

## GROUPE DE TRAVAIL THEMATIQUE GTAA

par Emmanuel Dartois, Thierry Fogglizzo, Guillaume Hebrard, Jürgen Knodlseder, Joao Marques, Frédérique Motte, Céline Péroux, Michel Piat, Étienne Pointecouteau, Delphine Porquet, Cécile Renault (présidente) et Philippe Laudet (thématicien)

La thématique Astronomie et Astrophysique se caractérise par une large diversité dans les méthodes d'observation (des ondes radio aux rayons gamma, que ce soit au sol, depuis des ballons stratosphériques ou dans l'espace) et dans les échelles spatiales considérées (des systèmes stellaires orbitant à quelques années-lumière de nous jusqu'à la limite de l'univers observable située à environ 45 milliards d'années-lumière).

Nous ne connaissons plus seulement quelques objets du cosmos mais une fraction non négligeable des étoiles et des galaxies qui nous entourent. Les baryons sont de mieux en mieux détectés, même s'ils sont sous forme de gaz chaud diffus. La cosmologie est passée dans l'ère de la précision, les hypothèses peuvent être testées et les différentes sondes confrontées. Les observations des objets célestes sont multiples : non plus dans un domaine de fréquences mais multi-longueurs d'onde - voire multi-messagers, non plus généralement pointées mais également en mode de relevé systématique, pas toujours pré-programmées mais aussi réactives aux alertes. L'utilisation des observations s'est adaptée : des outils statistiques ont dû être développés pour bénéficier des masses d'information contenues dans des catalogues de centaines de millions de galaxies, de milliards d'étoiles et les simulations jouent un rôle essentiel, en particulier pour suivre l'évolution temporelle des étoiles, des galaxies, de la toile cosmique.

Les grandes questions scientifiques ont beaucoup évolué au cours des deux dernières décennies, et, conjointement, les façons de travailler se sont également considérablement modifiées.

Trois grands sujets sont particulièrement mobilisateurs aujourd'hui. Le premier s'attèle à la compréhension de l'évolution de la matière. Deux axes se dessinent. D'une part, il faut connaître les conditions initiales avec les caractéristiques de l'inflation primordiale, juste après le Big-Bang, et la physique durant les âges sombres et la réionisation, donc l'ère des premières étoiles. D'autre part, il est indispensable de pouvoir suivre l'évolution de la matière aux différentes échelles, en particulier les galaxies et leur trou supermassif central ainsi que les étoiles et leurs systèmes planétaires.

Le deuxième sujet a trait au champ magnétique qui joue un rôle important et est encore très peu connu ; on sait aujourd'hui que la gravitation n'est pas la seule force à l'œuvre dans l'organisation de la matière. Il faut donc appréhender son impact dans la formation des étoiles et de leurs systèmes planétaires émergents, dans la structure et l'évolution du milieu interstellaire ou encore dans la formation des grandes structures, à savoir les galaxies, amas de galaxies et filaments.

Enfin la prochaine décennie permettra un accès sans précédent à la dimension temporelle du cosmos. Cette dimension, par des observations multi-longueurs d'ondes et multi-messagers, est essentielle pour comprendre les phénomènes transitoires violents et leur impact sur leur environnement et constitue le troisième sujet. Il s'agit notamment des sursauts gamma, en particulier dans l'univers jeune pour étudier l'époque de la réionisation, des supernovae et kilonovae pour mieux cerner l'origine du rayonnement cosmique et des éléments chimiques ou encore de la fusion de trous noirs stellaires ou supermassifs pour reconstituer l'histoire de leur formation.

### 1. Bilan et avancées depuis les prospectives 2014

Le périmètre du GTAA ayant évolué puisque les exoplanètes concernent désormais le groupe Exobiologie, les priorités liées à ce sujet ne sont pas évoquées dans ce document.

#### 1.1. Bilan programmatique

##### 1.1.1. Priorités du précédent séminaire

Le séminaire de prospectives de la Rochelle en 2014 avait identifié deux priorités P0 :

##### Observer l'Univers dans le domaine des rayons X

Ce premier objectif a été concrétisé par la sélection par l'ESA de la mission **Athena** (Advanced Telescope for High-Energy Astrophysics), pour aborder le thème scientifique "The Hot and Energetic Universe", dans le cadre de sa deuxième mission de classe L. La maîtrise d'œuvre de l'instrument X-IFU a été endossée par le CNES et sa responsabilité scientifique (investigateur principal) par l'IRAP. Les consortia instruments ont été formellement approuvés par l'ESA à la mi-décembre 2018. La revue de fin de phase A de X-Ifu a été un succès, la phase B a donc officiellement démarré. Le lancement est actuellement prévu en 2031. La durée

nominales des opérations est de quatre ans, avec une extension possible de quatre années supplémentaires. Les objectifs scientifiques d'**Athena** sont de répondre aux deux grandes questions fondamentales : Comment la matière ordinaire se structure et évolue en les grandes structures que nous observons aujourd'hui ? Comment les trous noirs façonnent-ils l'évolution de notre Univers ?

### Observer les modes B de la polarisation du fond diffus cosmologique (CMB)

Ce deuxième objectif devrait enfin se concrétiser, après une succession de propositions fortement soutenues par la France mais non retenues : la proposition **Core** dans le cadre de l'appel à proposition pour les missions M4 et M5 de l'ESA, le projet **Pixie** de la NASA (comportant une contribution d'opportunité française endossée par le CNES) et le projet **Pristine** proposé dans le cadre de l'appel à proposition pour les missions F de l'ESA. La mission **Litebird** en coopération avec la JAXA, dont la phase A1 est en cours, vient d'être sélectionnée par la JAXA. La France aurait la responsabilité de l'instrument haute fréquence. **Litebird** va cartographier l'ensemble du ciel polarisé dans le domaine millimétrique et submillimétrique. Son objectif majeur est la physique de l'inflation. Ses résultats se combineront idéalement avec l'expérience au sol S4 pour obtenir des mesures ou des contraintes encore plus fines.

