

SYSTEME SOLAIRE ET UNIVERS LOINTAIN

Président

Françoise Genova

Membres de la section

Jean-Luc Attéia
 Olivier Bienaymé
 Torsten Böhm
 Jonathan Braine
 Athéna Coustenis
 Jean-Gabriel Cuby
 Pierre Drossart
 Guillaume Dubus
 Thierry Forveille
 Maryvonne Gérin
 Christian Guillaume
 Vanessa Hill
 Guilaine Lagache
 Frédérique Motte
 Jean-Pierre Michel
 Denis Mourard
 Olivier Mousis
 Pascal Payssan
 Phillip Tuckey
 Nicole Vilmer

1 – les grands enjeux de l’Astrophysique

Les grands enjeux de l’astrophysique tournent aujourd’hui autour de la question des origines : origines de l’Univers, des systèmes planétaires, de la vie. C’est, comme les autres disciplines de l’INSU, une science observationnelle, basée sur le recueil sur le long terme de grandes masses de données par des instruments très divers, au sol et dans l’espace, en général bâtis autour de collaborations internationales, bilatérales ou multilatérales, souvent à l’échelle européenne. Deux agences intergouvernementales mettent en place au niveau européen des moyens pour la discipline, l’Observatoire Austral Européen (European Southern Observatory - ESO) et l’Agence Spatiale Européenne (European Space Agency – ESA), ainsi que plusieurs sociétés internationales comme l’Institut de Radioastronomie Millimétrique (IRAM) et le Télescope Canada – France –Hawaii (TCFH ou CFHT). Les Très Grands Equipements (ou Très Grandes Infrastructures de Recherche dans la terminologie employée par le Ministère) sont donc un élément majeur pour la discipline, sans lesquels celle-ci n’existerait simplement pas. De même, les Services d’Observation mis en place en support au recueil de données et les personnels du corps des Astronomes et Physiciens jouent un rôle fondamental.

La préparation et l’utilisation des grands instruments requièrent une organisation nationale forte, et la mise en réseau des compétences au niveau national et international – les différents aspects de l’activité de recherche s’effectuent de plus en plus au sein de grands consortia.

L’interdisciplinarité est également un élément constitutif de l’astronomie, et de nombreuses interfaces existent avec les disciplines intéressées par les questions et les objets étudiés.

L’une des grandes avancées récentes pour la discipline a été la création en 2005 par les agences européennes de recherche en astronomie du réseau ASTRONET, dans le cadre des ERA-NET mis en place par la Commission Européenne pour encourager la coordination des activités de recherche dans les pays membres et associés. L’objectif d’ASTRONET, qui est coordonné par le CNRS/INSU, est d’établir une planification sur le long terme pour l’astronomie en Europe : cela est passé en particulier par l’établissement d’une « Vision scientifique pour l’astronomie européenne », un document détaillé, produit en 2007, qui identifie les questions clés des vingt prochaines années :

- comprenons-nous les extrêmes de l’Univers ?
- comment les galaxies se forment-elles et évoluent-

elles ?

- quels mécanismes sont à l'origine des étoiles et des planètes et comment évoluent-elles?
- comment nous et notre système solaire trouvons-nous notre place ?

Ces questions recourent - heureusement - celles identifiées par l'exercice « Cosmic Vision 2020 » mené vers la même époque par l'Agence Spatiale Européenne :

- quelles sont les lois fondamentales de l'Univers ?
- comment l'Univers s'est-il formé et de quoi est-il fait ?
- comment le système solaire fonctionne-t-il ?
- quelles sont les conditions nécessaires à la formation des planètes ? à l'apparition de la vie ?

