission très étendus autour de pulsars âgés, un phénomène inattendu aux conséquences multiples sur la phénoménologie du rayonnement cosmique. Combinées à plus de dix ans d'observations Fermi-LAT et des premiers résultats de LHAASO, ces observations couvrent plus de 6 décades en énergie et offrent une vue inédite sur le cycle de vie du rayonnement cosmique.

Aux énergies extrêmes (1-100 EeV), la phénoménologie du rayonnement cosmique a été marquée par la détection d'anisotropies dans les cartes du ciel des directions d'arrivées, à différentes échelles et différentes énergies. Les résultats de l'observatoire Pierre Auger semblent confirmer l'origine extra-galactique du rayonnement cosmique vers 10 EeV et montrent une corrélation partielle avec des catalogues de noyaux actifs de galaxies et de galaxies à flambée d'étoiles vers 40-50 EeV.

2.4 Forces et faiblesses

La communauté PNHE est à peu près également répartie entre l'INSU et l'IN2P3, avec aussi une forte composante issue du CEA. L'interaction entre chercheurs des différents instituts fonctionne bien et est une grande force. Le PNHE souhaite que les efforts de coordination et de vision commune entre INSU, IN2P3 et CEA soient poursuivis (car la science n'avance pas par compartiment étanches) pour ne pas pénaliser l'impact scientifique de la communauté française dans les grands projets.

La communauté PNHE est bien impliquée dans la plupart des grands projets futurs. De plus, on peut trouver, au sein de notre communauté, plusieurs développements à la pointe dans le domaine de la théorie et simulation. Il est important de maintenir (et développer) ce niveau aussi dans le futur. Par contre, on peut remarquer que la communauté INSU qui travaille sur le phénomènes extragalactique (du point de vue observationnel) aurait besoin de s'agrandir.

3. Fonctionnement du PNHE

3.1 Composition du conseil scientifique

Le CS est composé de chercheurs couvrant les thématiques du programme.

En 2017 il était composé par :

Denis Allard - APC (IN2P3)
Guillaume Dubus (directeur) - IPAG (INSU)
Thierry Foglizzo - DAp/UMR AIM (IRFU)
Lucas Guillemot - LPC2E (INSU)
Julien Lavallo - LUPM (INP)
Martin Lemoine - IAP (INSU)
Frédérique Marion - LAPP (IN2P3)
Pierrick Martin - IRAP (INSU)
Pierre-Olivier Petrucci - IPAG (INSU)
Thierry Pradier - IPHC (IN2P3)
Jérôme Rodriguez DAp/UMR AIM (IRFU)
Fabian Schüssler - DPhP (IRFU)
Régis Terrier (président) - APC (IN2P3)
Susanna Vergani - GEPI (INSU)

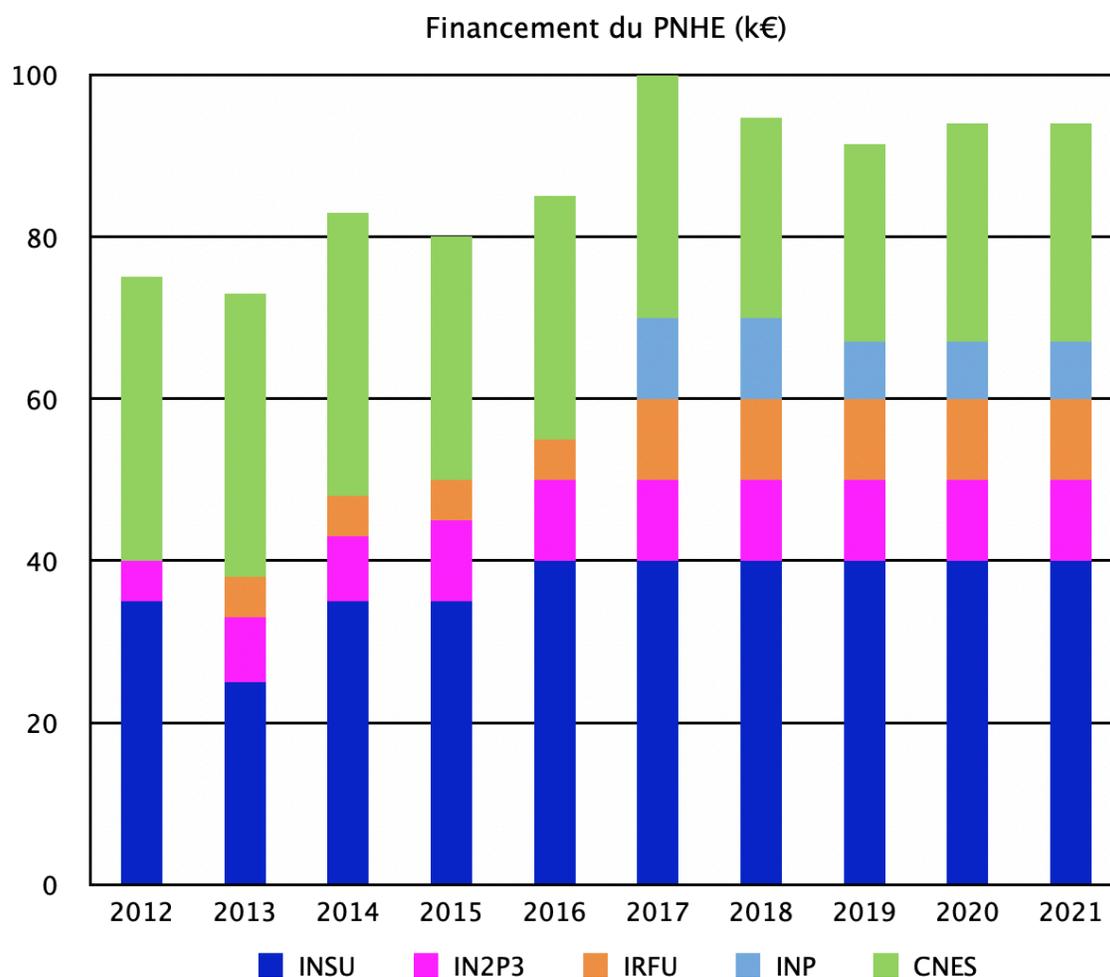
Le CS actuel est composé par :