### **Une priorité P1 avait également été exprimée :**

#### Observer l'Univers lointain dans l'infrarouge, ou l'Univers proche dans l'ultra-violet.

- La mission **Spica**, présélectionnée dans le cadre de l'appel d'offre M5 de l'ESA, répondrait à cet objectif. La contribution française à l'instrument Safari correspond parfaitement à cette priorité, étendue avec le développement I de l'instrument B-Bop dédié à la polarisation.
- Une phase 0 instrumentale pilotée par la France concernant un spectromètre hétérodyne IR lointain est en cours pour la mission **OST** (Origin Space Telescope), actuellement à l'étude dans le cadre de la préparation du Decadal Survey NASA (l'implémentation d'une nouvelle mission "flagship" de la NASA ne devrait pas advenir avant 2035).
- Pour la composante UV, l'expérience **Fireball** réalise une étude du milieu galactique chaud en coopération avec la NASA. Elle a volé le 22 septembre 2018 sous ballon NASA. Hélas le vol a avorté à cause d'une fuite du ballon mais des résultats prometteurs ont cependant pu être obtenus. Un nouveau vol est prévu. Ce projet s'inscrit dans la préparation à la mission **Luvoir**, concurrent d'OST pour être le prochain "flagship" de la NASA.

### **Trois priorités P2 avaient été identifiées :**

#### Observer l'Univers dans le domaine du MeV.

Les propositions **e-Astrogam** soumises dans le cadre des appels de l'ESA M4, M5 et F1, dans une version réduite, n'ont pas été retenues. Cette fenêtre reste très peu explorée à ce jour.

#### Observer les étoiles dans l'ultraviolet.

La proposition **Arago** n'a pas été retenue dans le cadre des appels de l'ESA M4 et M5. En parallèle, la NASA a lancé des études de phase 0 dans le cadre du prochain Decadal Survey. Parmi elles, une phase 0 instrumentale pilotée par la France concernant un spectropolarimètre UV à très haute résolution est en cours pour l'instrument Pollux sur la mission **Luvoir** (Large UV/Optical/IR surveyor).

#### Observer l'Univers lointain dans l'infrarouge

La mission **Spica**, présélectionnée pour M5, adresse également cette thématique.

Il faut de plus mentionner :

- l'extension des missions **XMM-Newton** et **Gaia**.
- le report du lancement du **JWST** à 2021 et de celui d'**Euclid** à 2022.
- la décision de développement de la mission **Svom** pour un lancement en 2021.
- les deux vols de **Pilot** en 2015 et 2017, le troisième étant programmé pour l'automne 2019.

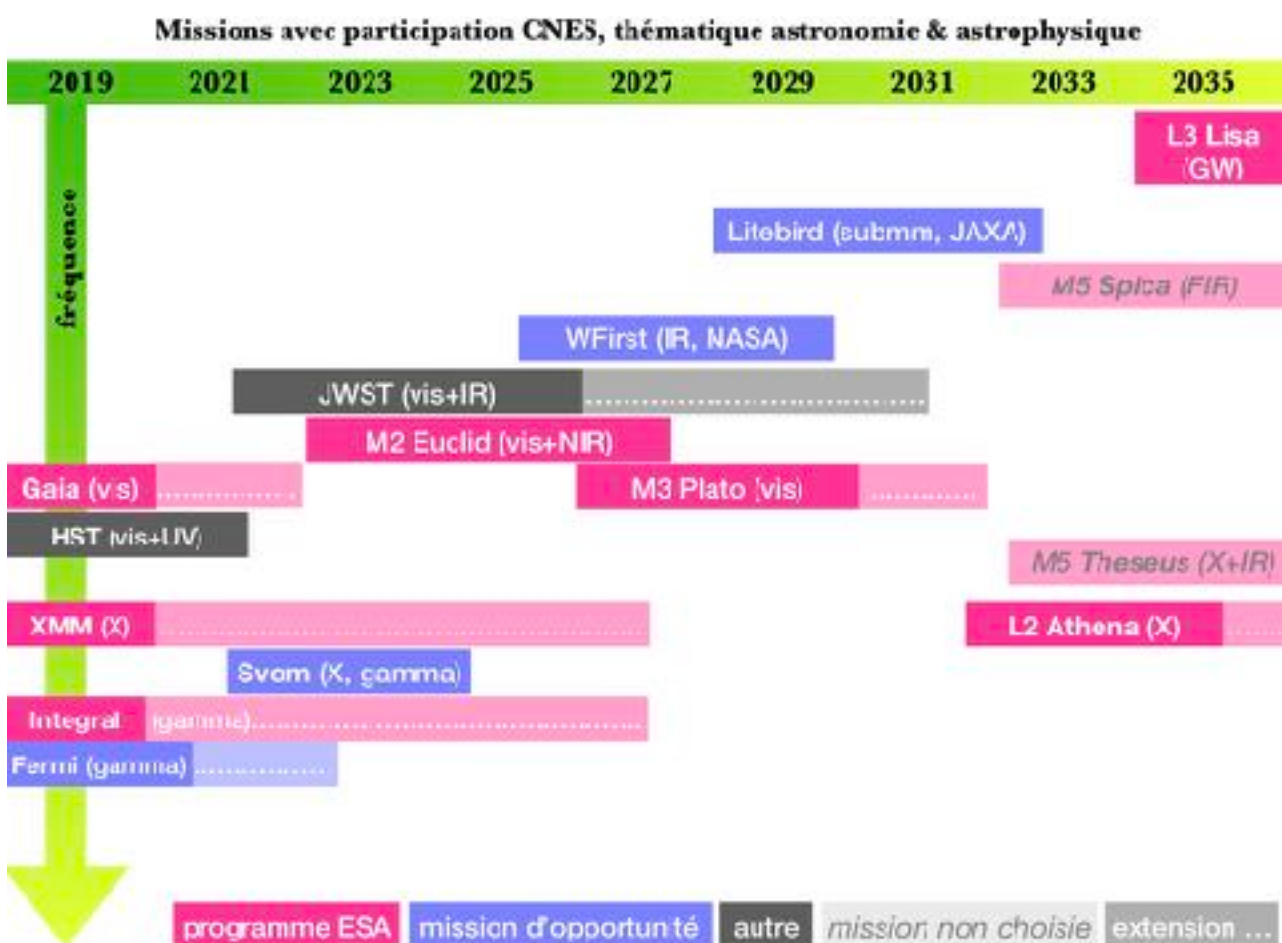
### 1.1.2.R&T associée

En lien avec les priorités scientifiques, trois axes de développements instrumentaux ont émergé des actions sur les concepts optiques, les chaînes de détection et les actions transverses : ce sont respectivement la spectroscopie UV, les détecteurs dans le domaine submillimétrique et la cryogénie sub-kelvin. On peut noter la fructueuse collaboration avec le LabEx Focus sur les techniques de détection de l'infrarouge au millimétrique.