C'est sur ces questions que se construit la stratégie de développement des moyens instrumentaux : elles ont servi de base à la « Feuille de Route » européenne des infrastructures publiée par ASTRONET en 2008, un panorama très complet qui inclut les infrastructures sol et spatiales et qui met en toute première priorité deux très grandes infrastructures sélectionnées par le Forum ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures), l'European Extremely Large Telescope (E-ELT) et le Square Kilometer Array (SKA). Cette Feuille de Route insiste sur la complémentarité entre les coopérations multilatérales, en particulier celles mises en place via l'ESO et l'ESA, et la colonne vertébrale fournie par les communautés nationales et les programmes nationaux et locaux. Elle prend en compte tous les thèmes de l'astronomie, de l'Univers Lointain au Système Solaire, et met en relief la nécessité de développer une instrumentation qui couvre tous les domaines de longueur d'onde, et au-delà, avec les astroparticules et les ondes gravitationnelles, pour observer l'ensemble des phénomènes cosmiques. Elle s'intéresse aussi aux outils (théorie, calcul, données, astrophysique de laboratoire, et développement technologique), et souligne l'importance de la diffusion des connaissances et des ressources humaines.

Au niveau national, l'INSU organise régulièrement des exercices de prospective pour chacune de ses disciplines – le premier exercice de prospective national pour l'instrumentation en astronomie remonte à 1987. Les Sections produisaient en parallèle leurs rapports de conjoncture et de stratégie scientifique. Depuis 1998, l'exercice de prospective est mené de façon conjointe par la Section et par la Commission Spécialisée Astronomie et Astrophysique. Le dernier exercice de prospective a mobilisé la communauté en 2009. Il a combiné une analyse détaillée du positionnement national en terme de priorités scientifiques, des forces et des faiblesses de la communauté dans les différents champs disciplinaires, avec l'établissement d'une stratégie de développement des moyens : grands instruments sols et moyens d'accompagnement, ainsi qu'une analyse de l'organisation de la discipline (y compris pour l'enseignement et la diffusion des connaissances), du contexte national et européen, des Services d'Observation, et des personnels et métiers. Une attention particulière a été également portée aux interfaces interdisciplinaires et aux synergies sol-espace – le CNES avait réalisé son propre exercice de prospective des moyens spatiaux début 2009, réaffirmant la priorité donnée aux programmes de l'ESA et à l'exploitation des

instruments.

Le document de prospective a été publié par l'INSU à la suite du Colloque final, qui s'est tenu à La Londe Les Maures en octobre 2009. Le présent rapport de conjoncture résume une partie des éléments de la prospective, principalement l'analyse des thématiques scientifiques, mais également différents aspects qui concernent les moyens de la discipline et le contexte dans lequel celle-ci travaille.

2 - Analyse thématique

La discipline est structurée, au niveau national, en Programmes Nationaux qui sont chargés de la prospective et de l'animation des différentes thématiques. Ces Programmes, le Programme National Cosmologie et Galaxies (PNCG), le programme Physique Chimie du Milieu Interstellaire (PCMI), le Programme National de Physique Stellaire (PNPS), le Programme National Soleil-Terre (PNST), le Programme National de Planétologie (PNP), et le GdR Phénomènes Cosmiques de Haute Energie (PCHE), ont été largement mis à contribution pour la discussion et la rédaction des aspects scientifiques de la prospective, y compris pour la définition des besoins en terme de moyens. On trouvera ci-dessous un résumé de ce travail, chaque partie couvrant le domaine de l'un des Programmes Nationaux ou du GdR PCHE. L'une des recommandations de la prospective a été de structurer les aspects liés aux Systèmes de Références, qui constituent la septième partie de cette section.

On retrouvera bien sûr dans l'analyse qui suit les grandes questions identifiées par les prospectives européennes, recadrées dans la perspective nationale. L'identification des priorités, des forces et des faiblesses permet de structurer le travail d'organisation des Programmes, et a fait émerger des recommandations en terme de moyens et d'organisation. Les nombreuses interfaces entre les programmes et avec les autres disciplines apparaîtront au fil du texte. Les relations avec les autres disciplines sont remises en perspective § 4.1.

2.1 Cosmologie, Univers primordial, origine et évolution des grandes structures de l'Univers et des galaxies

La recherche dans le domaine de la cosmologie et des galaxies est aujourd'hui guidée par plusieurs questions fondamentales, qui suscitent des études aussi bien sur le plan théorique qu'observationnel. Parmi celles-ci :

- cosmologie théorique : dans quel univers vivons-nous ?
- quelle est l'histoire des baryons dans un univers hiérarchique?
- quels processus physiques dominent l'évolution des galaxies?
- comment les galaxies du Groupe Local se sont-elles formées?