Francesca Calore - LAPTH (INP)
Mickael Coriat - IRAP (INSU)
Thierry Foglizzo - DAp/UMR AIM (IRFU)
Lucas Guillemot - LPC2E (INSU)
Martin Lemoine - IAP (INSU)
Frédérique Marion - LAPP (IN2P3)
Pierrick Martin - IRAP (INSU)
David Maurin - LPSC (IN2P3)
Pierre-Olivier Petrucci - IPAG (INSU)
Thierry Pradier - IPHC (IN2P3)
Jérôme Rodriguez DAp/UMR AIM (IRFU)
Fabian Schüssler - DPhP (IRFU)
Régis Terrier (président) - APC (IN2P3)
Susanna Vergani (directrice) - GEPI (INSU)

Par rapport au CS en charge en 2017, 3 membres et la direction ont été renouvelés au fil de l'eau entre 2017 et 2021.

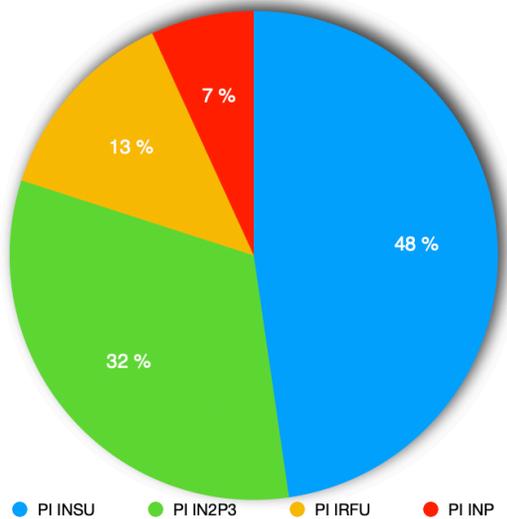
3.2 Appel d'offre

Le budget du PNHE entre 2017 et 2021 a oscillé entre 100 k€ (2017) et 91.4 k€ (2019). Les contributions des tutelles au dernier budget sont respectivement de 40 k€ (INSU), 27 k€ (CNES), 10 k€ (IN2P3), 10 k€ (CEA) et 7k€ INP. Les proportions sont restées sensiblement les mêmes au cours de la mandature. En moyenne, le CS alloue environ 10k€/an à son fonctionnement et aux actions qu'il mène (ateliers, réunions,...).

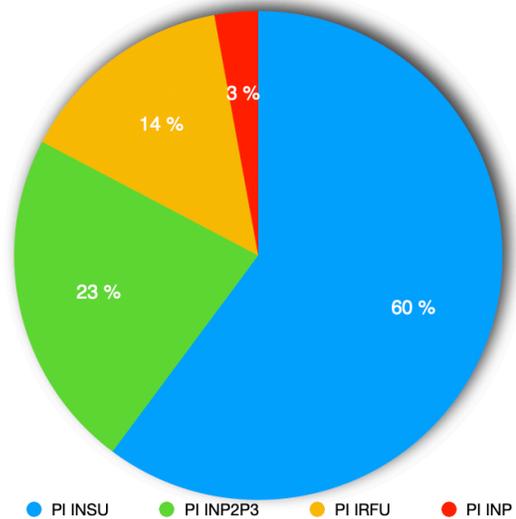


Le nombre de demandes déposées sur la période 2017 à 2021 est de 26 en moyenne, avec une nette baisse en 2021 (16 demandes) que nous estimons être due à la COVID : d'une part à cause de la forte baisse du nombre de déplacements, mais aussi par le report (quand cela était possible) des reliquats des crédits alloués en 2020 et non utilisés. En moyenne, environ 13 demandes sont portées par l'INSU, 9 par l'IN2P3, 3 par le CEA et 2 par l'INP. Nous avons remarqué une augmentation des demandes portées par des chercheurs IN2P3 par rapport à la période précédente. Le conseil constate aussi que la plupart des demandes regroupent des participants appartenant à des instituts différents. Cela témoigne de la vitalité des collaborations inter-instituts que le PNHE contribue à soutenir.