Une action majeure a été la rédaction de la feuille de route sur les détecteurs dans le domaine submillimétrique et millimétrique qui comprend un état des lieux des technologies existantes et vise à définir quelle technologie devait être amenée à TRL 5 pour faciliter la sélection de projets qui l'intégrerait. Des développements ont eu lieu en parallèle pour conduire les trois candidats identifiés à TRL 4. Aujourd'hui, en l'absence de mission définie dans le cadre d'un appel à projet - donc sans concept instrumental complet, il semble illusoire de privilégier une technologie sur une autre.

Les durées de développement sont importantes pour diverses raisons (financements étalés pour limiter l'investissement annuel, disponibilité des personnels avec les expertises requises mais aussi complexité technique). Malgré les efforts du CNES et de ses partenaires - industriels et laboratoires, le plan d'actions de levée de risque s'avère difficilement compatible avec le contexte programmatique de **Theseus** en ce qui concerne le détecteur Alfa - la mission n'est pas compromise car une alternative existe mais il faudra acheter des détecteurs américains alors que d'importants efforts ont été faits pour développer des détecteurs européens. Il en va de même pour la dilution à cycle fermée, dont le développement ne sera probablement pas assez avancé pour être considéré pour la mission **Litebird**, alors que les objectifs scientifiques requièrent un refroidissement continu et que plusieurs actions successives ont été dédiées à la spatialisation de cette technique.

Le schéma ci-dessous rassemble les missions au moins en phase A. Les périodes indiquées correspondent aux opérations nominales ou aux extensions approuvées alors que les pointillés indiquent les extensions envisagées. Les missions **Plato** et **Lisa** relèvent respectivement des thématiques exobiologie/exoplanètes et physique fondamentale mais sont indiquées car elles présentent un intérêt de premier plan pour l'astrophysique.



### 1.1.3. Paysage programmatique

#### Collaborations avec les agences spatiales autres que l'ESA :

Dans le cadre de la thématique astronomie et astrophysique, le CNES est significativement impliqué avec les agences suivantes :

- la NASA pour **Fermi** et **HST**, et dans le futur **JWST**, **WFirst** et **Athena**,
- la JAXA pour **Litebird**, **Athena** et **Spica**, ce dernier étant en compétition pour M5,
- la CNSA pour **Svom**, et, probablement, **Einstein Probe** et **EXTP**, ainsi sans doute que **HSTDM** sur leur station spatiale. Ces contributions futures sont a priori plus modestes que celles avec la NASA et la JAXA, c'est pourquoi elles ne figurent pas sur le schéma.

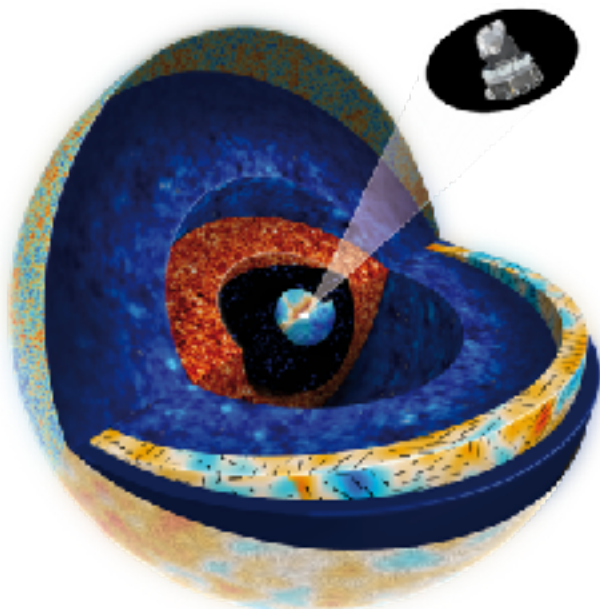
## 1.2. Quelques résultats scientifiques saillants

### 1.2.1. Planck

Lancé en 2009, le satellite européen **Planck** a permis de nombreux progrès dans la compréhension des origines et l'évolution des grandes structures de l'univers. **Planck** a rendu publiques les données complètes en température et en polarisation début 2015 et la version définitive, avec une analyse raffinée, en juillet 2018.

Les cartes des anisotropies de température du fond de rayonnement cosmologique à 3 K, ou Cosmic Microwave Background (CMB), obtenues par **Planck**, en température et en polarisation, demeureront une référence pendant de nombreuses années. De multiples informations ont été extraites sur l'univers primordial (inflation), l'univers jeune (réionisation), l'univers évolué (potentiel gravitationnel, fond diffus infrarouge et amas de galaxies) et l'univers local (champ magnétique de la Galaxie). Le modèle standard de la cosmologie est très solidement validé par les observations des premiers milliards d'années de l'histoire de l'univers. Cependant des tensions existent aujourd'hui pour quelques paramètres cosmologiques entre certaines mesures réalisées avec des sondes astrophysiques dans l'univers mature et les valeurs extrapolées de l'univers primordial et au début de son évolution. Le terrain est ainsi idéalement préparé pour la mission Euclid.

Les articles de la collaboration ont été cités plus 28 000 fois (dont plus de 14 000 citations pour les trois articles sur les paramètres cosmologiques).



L'univers observable vu par **Planck** en température et en polarisation.