Faits marquants

- *Avancées sur la caractérisation du modèle cosmologique.* La mise en oeuvre et l'exploitation par des équipes

françaises des 400 nuits d'observation du CFHT-Legacy Survey (CFHT-LS) avec MegaCam a conduit à plusieurs résultats majeurs récompensés par des médailles d'argent (P. Astier à l'IN2P3, Y. Mellier à l'INSU). D'un côté, le programme SNLS de détection de supernovae de type Ia (SNIa) a produit le plus grand échantillon de SNIa lointains à ce jour, apportant des contraintes importantes sur la densité de matière de l'univers et sur l'équation d'état décrivant les propriétés de l'énergie noire. D'autre part, l'analyse des distorsions gravitationnelles de millions de galaxies du CFHTLS-WL (Weak Lensing) a permis de caractériser le spectre de puissance de la matière noire aux échelles entre 750 kpc à 90 Mpc et pose les meilleures contraintes actuelles sur la normalisation de ce spectre.

- *Structuration de la matière noire et des baryons.* La résolution spatiale des satellites XMM-Newton et Chandra a permis de montrer que le profil de masse dynamique d'un amas (révélé par l'émission X du gaz chaud intra-amas) est quasi-universel. L'analyse multi-longueur d'onde du relevé COSMOS, dans lequel plusieurs équipes françaises sont fortement impliquées, a permis d'étudier l'impact de la structuration de la matière noire sur l'évolution des baryons. L'aspect Weak Lensing de ce relevé a ainsi permis de produire la première carte 3D de la matière noire dans un grand volume d'univers et de comparer celle-ci avec la distribution de la matière lumineuse prisonnière des puits de potentiel.

- *Processus physiques de formation et d'évolution des galaxies.* Les satellites GALEX et Spitzer ont ouvert de nouvelles fenêtres d'observation de l'univers, dans l'ultraviolet et dans l'infrarouge, permettant la mesure de l'activité de formation d'étoiles des galaxies jusqu'à l'époque $z \sim 2$ (z est le décalage vers le rouge ou redshift). La combinaison avec d'énormes échantillons de spectres optiques (SDSS, VVDS) a donné lieu à un nouveau type d'analyse statistique des paramètres physiques de galaxies (tels que la masse, le taux de formation d'étoiles, la métallicité, le contenu en poussière, l'activité nucléaire) en fonction des paramètres structuraux, de l'environnement et de l'époque cosmique.

- *Avancées en archéologie galactique dans le Groupe Local.* Les galaxies du Groupe Local offrent l'opportunité d'explorer en détail les vestiges de la formation de galaxies individuelles. Les équipes françaises se sont distinguées sur deux aspects très complémentaires de l'archéologie galactique. Le premier est l'identification d'étoiles extrêmement déficientes en métaux dans le halo de la Voie Lactée, dont les abondances placent des limites inédites sur l'âge et les conditions de nucléosynthèse primitive de formation de notre Galaxie. L'autre aspect concerne la caractérisation des populations stellaires dans les parties externes des galaxies du Groupe Local, où l'on trouve les vestiges d'évènements d'accrétion aux époques reculées où les grandes galaxies à disques, comme la Voie Lactée et Andromède, ont commencé à s'assembler. Les signes de plusieurs fusions subies par la galaxie d'Andromède au cours des derniers milliards d'années ont ainsi été mis en lumière par un sondage grand champ au TCFH.

En dehors de ces faits saillants scientifiques, un changement structurel du paysage français est intervenu

par la création du Programme National de Cosmologie et Galaxies (PNCG), issu de la fusion des anciens Programmes Nationaux de Cosmologie (PNC) et Galaxies (PNG).

Forces et faiblesses de la communauté.

La communauté française « cosmologie et grandes structures » a démontré sa capacité de mobilisation autour des projets « énergie sombre ». L'émergence d'une nouvelle communauté pour l'analyse des oscillations acoustiques des baryons (BAO : projets SDSS-III/BOSS, HSHS et BigBOSS) est de ce point de vue exemplaire. Il faut souligner également les contributions récentes très remarquées d'équipes françaises en cosmologie théorique. Elles ont affirmé leur compétence aussi dans la mise en oeuvre, le traitement des données et l'exploitation scientifique des grands relevés d'imagerie (CFHT-LS), de spectroscopie (VVDS) et de spectroscopie intégrale de champ (SAURON, IMAGES, MASSIV).