Répartition des PI par institut 2017-2021



Répartition des PI par institut 2012-2016



L'appel d'offre des PN a largement évolué pendant la dernière année, avec la mise en place par l'INSU d'un encadrement par outils, c.a.d. différentes catégories de projets avec des caractéristiques, budgets et durées spécifiques. Le PNHE a participé aux rencontres organisées par le DAS INSU/AA pour la compréhension, l'adaptation et le retour sur cette nouvelle organisation. Le CS du PNHE a fait remarquer que, même si la définition des différents types d'outils ne représente pas les projets et les soutiens habituels du PNHE, toutes les demandes de financement peuvent a priori s'y adapter notamment grâce aux catégories spécifiques INSU/AA d'animation de la communauté et d'organisation/participation de/à des colloques, conférences, ateliers. Par contre, les fourchettes des montants de chaque catégorie, trop élevées, ne sont pas adaptées aux demandes de notre communauté et au budget à disposition du PNHE. On arriverait au financement de moins d'une dizaine de demandes par an. Cela correspondrait à un vrai changement de paradigme de la politique du PNHE par rapport aux actions et financements qui ont été faits jusqu'à aujourd'hui. Lors du dernier appel d'offre, nous avons été assez flexibles sur ces fourchettes. La communauté a donc pu s'adapter à cette nouvelle organisation assez facilement. Un autre point critique est la nature pluriannuelle de la plupart de ces types de projets. En tenant compte du fait que le budget à disposition du PNHE est établi sur l'année, le CS ne peut pas garantir des financements pour les années suivantes. Le CS a donc décidé de ne pas attribuer de financements au-delà de l'année 2021. De plus, vu la nature des demandes que nous recevons et le budget limité à disposition du CS, on préfère voir l'avancement d'une demande d'une année à l'autre et renouveler notre soutien si elle le mérite, plutôt que de s'engager sur un soutien sur plusieurs années.

Procédure d'évaluation

Chaque demande de financement déposée a fait l'objet d'une évaluation par deux membres du CS, choisis pour leur expertise complémentaire et pour assurer une rotation dans l'examen des sujets. Chaque demande a ensuite fait l'objet d'une discussion avec l'ensemble du CS. Les membres du CS participant à un projet n'assistent pas à la discussion. Les critères de sélection affichés par le CS dans l'appel d'offre étaient, outre la qualité du projet scientifique :

- son aspect fédérateur pour la communauté ;
- sa contribution au retour scientifique des grands instruments ;
- son impact sur la réflexion de prospective de notre discipline ;
- la clarté et la concision de la demande.

L'avis du CS sur chaque proposition a été transmis aux porteurs ainsi qu'aux instances. Les projets financés sont fortement encouragés à participer aux ateliers organisés par le PNHE (voir section [3.4](#)).

Les comptes rendus publics du CS incluent les commentaires et conseils plus généraux sur l'appel d'offre. Ils sont disponibles sur le [site web du PNHE](#).

Projets financés

La pression sur l'appel d'offre est en moyenne de 1,6. Le financement moyen et médian accordé par projet est d'environ 3,5 k€. La presque totalité des demandes a reçu au moins un financement partiel. La liste, publique, des projets financés est sur le [site web du PNHE](#).

Cinq types d'actions se dégagent clairement : Groupes de travail; Organisation d'ateliers nationaux; Organisation de conférences internationales; Organisation d'écoles; Soutien de base.

Les **groupes de travail** réunissent typiquement moins de 10 participants souhaitant développer un programme de recherche commun précis. Une fraction importante des groupes de travail concerne des activités de modélisation, qui n'ont pas beaucoup d'autres ressources et pour qui le soutien du PNHE est particulièrement important. Certains groupes ont pu ensuite obtenir un financement plus important, de type ANR ou ERC. Les groupes de travail permettent également de soutenir, dans une certaine mesure, certains projets ou missions en phase de développement (par ex: mini-Euso, GRAND ou SWGO). Dans ce cadre, quelques actions de R&T ont été soutenues lorsqu'un apport ciblé du PNHE permettait d'agir comme levier.

Les **ateliers** réunissent de 10 à 50 participants, essentiellement français, pendant 1 ou 2 jours autour d'un thème particulier. Ces ateliers ont un rôle fédérateur fort en particulier sur les sujets aux interfaces. Le CS a ainsi fortement soutenu les ateliers [TS2020](#) pour fédérer la communauté des transitoires (voir plus bas). Les ateliers [CFRCOS](#) autour de la communauté française travaillant sur le rayonnement cosmique montrent également l'importance pour le fonctionnement et la structuration du domaine. On note que certains ateliers sont organisés en lien avec des groupes de travail et pourraient être plus largement ouverts à la communauté.

Avec plus d'une dizaine de colloques et conférences organisés, les **colloques et conférences internationaux** portés par des chercheurs français et ayant lieu en France sur des sujets d'intérêt

pour le PNHE représentent une part nettement plus importante des projets soumis au PNHE qu'elle ne l'était auparavant. Les conférences « [Cosmic rays and the interstellar medium](#) » sont emblématiques d'une action ayant évolué d'un atelier national spécialisé à une conférence internationale mettant en valeur la force interdisciplinaire de la communauté française PCMI et PNHE. Citons également les conférences [PONT](#), le [symposium IAU 331](#) sur les 30 ans de SN 1987 ou l'atelier international [GWPAW17](#) sur les ondes gravitationnelles.

Plusieurs **écoles**, nationales et internationales, portées par des chercheurs français et ayant lieu en France sur des sujets d'intérêt pour le PNHE ont été financées. Plusieurs sessions de l'école des Houches ont ainsi été organisées ([plasma](#), chocs interstellaires etc), une [école à Cargèse](#) sur les explosions stellaires en 2019 etc. L'école organisée tous les trois ans par le CS avec Roland Triay fait partie de ce type d'actions (cf section [3.4](#)).

Plusieurs groupes de travail proposent de facto (implicitement ou de façon explicite) des programmes pluriannuels. Le CS a soutenu quelques groupes de travail chaque année pendant la durée de son mandat et un nombre assez important pendant au moins deux années. Ces projets ont été réexaminés chaque année. En général, plusieurs projets incluent dans leur demande de crédits la participation à des conférences ou ateliers. Dans plusieurs cas, donc, le financement relève du **soutien de base**, notoirement insuffisant voire inexistant dans un nombre croissant de laboratoires.