Crédits : ESA - collaboration Planck – Canopée

### 1.2.2. Gaia

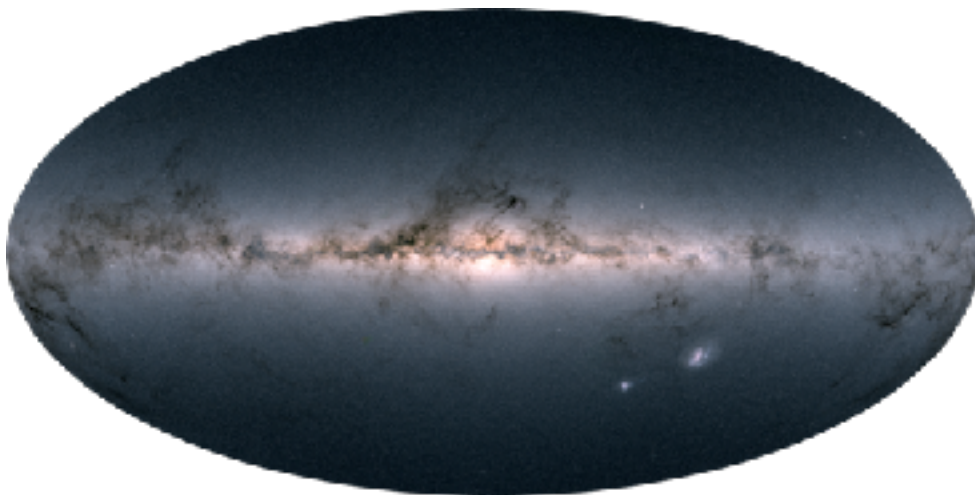
La mission spatiale astrométrique **Gaia**, lancée le 19 décembre 2013, a commencé sa phase de collecte de données le 25 juillet 2014. Sa mission est de cartographier plus d'un milliard d'étoiles de notre Galaxie et au-delà, en accédant aux positions, parallaxes et mouvements propres à un niveau de précision sans précédent. Aujourd'hui, Gaia a rendu publique deux catalogues intermédiaires, DR1 et DR2. Le catalogue suivant est prévu en 2021 et sera suivi de la version finale associée à la mission nominale.

Le DR1 a été livré le 15 septembre 2016 : un relevé de position pour 1 milliard d'étoiles, un catalogue astrométrique incluant les parallaxes et les mouvements propres pour 2 millions d'étoiles brillantes, des

étoiles variables et la réalisation d'un premier système de référence avec les quasars dans le domaine optique. Le DR1 a déjà permis à lui seul plus de 300 publications dans des journaux à comité de lecture.

Le DR2 est quant à lui un catalogue astrométrique complet de 1,4 milliard de sources et de nombreux autres produits. Il a été livré le 25 avril 2018. Le DR2 inclut la position et la luminosité de 1,7 milliard d'étoiles, la parallaxe, le mouvement propre et la couleur de plus de 1,3 milliard d'étoiles, la vitesse radiale de plus de 7 millions d'étoiles, la température effective de plus de 100 millions d'étoiles, l'extinction due à la poussière de 87 millions d'étoiles, la position de 500 000 sources variables, et la position de 14 099 objets du Système solaire.

Bien qu'encore à un stade intermédiaire, les données de **Gaia** ont d'ores et déjà permis une révolution dans de nombreux domaines de l'astrophysique : la physique stellaire, le milieu interstellaire, la cinématique et l'histoire de la formation de notre Galaxie. Elles ont permis la réalisation d'une carte 3D de la distribution des étoiles et du milieu interstellaire de notre Galaxie. Le catalogue complet ouvrira de nombreuses perspectives par l'ajout notamment d'un catalogue d'étoiles binaires avec leurs orbites, la classification des étoiles variables, les résultats sur des systèmes planétaires ...



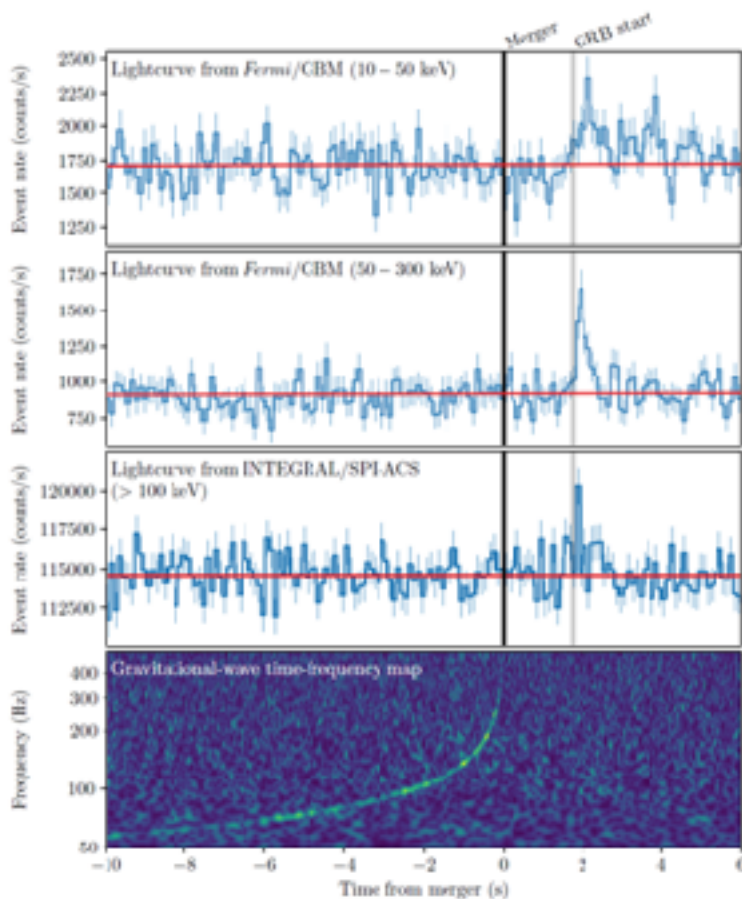
Le ciel de Gaia : carte réalisée à partir du catalogue d'étoiles.  
Crédits : ESA

### 1.2.3. Ondes gravitationnelles et événements multi-messagers et multi-longueurs d'onde

Depuis la première détection directe d'ondes gravitationnelles le 14 septembre 2015 par LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, USA), une nouvelle ère de notre compréhension de l'Univers a débuté en physique fondamentale, en astrophysique et en cosmologie. Cette première détection appelée GW150914 a mis en évidence la fusion de deux trous noirs ayant des masses de 29 et 36 masses solaires aboutissant à un trou noir de 62 masses solaires. L'équivalent des trois masses solaires restantes a été libéré sous forme d'ondes gravitationnelles. Depuis cet événement fondateur de l'astronomie gravitationnelle, neuf autres événements de fusion de deux trous noirs ont été détectés (incluant aussi l'interféromètre au sol européen Virgo) avant fin 2017, dont sept impliquant également des masses de l'ordre de 20-40 masses solaires pour les progéniteurs. Ces détections de fusion de trous noirs de type stellaire de grande masse ont remis en question nos connaissances sur leur distribution en masse dans notre Univers. En effet, les masses mesurées via des observations électromagnétiques (radio, infrarouge et rayons X) de systèmes binaires composés d'un trou noir et d'une étoile sont bien inférieures avec des valeurs maximales d'environ 15 masses solaires.