Les équipes françaises ont largement participé à l'exploitation et à la valorisation du radiotélescope de l'IRAM au Plateau de Bure, qui est l'instrument actuel le plus performant au monde pour détecter les galaxies distantes. Des programmes importants ont aussi permis de cartographier le milieu interstellaire des galaxies proches et d'étudier, notamment, l'alimentation des noyaux actifs. Cette expertise est précieuse pour la future exploitation d'ALMA. Il serait souhaitable que communauté française exploitant l'IRAM s'élargisse pour assurer le retour scientifique d'ALMA et en préparer les futurs compléments (NOEMA, CCAT). Aux plus basses fréquences, la communauté mobilisée sur la préparation de SKA et ses précurseurs devrait aussi s'élargir.

La France se distingue aussi dans les domaines de l'astronomie infrarouge spatiale (formation d'étoiles et propriétés du milieu interstellaire des galaxies) et de l'analyse du rayonnement de fond cosmologique (signal cosmologique et avant-plans).

La France est également impliquée de façon majoritaire dans le consortium Gaia. Cependant, il faut noter qu'elle ne dispose pas du (des) spectrographe(s) grand champ multi-objet nécessaire(s) aux nombreuses observations complémentaires qui permettront d'optimiser le retour scientifique de la mission : la réalisation d'un tel instrument est une priorité forte.

Les chercheurs français développant des simulations numériques de formation et d'évolution des grandes structures et des galaxies ont su fédérer leurs efforts au sein du projet Horizon. Cette stratégie leur a permis de hisser la France dans le peloton de tête des acteurs mondiaux du domaine. Bien que les équipes françaises aient récemment produit des simulations numériques innovantes et compétitives à l'échelle cosmologique, la valorisation de ces simulations n'est pas encore optimale.

Un changement structurel, ressenti au-delà de la seule communauté nationale (et dans tous les domaines de la discipline), est le renforcement de la recherche par de grands consortia aux dépens des petites collaborations.

Ce nouveau mode de fonctionnement résulte de la taille, du coût et de la complexité des nouveaux instruments, qui favorisent les grands groupes internationaux.

Evolutions et perspectives

Le domaine de la cosmologie et de la physique des galaxies est en pleine effervescence avec la mise en service des satellites Herschel et Planck, celle proche de Gaia et du JWST, et l'arrivée du télescope ALMA au Chili, suivi de l'ELT. Nous entrons dans une ère de cosmologie de précision avec des contraintes de plus en plus fortes sur les quantités des différentes formes de matière et le type d'énergie noire. Simultanément, de très grands échantillons de galaxies par intervalle de décalage spectral permettent d'affiner les simulations de la formation des structures. Planck observe le ciel entier et permettra de cartographier le fond diffus cosmologique (CMB) au micro-Kelvin, avec une finesse telle que de nouveaux pics dans le spectre de puissance seront résolus, donnant accès à des aspects physiques nouveaux de l'Univers primordial. Herschel observe les galaxies en détail tant du point de vue morphologique que chimique, dans le nouveau domaine de l'infrarouge lointain. ALMA complétera le dispositif dans cette gamme de fréquence avec une très haute résolution et une très grande sensibilité dans le millimétrique et le submillimétrique, où émettent les molécules et la poussière du milieu interstellaire froid. Le télescope, plus tard complété par le JWST, permettra aussi de détecter les sources responsables de la réionisation de l'Univers ainsi que les premières galaxies. Une approche alternative à l'étude des galaxies à haut redshift consiste à explorer en détail les populations stellaires résolues en étoiles où sont encodées les traces de leur formation à des époques primitives. Le satellite Gaia bouleversera bientôt notre connaissance de notre propre galaxie en dressant une cartographie de précision des positions, vitesses, chimie et âge d'un milliard d'étoiles. Le JWST et l'ELT permettront d'étendre les études de diagrammes couleur-magnitude de populations stellaires voisines jusqu'aux galaxies de l'amas de la Vierge, donnant pour la première fois accès à l'histoire détaillée de la formation d'étoiles dans des galaxies de tous types et masses. A l'interface avec l'astrophysique des hautes énergies, la communauté devra aussi s'emparer de l'« outil » sursauts gamma, qui sont aussi une sonde cosmologique, en particulier avec la sonde spatiale SVOM.