3.4 Réunions du PNHE

Ateliers PNHE à la SF2A

Le CS organise tous les ans son atelier général dans le cadre de la semaine de l'astronomie française et supporte/contribue à l'organisation d'autres ateliers plus spécifiques concernant les thématiques du PNHE. En considérant le nombre et la participation à ces ateliers, le CS a décidé de donner un coloriage à l'atelier général afin de diversifier les thématiques présentées et solliciter la participation des chercheurs (en particulier les jeunes chercheurs)

Outre l'atelier général, le PNHE a co-organisé les ateliers suivants lors de la SF2A:

2017

- *Astrophysique de laboratoire des hautes densités d'énergie (high energy density laboratory astrophysics)* par PNHE / PNST

2018

- *Etoiles massives: de la formation aux stades ultimes, un état des lieux des recherches en France* (S.D. Vergani pour le PNHE dans le SOC)

2019

- *Demain l'ELT ! Quelle science avec ses 1ers instruments ?* par PNPS / PNCG / PCMI / PNP / PNHE
- *Particle acceleration in astrophysical and space plasmas* par PNST / PNHE
- *Faire de l'astrophysique avec les ondes gravitationnelles* (S.D. Vergani pour le PNHE dans le SOC)

2021

- *Demain l'ELT ! Quelle science dans quel contexte dans les années 2030* par PNPS / PNCG / PCMI / PNP / PNHE
- Le PNHE a également validé les ateliers *Fast radio bursts : Atouts et perspectives pour la communauté* et *Activités impulsives et éruptives dans les plasmas astrophysiques*.

Les journées de la SF2A n'ont pas eu lieu en 2020.

Le conseil de la SF2A sollicite chaque année le CS pour un exposé en session plénière. Le CS a proposé les orateurs suivants:

2017

- Jonathan Biteau : *Extragalactic Background Light: probing the cosmic optical and infrared backgrounds with gamma rays*.

2018

- Susanna Vergani : *GRB, Kilonova et GW170817*

2019

- Maïca Clavel : *centre Galactique en rayons X et activité du trou noir central*
- Guy Perrin (PNHE-PNGRAM) : *Premiers résultats de Gravity*
- A noter aussi que Lucas Guillemot (membre du CS du PNHE) a été l'orateur en session plénière pour l'AS SKA-LOFAR sur *10 ans de Fast Radio Bursts (FRBs): où en sommes-nous ?*

2021

- Gilles Theureau *PTA: Résultats récents et perspectives*

Journées / Ateliers PNHE

Outre l'atelier général lors des journées de la SF2A, le CS a pris l'initiative d'organiser des réunions supplémentaires suivant les besoins identifiés.

A cette fin, le PNHE a coorganisé et supporté la série d'atelier *Transient Sky in 2020* (TS2020, [1ere](#), [2eme](#), [3eme](#) édition). Ces ateliers ont joué un rôle majeur pour la formation, coordination et coopération de la communauté française qui travaille autour des phénomènes transitoires. Les trois premières éditions de ces ateliers ont eu lieu en présentiel une fois par an de 2017 à 2019, tandis que maintenant ils ont lieu sous forme de demi-journées en ligne tous les deux mois.

Le CS du PNHE a aussi organisé des [Journées Théorie](#) en octobre 2018, qui ont permis de rassembler plus d'une soixantaine de participants autour des thèmes principaux du PNHE, et qui ont donné lieu à plus d'une trentaine de présentations.

En 2019, le PNHE a aussi soutenu et co-organisé, avec l'AS SKA-LOFAR et l'action fédératrice RT21 de l'Observatoire de Paris, l'atelier *Transitoires radio et SKA*, afin d'augmenter la mobilisation de la communauté autour de SKA dans le cadre de la préparation de la prospective INSU 2019 et de la révision de la feuille de route nationale des TGIR.

A la suite du renouvellement, nous organiserons des journées PNHE en septembre 2021 ayant comme thème *Les hautes énergies en France dans la décennie 2020 et au-delà*. Ces journées

seront ouvertes à toutes et à tous et permettront de réunir les expertises théoriques, observationnelles, instrumentales et de traitement de données. Elles seront l'occasion i) de mieux connaître le nombreux projets majeurs pour la communauté française des hautes énergies dont la décennie à venir verra la mise en service où sera critique pour la préparation ; ii) de faire émerger les cas scientifiques les plus intéressants pour la communauté française ; iii) de recenser les forces et les besoins.