De plus, la détection d'ondes gravitationnelles de la fusion de deux étoiles à neutrons en août 2017 (GW170817) a été la première à être détectée également dans le domaine électromagnétique (de la radio aux rayons gamma). Le sursaut gamma court détecté parallèlement par **Fermi** et **Integral** a permis de démontrer qu'au moins une partie de ce type de sursauts gamma seraient bien dus à la fusion de deux étoiles à neutrons, confirmant ainsi les prédictions théoriques. Cette fusion a créé un objet ultra-dense produisant un phénomène initial de "boule de feu" suivi par une kilonova. Lors de la fusion, des métaux lourds tels que du plomb et de l'or sont produits puis éjectés très loin de l'objet résultant.

L'émission initiale en rayons gamma combinée à la détection des ondes gravitationnelles a également permis de confirmer la relativité générale qui prédit que les ondes gravitationnelles doivent se déplacer à la vitesse de la lumière. Enfin, cet événement peut être considéré comme une sirène standard qui permet une mesure géométrique de la constante de Hubble, très complémentaire des mesures cosmologiques et astrophysiques. Cet événement a été cité par plus de 1500 publications internationales en 15 mois.



Première détection multi-messagers de la fusion de deux étoiles à neutrons: les ondes gravitationnelles détectées au sol par Ligo/Virgo (GW170817) précèdent de 1,7s le sursaut gamma GRB170817A détecté par les satellites Fermi et Integral.

Crédits: NASA, ESA, Ligo/Virgo

## 2. Recommandations du groupe

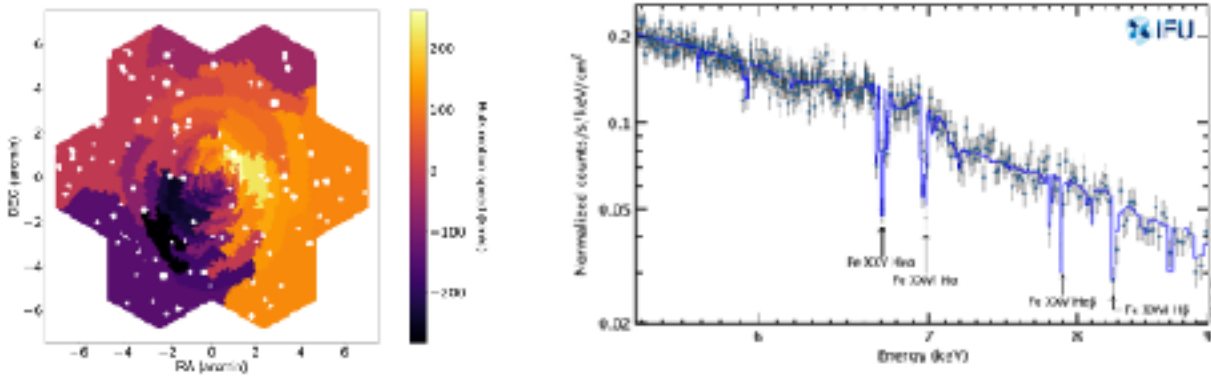
### 2.1. Spectroscopie à haute résolution dans les domaines submillimétrique, infrarouge, ultraviolet et X

Ces moyens observationnels sont nécessaires pour comprendre l'évolution de la matière par la connaissance de sa composition et de sa dynamique. Observer ainsi les galaxies lointaines dans l'infrarouge permet d'appréhender les galaxies dans leurs stades initiaux. On dispose alors du point de départ pour leur évolution postérieure. Observer les galaxies proches dans l'ultraviolet permet d'accéder aux détails de l'émission de l'environnement des galaxies. On accède alors aux processus dynamiques qui ont opéré durant l'assemblage de la galaxie et surtout aux échanges entre les galaxies et le gaz diffus qui l'entoure.

Dans ce cadre, le groupe renouvelle son fort soutien à la mission **Athena** associée à l'univers chaud et énergétique qui est toujours identifié comme prioritaire depuis plusieurs exercices de prospectives. L'univers chaud se réfère à la matière ordinaire chauffée à des températures supérieures à  $\sim 10^5$  K. Elle représente environ 50% du contenu total en baryons de l'Univers. Parmi ces baryons, ceux chauffés au-dessus de  $10^7$  K sont situés dans les grands puits de potentiel de matière noire, les groupes et les amas de galaxies. Ceux à des températures en deçà (et jusqu'à  $10^5$  K) suivent la distribution de matière noire qui tracent les grands filaments formant la toile cosmique. Ce gaz chaud distribué à très grandes échelles est le lieu de processus physiques complexes gouvernant l'assemblage de ces grandes structures. Parmi eux, celle de la rétroaction de la formation et de l'évolution des trous noirs supermassifs, qui a un impact jusqu'aux échelles cosmiques. Ces processus énergétiques génèrent l'émission importante de rayons X par le gaz chaud dans les grandes structures et par l'accrétion de matière sur les trous noirs. La fenêtre observationnelle des longueurs d'ondes X est donc nécessaire pour l'observation de l'Univers chaud et énergétique. La mission **Athena** permettra ainsi de répondre aux grandes questions fondamentales concernant les mécanismes d'échange de matière et d'énergie aux différentes échelles, des étoiles aux trous noirs supermassifs et aux amas de galaxies : comment la matière ordinaire s'est-elle assemblée à grande échelle pour former les grandes structures que nous observons aujourd'hui ? Comment les trous noirs supermassifs croissent-ils et façonnent-ils l'Univers ?

Le groupe soutient également fortement la mission infrarouge Spica, candidate pour M5, avec l'instrument Safari (spectroscopie) et l'instrument B-Bop (imagerie polarisée). La mission Spica couvre le domaine de l'infrarouge moyen au lointain ( $\sim 12$ - $350 \mu\text{m}$ ) avec une sensibilité attendue limitée par le fond diffus

infrarouge, soit environ deux ordres de grandeur meilleure que les observatoires ayant volé jusqu'à présent.