Sur la question de la caractérisation du modèle cosmologique, et en particulier de l'énergie noire, non incluse dans le modèle standard mais qui attire l'intérêt des physiciens des particules, nous attendons des avancées majeures où la physique théorique, la physique des hautes énergies, la cosmologie et l'astrophysique doivent joindre leurs forces pour repousser les frontières de la connaissance. L'apport potentiel du LHC va également dans ce sens.

2.2 Astrophysique des hautes énergies, objets compacts, astroparticules, ondes gravitationnelles

L'astrophysique des hautes énergies, des objets compacts et des ondes gravitationnelles cherche à comprendre les extrêmes de l'univers, un des cinq thèmes majeurs identifiés par les prospectives européennes ASTRONET et Cosmic Vision. Issu de l'étude du rayonnement cosmique puis des émissions radio, gamma et X, le domaine unit maintenant astrophysiciens, physiciens nucléaires, physiciens théoriciens et physiciens des particules dont les problématiques et les savoir-faire sont complémentaires. Le développement de la thématique astroparticules est particulièrement marquant ces dernières années: après l'ouverture du domaine des gammas de haute énergie, l'objectif est maintenant celui d'une astronomie «multi-messagers» à l'aide des ondes gravitationnelles, des neutrinos ou des rayons cosmiques.

Plusieurs projets phares de la discipline sont maintenant en phase d'exploitation: HESS et Fermi (rayonnement gamma haute énergie au sol et dans l'espace), et Auger (rayonnement cosmique), tandis que la communauté continue de bénéficier des observatoires spatiaux XMM-Newton et INTEGRAL dans le domaine des rayons X et gamma mou. Antares explore la Antares détection sous-marine des neutrinos, et Virgo celle des ondes gravitationnelles. Il faut également noter les outils exceptionnels que sont X-Shooter (spectrographe au VLT) et LOFAR (radio basses fréquences) qui entrent tout juste en phase d'exploitation, ainsi que le lancement prochain d'AMS-02 (rayonnement cosmique).

Faits marquants

Le domaine de l'astrophysique des hautes énergies a connu ces dernières années des avancées importantes :

- *la richesse insoupçonnée du ciel gamma aux très hautes énergies dévoilées par HESS.* En particulier, l'observation du plan galactique révèle une multitude de sources. HESS a franchi le pas important d'une astronomie exploratoire (avec seulement quelques sources connues depuis plusieurs dizaines d'années) à une astronomie mature, avec à la clé la compréhension des phénomènes d'accélération de particules dans l'Univers.

- *la mesure d'une anisotropie du rayonnement cosmique d'ultra-haute énergie par Auger.* L'origine des rayonnements cosmiques reste une question centrale de l'astrophysique des hautes énergies. Ils sont généralement déviés par les champs magnétiques galactiques et intergalactiques, et seuls les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie ($E > 5 \cdot 10^{19}$ eV) subissent si peu de déviation que leurs directions d'arrivée sur Terre indiquent éventuellement leurs sites d'accélération. Les premiers événements à très haute énergie enregistrés par l'Observatoire Pierre Auger sont distribués de manière anisotrope sur le ciel.

- *l'imagerie de l'annihilation e^+e^- au centre de notre*

Galaxie et la découverte de l'asymétrie du disque. Depuis les années 1980 on savait que les régions centrales de notre galaxie sont le lieu d'une forte annihilation électrons-positrons, cependant la source des positrons reste inconnue. Le spectromètre SPIE d'INTEGRAL a mis en évidence la forte concentration de l'émission à 511 keV vers le centre galactique, et a pu cartographier celle-ci, montrant qu'elle est asymétrique avec un excès dans une région qui abrite un grand nombre de binaires X de faible masse, ce qui suggère que ces objets pourraient être une source importante de positrons galactiques.