3.5 Autres actions

Expertise

L'avis du CS du PNHE sur certains projets est régulièrement sollicité par la CSAA et par le CNES. Les avis transmis font l'objet d'une discussion collégiale au sein du CS, dans le respect des règles habituelles de déontologie. Le CS apprécie ces sollicitations qui lui permettent de compléter sa connaissance des activités en cours dans la communauté. Il est également très apprécié qu'un représentant du CS soit invité aux réunions de la CSAA et du groupe astro du CNES, ainsi qu'aux **prospectives** CNES et INSU/AA, ce qui permet un bon échange d'informations avec les tutelles concernées. Un effort important a été fourni par le CS en 2019 à l'occasion de la prospective Astronomie-Astrophysique de l'INSU. La directrice et le président du CS du PNHE ont participé aux réunions de travail du groupe « Thématiques » et, avec le CS du PNHE, ils ont rédigé les parties du document concernant le PNHE. Il faut souligner que tous les membres du CS se sont mobilisés, indépendamment de leur institut d'origine, témoignant ainsi du caractère commun de nos thèmes de recherche. La directrice du PNHE a été co-coordinatrice aussi du sous-groupe « Instrumentation sol hautes énergies et astronomie multi-messagers » du groupe « Prospective des Moyens » et a contribué à la rédaction du document le concernant. Ces documents font partie du rapport final de la prospective INSU/AA. Une démarche similaire est souhaitable aussi lors des prospectives IN2P3. Le président du CS, ainsi que deux membres du CS, ont participé à l'exercice de prospective IN2P3 qui vient de se terminer. Bien que les PN soient des entités INSU, la communauté les concernant et le CS relèvent d'instituts différents. La participation du PNHE nous semble donc très utile, compte tenu des nombreuses interactions et projets communs de la communauté PNHE INSU/AA et IN2P3. Toujours en ce qui concerne les interfaces INSU/AA – IN2P3, la directrice du PNHE fait partie du CS du **GDR** « Ondes Gravitationnelles » au titre de représentante du PNHE. Cela a été très profitable et nous souhaitons que cette présence soit maintenue si le GDR est renouvelé.

Le PNHE a parfois pu jouer aussi en partie le rôle de récepteur et amplificateur de **messages** et avis de la communauté. L'exemple le plus marquant dans ce sens est la lettre que nous avons écrit au board du réseau Astronet pour exprimer le mécontentement du CS et de la communauté vis à vis du manque de visibilité des thématiques hautes énergies dans la première version des documents de la *Roadmap Astronet*.

L'avis du CS a pu être ponctuellement sollicité à l'occasion d'organisation de journées, de **nominations** dans certains groupes de travail, conseils scientifiques, etc. Par exemple, Mickael Coriat fait partie du comité stratégique de Nançay, Jerome Rodriguez fait partie du groupe de

suivi de l'instrument HARMONI, Sylvain Chaty fait partie du CS du T193 au titre de représentant du PNHE.

Sollicité par la section 17 du comité national du CNRS, le CS PNHE a envoyé chaque année ses propositions détaillées de candidat(e)s pour la **médaille** d'argent et de bronze. La candidature de Benoit Cerutti (IPAG) a été retenue en 2020. Le PNHE a envoyé aussi des propositions pour la section 1; Matthieu Renaud (LUPM) a reçu la médaille de bronze en 2017. Dans le futur il faudrait se renseigner aussi sur la démarche de la section 2 afin d'y faire remonter aussi des propositions si possible ; Frédérique Marion et Francesca Calore, membres du CS du PNHE, ont reçu la médaille d'argent et de bronze du CNRS (section 2) en 2017 et 2021, respectivement.

Site web et lettre d'information

Le PNHE a mis en place un nouveau site web <http://pnhe.org> ou <http://pnhe.cnrs.fr> depuis l'automne 2014. Le site est hébergé par la DSI du CNRS, ce qui permet de pérenniser le site par rapport à un hébergement dans un laboratoire. Un email contact@pnhe.org fournit un point de contact unique à la communauté.

Le site fonctionne sous Joomla et est facilement mis à jour. Les nouvelles importantes apparaissent en première page. Les rubriques actualités, conférences, postdocs et thèses sont alimentées par les annonces transmises au CS ou via l'adresse email générique. Les annonces sont mises hors ligne automatiquement après leur date de péremption. Le site web archive et diffuse les comptes rendus du CS, la lettre d'information mensuelle, les programmes et présentations des réunions du PNHE et de l'ex GdR PCHE.

La liste de diffusion n'est plus hébergée par le site web mais est maintenant hébergée et archivée au CC IN2P3. Elle est principalement utilisée par la lettre d'information du PNHE. Les échanges internes au CS se font à l'aide d'une liste de diffusion privée, hébergée et archivée au CC IN2P3.

Ecole PNHE

L'école « astroparticules » lancée en 2007 par Bernard Degrange (LLR) et Roland Triay (CPT) est soutenue depuis sa création par le PNHE. L'école, organisée tous les trois ans environ, est positionnée à l'interface pour une formation croisée des personnels INSU, IN2P3, INP et joue donc un rôle important dans la structuration de la communauté PNHE. Le CS du PNHE propose les thèmes et s'implique dans le comité d'organisation scientifique. L'école est financée par les inscriptions des participants, par un soutien de la formation permanente du CNRS ainsi que par des crédits du PNHE. Après une école autour du thème des ondes gravitationnelles (2013) et une sur la physique de l'univers en rayons X (2016), le CS a décidé d'organiser la suivante en 2019 sur la physique du rayonnement cosmique. Après plus d'une décennie de nouveaux résultats sur le domaine et en préparation de l'arrivée de CTA, ce sujet est ressorti clairement. Malgré des difficultés d'organisation (en particulier, plusieurs reports), l'école s'est tenue avec succès en novembre 2019 (voir: http://www.cpt.univ-mrs.fr/~cosmo/WEB_EAP_19/index.php). La fréquence et le mode d'organisation des écoles du PNHE seront revus à l'avenir.

4. Projet de renouvellement

4.1 Evolution thématiques et instrumentales

L'exploitation d'instruments de dimension mondiale (listés ci-après) avec des performances révolutionnaires marquera les évolutions thématiques et amènera aussi à une montée en puissance du domaine univers transitoire et multi-messagers. Cette exploitation nécessite bien évidemment d'une expertise à la pointe de la communauté française du point de vue observationnel, mais également du point de vue théorique, indispensable pour le retour scientifique de ces projets.