Simulations d'observation avec X-IFU/**Athena** : champ des vitesses du gaz chaud d'un amas de galaxie (gauche) et spectre d'un trou noir binaire de 120 secondes seulement (droite).

Crédits : Cucchetti et al., 2018, A&A et D. Barret, 2019.

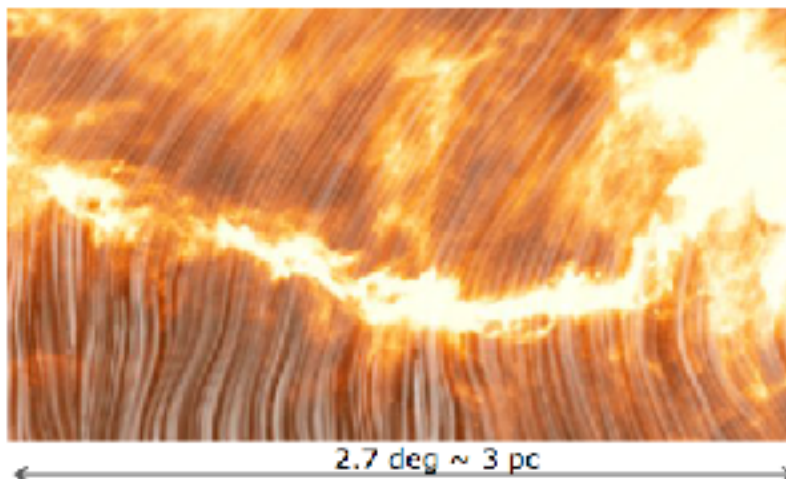
Cet observatoire, combinant imagerie et spectroscopie, a pour but de répondre à un large ensemble de questions scientifiques telles que : quels processus physiques régulent la formation des étoiles et la croissance des trous noirs dans l'évolution des galaxies ? Comment les métaux et la poussière sont-ils produits et détruits ? Quelles sont l'origine et la composition de la première poussière ? Comment les nuages de gaz primordiaux se sont-ils effondrés dans les premières galaxies et les premiers trous noirs ? Quand et comment le gaz passe-t-il des disques aux systèmes planétaires émergents ? Comment les glaces et les minéraux évoluent-ils à l'ère de la formation des planètes, en tant que premiers condensats des systèmes solaires ? Quels sont les rôles des champs magnétiques et de la dissipation de la turbulence au début des processus de formation des étoiles ?

Certains objectifs concernent également le groupe Exobiologie/exoplanètes car **Spica** permettra de caractériser les conditions physiques dans et autour des disques proto-planétaires et, notamment, tracera en leur sein la ligne critique qui sépare la vapeur d'eau de la glace.

Une participation à **OST**, l'une des cinq missions en lice pour être la prochaine mission *flagship* de la NASA, ou à **HSTD** à bord de la station spatiale chinoise pourraient des opportunités intéressantes.

## 2.2. Polarimétrie dans les domaines submillimétrique, infrarouge, ultraviolet et X

Cette technique permet d'appréhender le rôle du champ magnétique dans différents systèmes ainsi que les conditions initiales de notre univers. La mesure de la polarisation tensorielle du fond diffus cosmologique permet à la fois de mieux connaître la phase d'inflation, son énergie notamment, ainsi qu'une meilleure compréhension de l'histoire de la réionisation. Ce domaine étant nouveau, il offre un potentiel de découvertes majeures sur la structure magnétique des galaxies. La possibilité de détecter la polarisation du fond diffus infrarouge permettra de mieux appréhender l'histoire de la formation stellaire. Dans le domaine ultraviolet, la spectropolarimétrie donne accès à la formation et à l'évolution des étoiles et de leurs planètes à travers les vents et les magnétosphères. À l'extrémité du spectre électromagnétique, la polarisation X des sources compactes permet un accès unique à la matière soumise à des conditions extrêmes de densité, de gravité ou de champ magnétique.



Lien magnétique entre les filaments de faible densité et les filaments denses où se forment les étoiles.

Crédits : ESA/Collaborations Planck et Herschel

L'instrument B-Bop de la mission **Spica** permettra d'obtenir des cartes de I, Q et U, soit l'observation simultanée de la puissance totale, l'intensité polarisée et l'angle de polarisation. Ces données permettront de contraindre le rôle important du champ magnétique dans la formation des structures filamentaires du milieu interstellaire, son impact à grande échelle dans les environnement de cœurs pré-stellaires, les propriétés polarimétriques, la nature et les propriétés d'alignement de la poussière interstellaire dans le FIR, ainsi que l'organisation du champ magnétique à plus grande échelle pour les galaxies proches. La polarimétrie de l'émission des poussières dans les nuages interstellaires proches permettra de caractériser pour la première fois la morphologie et la force du champ magnétique aux échelles critiques du déclenchement de l'effondrement du gaz en étoiles et planètes au sein des filaments moléculaires. La spectroscopie permettra en plus d'éclaircir la nature du gaz turbulent, et les mécanismes de dissipation d'énergie.

Dans ce domaine également, le groupe soutient la mission d'opportunité **Litebird** dont l'objectif est la détection, ou l'obtention d'une limite de l'ordre de  $10^{-3}$  sur l'amplitude, des modes B primordiaux de la polarisation du fond diffus cosmologique. L'obtention de ces cartes de tout le ciel polarisé dans de multiples fréquences avec une sensibilité de plus d'un ordre de grandeur meilleure que celle de Planck devrait permettre de contraindre les modèles d'inflation. Cette mesure s'accompagnera de celle des modes E à grande échelle angulaire afin d'obtenir une mesure de l'épaisseur optique Tau limitée par la variance cosmique, que ce soit pour l'intérêt de ce paramètre lui-même ou pour briser la dégénérescence avec d'autres paramètres, la masse des neutrinos notamment, de cartographier le champ magnétique galactique ou encore de contraindre de la physique non-standard avec des limites sur l'annihilation de matière noire par exemple. Cette mission est à l'interface de l'astrophysique et de la physique fondamentale puisque le rayonnement fossile est un accès unique à la physique à très haute énergie.