- *la découverte de sursauts gamma à grand redshift et la caractérisation de leur émission haute énergie.* Les sursauts gamma, très brillants mais relativement brefs, ont été proposés depuis longtemps comme d'excellentes sondes potentielles de l'Univers lointain. En 2005, grâce aux observations de sa rémanence observée par TAROT, un sursaut a été identifié comme ayant été émis à $z = 6,3$, rivalisant ainsi avec les objets connus les plus lointains, et en 2009 un autre l'a été à $z = 8,2$, ce qui en fait l'objet le plus distant jamais observé. Ces observations ouvrent la voie à l'étude de l'Univers lointain par les sursauts gamma. En même temps, le satellite Fermi a ouvert la voie à l'étude des sursauts gamma au plus hautes énergies.

De façon plus générale, quatre grandes problématiques se dégagent:

- l'univers comme laboratoire: recherche de signatures directes ou indirectes d'annihilation de matière noire (gamma, e^+e^- , neutrinos...), tests astrophysiques de physique non-standard (conversion axion-photon, invariance de Lorentz...), étude de la gravitation en champ fort (raies du fer, oscillations rapides, ondes gravitationnelles...), champs magnétiques extrêmes, équation d'état de la matière dense ;

- l'influence des objets compacts sur leur environnement: recherche de diagnostics observationnels des conditions physiques (spectroscopie X, variabilité, campagnes multi-longueurs d'onde...), processus de transport dans les disques d'accrétion et formation des jets (simulations numériques...), mécanismes de radiation des pulsars, canaux non-thermiques de dissipation d'énergie (accélération de particules...), rétroaction sur l'environnement (évolution des sources, co-évolution trous noirs-galaxies...);

- les astres explosifs: physique de l'explosion (mécanismes fondamentaux, nucléosynthèse, formation des jets, interaction avec l'environnement), place dans l'histoire de l'univers et utilisation cosmologique (recherche de supernovae de type Ia, de sursauts gamma à haut redshift), signatures non-photoniques (ondes gravitationnelles, neutrinos);

- le rayonnement cosmique: processus fondamentaux d'accélération (simulations, imagerie X fine des chocs...), identification des sources des rayons cosmiques galactiques et extragalactiques (restes de supernovae, sursauts gamma, neutrinos...), propagation dans le milieu interstellaire (diffusion, spallation...), impact sur la chimie et la dynamique (nuages moléculaires, champ

magnétique...).

Forces et faiblesses de la communauté

La communauté hautes énergies est numériquement importante et répartie sur plusieurs instituts (INSU, IN2P3, INP,CEA). Elle est structurée par le GdRPCHE (Phénomènes Cosmiques de Haute Energie) et le PIR «Particules et Univers». L'exercice de prospective a démontré que le GdRPCHE devait évoluer en un programme national tout en maintenant l'interdisciplinarité qui fait sa force. Cette évolution devrait permettre de dynamiser les liens avec les communautés des autres Programmes Nationaux, PCMI (rayons cosmiques, émissions diffuses), PNCG (matière noire, sondes univers lointain, évolution structures), PNPS (disques, jets, nucléosynthèse) et PNST (chocs, plasma).

Evolutions et perspectives

La communauté astrophysique prépare activement les projets CTA (Cherenkov Telescope Array gamma au sol), Advanced Virgo (ondes gravitationnelles), SVOM et GFT (Space-based multiband Variable Object Monitor et Ground Follow-up Telescope pour les sursauts gamma) et, à plus long terme, les missions spatiales IXO (International X-ray Observatory) et LISA (ondes gravitationnelles). Il faut noter que l'abandon du projet spatial Simbol-X a pesé sur la communauté qui s'y était fortement investie. L'exploitation des moyens spatiaux existants (XMM-Newton, INTEGRAL, Fermi) doit être poursuivie aussi longtemps que possible. Des actions de R&D pour l'astronomie au MeV et la polarisation haute énergie pourraient déboucher sur une proposition de mission innovante.

2.3 Physique et chimie des milieux interstellaires et circumstellaires

Le milieu interstellaire (MIS) est un acteur essentiel des galaxies, comme source des prochaines générations d'étoiles et témoin des générations passées. L'étude des milieux interstellaires et circumstellaires est donc incontournable pour comprendre la formation et l'évolution des galaxies, celles des étoiles comme celles des systèmes planétaires. Cela implique de comprendre leur structure et leur dynamique, la nature de leurs constituants et leur évolution physico-chimique, ainsi que les nombreux couplages entre processus.