Advanced LIGO-Virgo En ce qui concerne la science liée à la détection d'ondes gravitationnelles (caractérisation de la population de sources, évaluation de leur contribution éventuelle à la matière sombre, exploration spectroscopique des trous noirs et de la structure des étoiles à neutrons...) les enjeux de la période à venir sont de trois ordres : (i) faire progresser la sensibilité des instruments actuels et préparer la génération suivante ; (ii) extraire la science dévoilée par les observations d'ondes gravitationnelles, complétées par des observations multi-messagères ; (iii) se donner les moyens de réaliser ces observations dans un contexte multi-messager, en assurant la disponibilité d'instruments d'observation sur l'ensemble du spectre électromagnétique et la mise en œuvre de procédures efficaces pour exploiter les alertes. Cette démarche s'appuiera sur le réseau de détecteurs d'ondes gravitationnelles interférométriques terrestres Virgo en Europe, qui sera déployé dans sa phase AdV+, et LIGO aux Etats-Unis, rejoints par KAGRA au Japon et à terme un troisième détecteur LIGO en Inde.

PTA La convergence définitive des analyses actuellement en cours par les collaborations EPTA, PPTA et NANOGrav est attendue pour 2022. Une détection confirmée ouvrirait une fenêtre sur l'étude des trous noirs binaires super-massifs. Au cours de la période 2021-2025, de nouvelles collaborations entreront en jeu : CPTA en Chine, InPTA en Inde et de nouveaux grands instruments plus sensibles ajouteront leurs données de chronométrie aux lots de données disponibles, tels que FAST, MeerKAT ou SKA.

CTA La période 2021-2025 verra l'achèvement du Cherenkov Telescope Array (CTA). Développé par un consortium international réunissant presque toute la communauté mondiale des très hautes énergies, CTA sera le premier observatoire ouvert dans ce domaine d'énergie. Il observera un domaine d'énergie s'étendant jusqu'à 300 TeV en combinant une sensibilité et une résolution angulaire inégalées. Près de la moitié du temps d'observation sera proposé à la communauté, tandis que le reste sera essentiellement dédié à la conduite de projets ambitieux comme des relevés profonds ou des suivis à long terme d'objets variables.

SVOM Cette mission sino-française, dont le lancement est prévu en 2022, permettra à la communauté française de jouer un rôle de premier plan dans la thématique des GRB et de l'univers transitoire. Les instruments multi-fréquences à bord du satellite ainsi que le réseau de suivi-sol de la mission permettront à la communauté liée à SVOM d'être l'un des acteurs principaux dans la détection et l'étude des GRB, mais aussi dans la recherche des contreparties des ondes gravitationnelles et la caractérisation des objets transitoires. La synergie multi-

longueurs d'onde avec les observatoires au sol garantira une exploitation scientifique sans précédent.

LSST Les observations du LSST du Vera Rubin Telescope fourniront un relevé du ciel sans précédent en termes de volume, sensibilité et couverture temporelle, qui va révolutionner le domaine de l'univers transitoire en termes de nombre, type et suivi d'objets détectés. Une exploitation scientifique optimale dépendra de la capacité à trier efficacement et rapidement ces observations et de la coordination avec d'autres instruments de spectroscopie ou imagerie multi-longueurs d'onde. Des résultats majeurs sont attendus sur les phénomènes multi-messagers et sur les transitoires rapides (comme les SNe jeunes ou les GRB) concernant, entre autres, l'étude de l'émergence du choc, la structure des jets, le rôle de la binarité.

SKA La période 2021-2025 verra la construction de la phase 1 du Square Kilometer Array sur les sites australien et sud-africain et potentiellement les premières observations scientifiques avec un réseau partiel. Les domaines d'intérêt principaux de la science de SKA pour le PNHE – l'univers transitoire radio (systèmes accrétants, sursauts gamma, supernovae, FRB, suivi GW...) et la physique fondamentale à l'aide des pulsars (PTA, binaires de pulsars et binaires pulsar - trou noir, équation d'état des étoiles à neutrons...), vont subir une transformation majeure grâce au gain de sensibilité et de couverture instantanée du ciel que fournira SKA comparé aux instruments actuels.

Le projet **KM3NeT** est un détecteur sous-marin situé en France et en Italie. Le site italien (ARCA) est spécialisé dans l'astrophysique des neutrinos de très haute énergie. Actuellement en construction, KM3NeT s'appuie sur le succès de l'expérience de génération précédente Antares et commencera ses opérations aux alentours de 2024. L'enjeu est de caractériser d'obtenir une grande statistique d'événements avec une bonne résolution et une bonne couverture du ciel pour pouvoir mesurer précisément le fond diffus et permettre les observations multi-messagers de sources. Une partie de la communauté participe aussi à **GRAND**, projet exploitant une nouvelle technique de radio-détection des neutrinos à très haute énergie, permettant potentiellement de voir les neutrinos cosmogéniques. Ce projet né en France et principalement financé par la Chine est maintenant dans une étape de R&D.

En plus de ces projets majeurs et des autres projets déjà en exploitation et/ou concernant une plus petite partie de la communauté, la période 2021-2025 visera aussi la préparation aux grands projets futurs. 2021-2025 sera une période décisive pour faire évoluer au sein de la communauté française le projet Einstein Telescope (ET; projet européen d'un interféromètre terrestre de troisième génération) et commencer à préparer l'exploitation astrophysique du projet **LISA** (interférométrie spatiale au millihertz, lancement prévu en 2032). Une partie de la communauté sera très investie dans la préparation de la mission **ATHENA** (lancement prévu en 2031) et, si sélectionnée par l'ESA pour M5, THESEUS (mission pour utiliser les GRBs comme sondes pour étudier l'évolution de l'univers).