La compréhension des mécanismes gouvernant l'évolution de l'Univers dans son ensemble nous amène aux questions sur l'interaction entre les galaxies et le milieu intergalactique. Comment les galaxies sont-elles alimentées en gaz au cours du temps ? Comment dissipent-elles l'énergie mécanique libérée par leur formation, et comment construisent-elles leur moment cinétique ? Comment les galaxies et noyaux actifs maintiennent-ils l'ionisation du milieu intergalactique ? Ces questions se complexifient actuellement, avec la prise en compte du rôle des champs magnétiques et des rayons cosmiques dans la circulation du gaz et la formation d'étoiles. Pour y répondre, le groupe soutient une participation à la mission **Luvoir** si elle devient la prochaine mission *flagship* de la NASA.

À encore plus haute énergie, la mission d'opportunité **eXTP** développée par la Chine est également à considérer.

### 2.3. Multi-messagers, alertes et suivi temporel

Cet arsenal est convoqué pour accéder à la dimension temporelle. Il est nécessaire de disposer d'une capacité continue d'imagerie du ciel à haute énergie, des X mous aux gammas, pour comprendre les mécanismes des phénomènes transitoires violents. Astucieusement, les sursauts gamma très distants permettent d'éclairer les âges sombres en donnant accès aux premières galaxies ordinaires qui restent inaccessibles par d'autres moyens. L'étude de l'univers non-thermique est la voie d'accès indispensable pour l'étude des phénomènes astrophysiques extrêmes. Par exemple, ce type d'observations permet de mieux cerner l'origine des éléments chimiques formés dans les ondes de choc. Enfin les ondes gravitationnelles basses fréquences, inaccessibles depuis la Terre, permettront de compléter l'histoire de la formation et de l'évolution des trous noirs stellaires et supermassifs par l'étude leurs fusions.

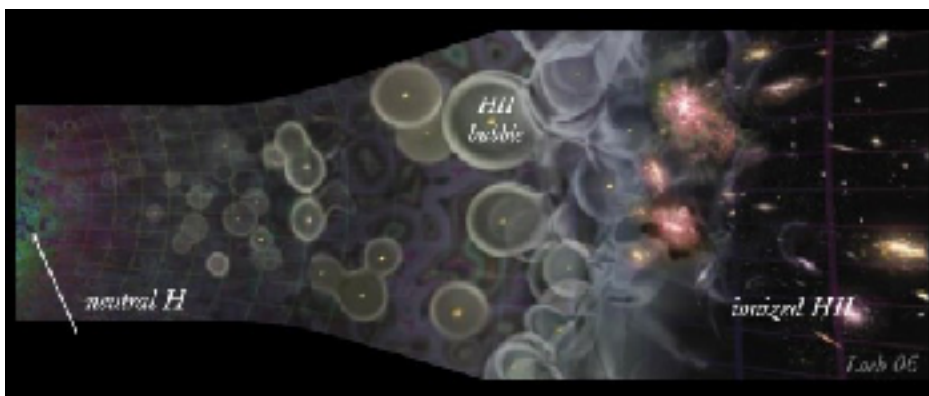


Illustration des âges sombres et de la phase de réionisation, entre l'émission du CMB et les galaxies en pleine production stellaire.

Crédits : proposition **Theseus**.

Dans ce cadre le groupe soutient notamment la mission **Theseus**, candidate pour M5. Ses objectifs scientifiques portent à la fois sur l'évolution cosmologique de l'univers et la compréhension physique des phénomènes transitoires violents. Il s'agit d'une part de découvrir l'univers des premières générations



d'étoiles par l'observation des sursauts gamma jusqu'à  $z = 10$  : ces observations révéleront l'évolution chimique de l'univers, l'histoire de la formation stellaire et les sources de la réionisation ( $z \sim 7$  à 9) et d'autre part de surveiller l'univers transitoire profond en rayons X pour découvrir la contrepartie électromagnétique des sources d'ondes gravitationnelles et de neutrinos et déclencher des alertes pour les observatoires aux autres longueurs d'ondes. L'observation profonde et détaillée des phénomènes transitoires doit aider à comprendre la physique de l'Univers violent : sursauts gamma, magnetars, explosion de supernovae (4/an), novae (250/an), événements de rupture par effet de marée (50/an)...

Le groupe renouvelle également son soutien à toute opportunité pour l'observation de l'univers dans le domaine du MeV afin de comprendre les propriétés des jets relativistes telles que leur composition, leur émission, l'accélération de particules, afin de caractériser les propriétés des rayons cosmiques de basse énergie et l'origine des positrons des régions centrales de la galaxie, et mieux contraindre l'enrichissement chimique galactique et la physique des supernovae. En ce qui concerne le ciel transitoire, la mission chinoise **Einstein probe** est une opportunité à envisager.

Même si la mission Lisa est associée en premier lieu au groupe Physique fondamentale, elle est de premier plan également pour l'astrophysique par l'accès unique qu'elle permet à l'histoire de la formation des trous noirs super-massifs par fusions successives : le taux d'évènements en fonction du temps sera une nouvelle sonde cosmologique et un élément essentiel de l'évolution des galaxies. De plus, la détection des dizaines de milliers de naines blanches binaires galactiques va contraindre les scénarios d'évolution stellaire des systèmes binaires.

## 2.4. Recherche et technologie

Les missions en phase 0 ou A nécessitent la poursuite des efforts engagés : dilution à cycle fermé (**Litebird**), équipement de test pour télescope et instrument refroidis (**Litebird**, **Spica**), détecteurs dans les domaines submillimétriques ou infrarouge avec polarisation ou spectroscopie dans le pixel (**Theseus**, **Spica**), spectropolarimètre dans l'ultraviolet et traitement de surface pour le visible et l'ultraviolet (**Luvor**), microcalorimétrie X et chaîne de détection basse consommation à haute énergie notamment (nano-satellite).

De plus, le groupe soutient fortement la mise en place d'une nouvelle R&T pour un spectromètre à transformée de Fourier à basse température, tel que recommandé par la feuille de route sur le CMB. Le rayonnement fossile contient encore des informations, aujourd'hui inaccessibles mais uniques. Afin de se préparer aux futures opportunités pour une mission d'étude des distorsions spectrales du fond diffus cosmologique, cette R&T est cruciale.