Faits marquants

Le MIS constitue un laboratoire unique, où la matière peut être étudiée dans des conditions de vide extrêmes, et où de nouveaux phénomènes physiques et chimiques ont été découverts, contribuant ainsi à l'accroissement des connaissances fondamentales. L'INSU a encouragé cette dynamique en structurant une communauté interdisciplinaire de physiciens, chimistes et astrophysiciens autour du programme PCMI. Ce programme a servi de noyau pour la participation d'équipes françaises à plusieurs réseaux européens. Parmi les avancées les plus marquantes de ces dernières années, on peut noter :

- les études théoriques menées sur la vapeur d'eau, pour

l'utiliser comme sonde de divers environnements : l'eau est un constituant majeur des glaces, et devient, lors de leur sublimation dans les chocs ou les régions protostellaires, un des principaux réservoirs de l'oxygène. La modélisation précise de la surface d'énergie potentielle pour H₂O-H₂ a permis de calculer des sections efficaces d'excitation collisionnelle avec des méthodes variées pour couvrir une vaste gamme de température. Ces travaux sont en phase avec les programmes d'observation de H₂O avec le satellite Herschel.

- *les études de la dynamique du milieu interstellaire et de la formation des nuages denses* Les observations révèlent que le milieu diffus est un milieu turbulent, magnétisé, hors d'équilibre mais qui engendre le milieu dense, moléculaire, berceau des étoiles et planètes. Comment s'effectue ce changement radical ? Des simulations numériques MHD ont montré que la convergence de deux flots subsoniques de gaz atomique chaud et dilué suffit à créer, sous l'influence conjointe de la pression dynamique, de l'instabilité thermique, puis de la gravité, des condensations de gaz dense froid pérennes au sein du milieu chaud, dont les propriétés statistiques reproduisent les lois d'échelles observées.

- *la détection de molécules fortement enrichies en deutérium* dans les coeurs denses et froids du MIS, offrant ainsi de nouveaux traceurs de ces régions où se forment les étoiles. L'action combinée de processus en phase gazeuse et solide (glaces) est nécessaire pour atteindre les niveaux d'enrichissement mesurés, ouvrant ainsi un nouveau champ d'investigation des processus hétérogènes à très basse température (~10 K).

- *les observations interférométriques (IRAM Plateau de Bures) des disques proto-planétaires* ont permis d'étudier à haute résolution angulaire leur structure et de montrer l'existence de cavités internes en gaz et en poussière liées à la formation de planètes ou à la binarité et la présence de gros grains très froids.

- en tirant parti d'observations sur les satellites ISO, puis Spitzer, couplées à des études théoriques et en laboratoire (expérience PIRENEA), un scénario d'évolution des hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH), les porteurs des bandes d'émission IR, a été proposé. Ces bandes contribuent au spectre des régions de formation stellaire et des galaxies, proches comme lointaines. Les observations obtenues avec le satellite Spitzer ont permis d'approfondir les résultats du satellite ISO, en démontrant l'universalité des signatures du MIS et de la formation stellaire à tous les redshifts.

Forces et faiblesses de la communauté

Une des forces de la communauté est incontestablement l'accès aux instruments sol (IRAM, bientôt ALMA) et spatiaux (Spitzer, Herschel), qui apportent une couverture spectrale complète des mécanismes de rayonnement (atomes, molécules dont l'eau, poussières, etc.) avec une sensibilité inégalée. La communauté doit se mobiliser pour la préparation des nouveaux instruments (JWST, SPICA, SKA) et contribuer à la mission Gaia.

Un autre atout est le lien fort, indispensable à l'étude des processus physico-chimiques, avec l'astrophysique de laboratoire, dans un cadre interdisciplinaire fortement ancré avec la physique moléculaire, la physico-chimie et la chimie théorique.

La petite taille de la communauté, et la diversité des thématiques astrophysiques peut être perçue comme une faiblesse. Si les activités de simulations numériques progressent, le nombre de chercheurs est encore trop réduit par rapport à d'autres pays européens.