Il faudra aussi maintenir et rendre plus efficaces les efforts de la communauté pour un projet autour du MeV, nouvelle frontière du γ , très soutenu par une partie significative de la communauté mais sans succès jusqu'à aujourd'hui. A noter aussi que, motivé par le succès de la détection de rayons gamma de haute énergie avec des détecteurs de particules (HAWC et

LHAASO), la communauté internationale est en train de préparer la construction d'un observatoire similaire en hémisphère sud (SWGGO). Une partie de la communauté française est intéressée par ce projet, pas soutenu par les instituts jusqu'à maintenant.

L'ère des big data

Un des grands enjeux de la décennie à venir est la maîtrise par la communauté des outils de stockage, communication, traitement, triage et interprétation de grands flux de données. Les nouveaux instruments et survey (CTA, LSST, SKA...) vont fournir des Petabytes de données à analyser et interpréter. Les méthodes de "machine learning" ont montré tout leur potentiel et ont déjà un grand impact, mais ne sont encore pas suffisamment connues et utilisées par la communauté scientifique. Des projets comme LSST ont déjà bien intégré ces nouveaux challenges. Il est nécessaire et urgent pour la communauté de se familiariser, utiliser et développer ces outils et plateformes.

Simulations numériques

La simulation numérique, combinée au développement de la puissance de calcul, occupe un rôle de plus en plus important dans la thématique. En particulier, les simulations Particle-In-Cell (PIC) sont amenées à jouer un rôle grandissant en astrophysique des hautes énergies, car elles permettent d'aborder au niveau cinétique l'ensemble des relations non-linéaires entre les différents constituants d'un plasma. Cette technique reste coûteuse en temps de calcul et ne peut aujourd'hui que simuler de petits volumes et durées par rapport aux échelles des phénomènes astrophysiques. Il est impératif de soutenir le développement de la puissance numérique en France comme en Europe et de s'impliquer dans l'élaboration de nouvelles méthodes numériques pour aller plus loin, en espace, en temps, en dimensionnalité pour aboutir à une description plus fidèle des conditions physiques des sources.

Nouvelles classes de matière noire

La thématique de la matière noire a connu une évolution significative cette dernière décennie, d'abord en raison de la précision observationnelle croissante, ensuite par les questions posées par l'inclusion des baryons dans les simulations cosmologiques, et enfin par le fait que le *grand collisionneur de hadrons* (LHC) n'a pas encore découvert de particules exotiques autour du TeV. Le WIMP (*weakly interacting massive particle*) a donc perdu sa suprématie par rapport à d'autres candidats (axions, neutrinos stériles, voire théories effectives). Certaines particules ont la propriété de s'annihiler ou de se désintégrer en s'accompagnant d'émissions spécifiques (rayonnement cosmique, électromagnétique, et/ou neutrinos); d'autres, comme les axions, peuvent être créés par conversion de photons thermiques dans les étoiles ou de photons de haute énergie issus des grands accélérateurs cosmiques. L'étude multi-messagers et multi-longueurs d'onde des phénomènes cosmiques de haute énergie constitue ainsi un laboratoire de premier choix pour l'identification de la matière noire.

Plusieurs observations questionnent la validité du scénario Λ CDM aux petites échelles. Les pistes les plus prometteuses concernent une matière noire (i) dotée d'auto-interaction (*self-interacting dark matter* – SIDM), possible compatibilité avec l'hypothèse WIMP (ii) constituée

de bosons ultra-légers avec une longueur d'onde de de Broglie de l'ordre du kpc (*ultra-light dark matter* – ULDM ; axions inspirés des théories de cordes ou autres), (iii) constituée d'une population de trous noirs primordiaux. La plupart de ces nouvelles pistes théoriques peuvent être testées via des observables relevant du PNHE.

4.2 Rôle et actions du PNHE

Avec tous ces grands projets à l'horizon et avec un contexte budgétaire défavorable (pénurie d'embauches, CDD et bourses de thèse), les actions du PNHE doivent viser à

- favoriser l'optimisation et la mise en commun des ressources (humaines, informatiques au sens large, budgétaire) disponibles pour garantir le retour scientifique de ces projets ;
- faire émerger les cas scientifiques où la communauté française peut jouer un rôle majeur ;
- stimuler et renforcer les collaborations inter-laboratoires, inter-programmes et inter-instituts ;
- aider la formation des jeunes chercheurs ;
- favoriser la diffusion des connaissances et la dissémination des résultats.

Cela sera fait grâce aux actions habituelles du PNHE

- l'appel d'offre ;
- l'animation de la réflexion prospective dans son domaine ;
- l'organisation d'ateliers favorisant les échanges ;
- la formation des étudiants et chercheurs ;
- la diffusion d'informations auprès de la communauté ;
- son action d'expertise auprès des tutelles.

Un point à regarder avec attention sera l'**évolution de l'appel d'offre**. Si les fourchettes de budgets des différents types de projets proposés par l'INSU sont confirmées et sans variation du budget à disposition du PNHE, le CS pourrait se voir contraint de sélectionner seulement quelques demandes (en faisant donc aussi des choix de politique scientifique) en dépit de l'action de soutien plus large et de base qui caractérise les résultats actuels de l'appel d'offre du PNHE.