Enfin le groupe soutient le développement de détecteurs haute énergie adaptés aux nano-satellites qui offrent un accès souple à tout l'espace, comme les ballons stratosphériques, mais avec la possibilité de vols de plusieurs mois ou années. L'inconvénient est l'extrême limitation en taille et en poids. Si certains sujets d'étude ne peuvent s'accommoder de ces contraintes, c'est un choix pertinent pour le suivi multi-longueurs d'onde du ciel transitoire avec un retour scientifique garanti pour un coût bien inférieur à celui d'un satellite standard.

## 2.5. Données et accompagnement scientifique

La complexité des analyses s'illustre bien avec la reconstruction de la carte du potentiel gravitationnel d'après la déformation des galaxies par Euclid pour contraindre à la fois les propriétés de l'énergie noire et tester la loi de la gravitation aux plus grandes échelles. Il faudra extraire la forme et le redshift photométrique de centaines de millions de galaxies en combinant les images spatiales d'Euclid et des images sol de plusieurs télescopes dans différentes bandes de longueurs d'onde, avec les effets de confusion et tous les effets systématiques propres à chaque instrument. Des méthodes d'apprentissage automatique sont en développement, semblent très prometteuses mais l'erreur associée à la mesure est très délicate à estimer alors que la précision visée est de quelques pour-cent sur l'équation d'état de l'énergie noire. Le traitement des images, la combinaison des données et l'estimation des paramètres cosmologiques sont des processus complexes qui s'appuient sur des simulations lourdes. Ainsi, si les mesures instrumentales sont certes la base, elles sont très loin d'être l'aboutissement d'une mission.

La pertinence de l'analyse multi-longueurs d'onde, de la radio aux gamma, est particulièrement flagrante dans l'étude du ciel transitoire. La synergie sol-espace est primordiale. Le sol permet l'utilisation de grands télescopes avec une instrumentation parfois "lourde" ou de nombreux télescopes plus simples, alors que l'espace donne accès à l'ensemble du spectre électromagnétique, tout le temps, pour une très large partie du ciel parfois. Si la complémentarité instrumentale est évidente, l'accès aux données est un enjeu important.

Le changement d'échelle attendu, de quelques alertes par mois ou semaine à des centaines de milliers par nuit d'ici quelques années, impose un accès efficace pour un usage optimal des données.

Le CNES doit accompagner les projets jusqu'à leur phase finale, l'accompagnement scientifique est crucial. Il doit inclure aujourd'hui la formation et l'équipement de la communauté pour l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique. Il est également indispensable de ne pas sous-estimer les besoins en simulations, dans la préparation de la mission et dans l'analyse et l'interprétation des données. Euclid et Plato notamment seront fortement confrontés à ces exigences. Les segments sol doivent faire face aux défis associés au volume de données et, surtout, à leur accessibilité effective. Que les données soient publiques est nécessaire mais non suffisant. La pérennisation des données, la documentation associée et la facilité d'accès sont autant d'aspects essentiels. À l'heure des multi-longueurs d'onde, multi-messagers et des phénomènes transitoires, seront concernés très prochainement Euclid et SVOM.

## 2.6. Synthèse des recommandations

Type de mesure / d'observables	Cadre / contribution	R&T associée	Thème scientifique
L'univers en spectroscopie haute résolution X	ESA - L2 / majeure		Formation et évolution des groupes et amas de galaxies, trous noirs supermassifs et leur rôle dans l'évolution de l'Univers, baryons manquants.
L'univers en spectroscopie et polarimétrie du MIR au FIR	ESA - M5 / majeure	Détecteurs submm ou IR avec polarisation ou spectroscopie dans le pixel	Champ magnétique et formation des structures en IR. Milieu inter-stellaire galactique et extra-galactique.
Relevé du ciel polarisé en submillimétrique	JAXA - MoO / substantielle	Spectromètre à transformée de Fourier à basse température; dilution à cycle fermé	Physique de l'inflation, univers primordial, réionisation et avant-plans galactiques polarisés
L'univers transitoire en X très grand champ et en NIR	ESA - M5 / substantielle	Détecteurs haute énergie adaptés aux CubSat ; microcalorimétrie X	Phénomènes transitoires violents. Sonder la fin des âges sombres et les premières galaxies.
L'univers à haute résolution spectrale en IR ou UV	NASA - flagship / modérée	Spectropolarimètre UV	Échange de matière et d'énergie des étoiles aux galaxies au cours de l'évolution cosmique
L'univers dans le domaine du MeV	MoO / modérée	Chaîne de détection basse consommation à haute énergie	Univers non-thermique, origine des rayons cosmiques, phénomènes extrêmes, nucléosynthèse stellaire

Le cadre indiqué correspond au cadre de réalisation principal envisagé. Le type de contribution est associé à l'ampleur de l'investissement du CNES envisagé dans ce cadre. Le groupe Astronomie et Astrophysique apporte également son soutien à la mission L3 **Lisa** portée par le groupe Physique fondamentale qui permettra de mesurer les ondes gravitationnelles de basses fréquences.

## 3. Conclusion

La prochaine génération d'instruments, avec l'extension des capacités d'observation en termes de polarimétrie, de résolution spectrale ou de résolution temporelle, permettra d'accéder aux détails de la physique d'objets lointains ou complexes. Par ailleurs, pour certaines observations qui ne nécessitent ni grand miroir ni cryogénie, le développement des nano-satellites peut être une réelle opportunité, en complément de missions plus classiques.

Le domaine de l'astrophysique s'apprête également à vivre une révolution en termes de traitement des données avec l'intégration des techniques d'apprentissage automatique. La communauté doit être formée et équipée pour bénéficier pleinement de ces possibilités. La préparation des analyses en amont, puis

l'exploitation optimale des données, requièrent un accompagnement scientifique à la hauteur de l'investissement instrumental et des enjeux scientifiques.

Le groupe thématique Astronomie et Astrophysique couvre de nombreux domaines de recherche, comme en attestent les quatre programmes nationaux qui lui sont associés. Les grands observatoires sont à même de répondre à de multiples objectifs scientifiques, ils peuvent ainsi satisfaire les priorités d'une très large communauté. Au contraire, certains objectifs sont des priorités pour une communauté spécifique et nécessitent des instruments dédiés. Les priorités établies par le groupe visent à proposer un équilibre entre ces deux approches de façon à répondre au mieux aux grandes questions scientifiques actuelles.