Des actions plus spécifiques et ponctuelles seront menées quand nécessaire. Une action importante à cet égard est le travail de réflexion sollicité par le PNHE et entrepris par le groupe TS2020 sur les services d'observations liés aux *Alertes*. En effet les alertes sont un élément clé de beaucoup des projets mentionnés ci-dessus et impliquent une partie significative de travail de la communauté sur la production, gestion, traitement, dissémination, réception des alertes et sur les observations sur alertes. Tous ces aspects nécessitent des compétences spécifiques différentes mais souvent communes à plusieurs projets. Une action est en cours pour recenser les activités de

la communauté autour des *Alertes*. Le but étant d'optimiser ces activités et de faire qu'elles soient clairement reconnues comme service d'observation.

Même si la communauté est fortement présente dans tous les projets majeurs de la discipline, mentionnés ci-dessus, des aspects concernant la participation de la communauté à l'exploitation des données **multi-longueurs d'onde** seront à considérer en détail pour mener des actions, si nécessaire, afin de stimuler la communauté à une réflexion. Cela concerne les données radio dans le contexte de l'astrophysique multi-messagers et des transitoires, les données des instruments de l'ELT de l'ESO et la participation aux nouveaux instruments dédiés à la spectroscopie des transitoires comme SOXS à l'ESO ou NTE au NOT.

Les performances révolutionnaires de SKA et des relevés radio auront un impact significatif sur la science des transitoires. De plus, les observations radio pourraient être la clé pour la détection de contreparties électromagnétiques des ondes gravitationnelles et elles ont déjà démontré leur puissance pour la compréhension physique des jets associés. Bien que la communauté soit investie dans SKA, elle ne l'est presque pas dans ces aspects.

La France fournit un investissement majeur dans les instruments du ELT. Il est probable que ces instruments puissent apporter une contribution unique aussi à certaines thématiques du PNHE. Par contre on remarque que la communauté PNHE est peu au fait des performances de ces instruments et une réflexion sur l'utilisation pour des thématiques PNHE reste à mener. Les ateliers *Demain l'ELT !* qui ont lieu lors des journées de la SF2A sont un premier exemple des actions possibles dans ce sens.

En ce qui concerne les instruments dédiés à la spectroscopie des transients, des efforts sont en cours pour garantir une participation française au moins dans le contexte de la mission SVOM pour optimiser le retour scientifique de la mission par le suivi-sol spectroscopique des GRBs, fondamentale pour la science liée à ces phénomènes. Il faut voir si et comment les accompagner pour les finaliser et pour avoir accès à ces instruments aussi pour d'autres cas scientifiques.

Il faudra aussi mener des actions pour faire connaître le PNHE à un plus large nombre de chercheurs non permanents et solliciter leur inscription. Une partie de ces **jeunes** seront les chercheurs des années à venir, il est donc fondamental qu'ils soient insérés le mieux possible au sein de la communauté et mis au courant des actualités en cours. Cela nous permettra aussi d'avoir une perception plus complète de la composition de notre communauté.

L'évolution du **site web** sera aussi à discuter, en étudiant comment améliorer le site actuel ou au contraire comment passer à une gestion différente des informations, par exemple à travers l'espace MyCore du CNRS.

4.3 Renouvellement du CS

Compte tenu que plusieurs membres du CS ont déjà changé depuis 2017, nous proposons un renouvellement partiel de celui-ci. Nous anticipons que des changements seront probables avant 2025, de manière similaire à ce qui a eu lieu au cours des années passées.

Comme d'habitude, la composition du CS est faite de sorte à avoir une couverture la plus large possible des thématiques du PNHE et des représentants des différents instituts relevant de la communauté PNHE, en tenant également compte des départs qui auront lieu au fil de l'eau.

Nous proposons que le nouveau CS soit composé par :

Francesca Calore - LAPTH (INP)

Mickael Coriat - IRAP (INSU)

Stefano Gabici - APC (IN2P3)

Diego Götz - DAp/UMR AIM (IRFU)

Lucas Guillemot - LPC2E (INSU)

Astrid Lamberts - OCA (INSU)

Martin Lemoine - IAP (INSU)

Frédérique Marion - LAPP (IN2P3)

David Maurin - LPSC (IN2P3)

Jerome Novak - LUTH (INSU)

Pierre-Olivier Petrucci - IPAG (INSU)

Thierry Pradier - IPHC (IN2P3)

Fabian Schüssler - DPhP (IRFU)

Régis Terrier (président) - APC (IN2P3)

Susanna Vergani (directrice) - GEPI (INSU)

Deux membres du CS renouvelé font partie également des CS d'autres PN : Astrid Lambert fait partie du CS du PNPS et Jerome Novak fait partie du CS du PNGRAM et du CS du GDR OG. Cela vise au renforcement des interfaces inter-programmes. D'autres actions que le CS encouragera dans ce sens sont le soutien aux projets communs lors de l'appel d'offre et l'organisation d'atelier et/ou école communs. L'atelier multi-PN *Demain l'ELT!* mentionné ci-dessus et l'école Evry Schatzmann *L'évolution des étoiles massives: phases avancées, supernovae et sursauts gamma, objets compacts*, organisés avec le PNPS sont un exemple de ces activités dans le futur proche. Une école co-organisée par des membres de la communauté INP et PNHE (*Plasmas in extreme environments: from astrophysics to the laboratory*) est aussi à l'horizon (2023) et permettra de renforcer le lien INSU/AA - INP sur des thématiques concernant le PNHE et le PNST.