Evolutions et perspectives

Les nouveaux développements instrumentaux (ALMA, JWST) et théoriques (montée en puissance des simulations numériques) vont permettre d'aborder dans l'avenir l'étude du milieu interstellaire sous de nouveaux angles. On peut dégager deux grands axes : l'étude de l'évolution de la matière qu'elle soit sous forme d'atomes, molécules ou grains solides, et la compréhension de la dynamique du milieu.

Ces deux axes sont étroitement couplés, comme le témoignent les questions spécifiques qui vont focaliser l'attention des chercheurs de la communauté dans le futur :

- comment évolue la matière interstellaire et circumstellaire ? Quelle est la nature de la poussière et quels processus gouvernent son évolution physico-chimique, en particulier pour ce qui est de sa formation et de sa destruction ? Quelles signatures spectrales témoignent de cette évolution ?

- comment se forment les molécules interstellaires et quel niveau de complexité moléculaire est atteint dans le milieu interstellaire et les régions protostellaires ? Les molécules pré-biotiques du MIS sont-elles transmises aux matériaux du disque protoplanétaire ? Peut-on retracer l'histoire de la matière organique du système solaire ?

- les observations révèlent que le milieu diffus est turbulent, magnétisé, hors équilibre, mais qu'il engendre le milieu dense, moléculaire, berceau des étoiles et planètes. Comment s'effectue ce changement radical ? Les modélisations et simulations numériques tiennent compte de nombreux couplages non linéaires, mais nécessitent une forte interaction entre théoriciens et observateurs pour être validées. Les mêmes questions sont abordées dans le domaine extragalactique, en commençant avec les Nuages de Magellan où les conditions sont sensiblement différentes de celles dans la Voie Lactée. Cette ouverture devrait renforcer les liens entre communautés galactiques et extragalactiques pour une meilleure compréhension de l'évolution des galaxies.

Les perspectives ouvertes par les dispositifs expérimentaux d'astrophysique de laboratoire et les modèles numériques sont traitées § 3.4 et 3.3.

En conclusion, on peut s'attendre à une progression du rôle charnière que joue l'étude du milieu interstellaire, à l'interface avec les communautés de physique stellaire et

planétaire comme avec celle de physique des galaxies.

2.4 Origine, structure et évolution des étoiles et des systèmes planétaires

Les grandes questions de la physique stellaire, structurée par le Programme National de Physique Stellaire, portent actuellement sur l'origine et l'évolution des étoiles et des planètes (conditions initiales de formation des étoiles, structure interne, évolution des étoiles et de leur environnement circumstellaire, formation d'exoplanètes), la spécificité de notre système solaire (physique du Soleil et de notre système solaire, mise en perspective avec d'autres systèmes extra-solaires), mais aussi le rôle des étoiles dans l'évolution des galaxies.

Faits marquants

- Grâce aux développements instrumentaux de la spectropolarimétrie (TCFH/ ESPADONS et TBL/NARVAL), les champs magnétiques peuvent être étudiés à travers tout le diagramme HR. On a notamment pu mesurer pour la première fois le champ magnétique d'étoiles de faible masse, montrant que leur zone convective globale serait très efficace pour produire le champ magnétique à grande échelle. Ce résultat a de grandes implications pour la théorie des dynamos. Le champ magnétique a également pu être détecté dans les parties internes d'un disque d'accrétion entourant une étoile jeune, montrant une topologie en accord avec les modèles MHD pour propulser les jets qui leur sont associés.

- Les grands relevés des zones de formation stellaire, rendus possibles grâce aux caméras grand champ (TCFH/WIRCAM et MegaCam), ont permis de confirmer l'universalité de la fonction de masse initiale des étoiles (IMF). La détermination et la comparaison de l'IMF des amas d'étoiles jeunes et des cœurs pré-stellaires (IRAM/MAMBO) ont fourni des contraintes fortes pour les mécanismes physiques de formation stellaire.

- Les interféromètres optiques et infrarouges (VLTI, IOTA et CHARA), en offrant une mesure directe des variations du diamètre apparent des étoiles pulsantes de types céphéides, permettent un étalonnage absolu de la relation période-luminosité et donc une meilleure estimation des distances dans l'Univers local.

- L'exploitation au sol et dans l'espace des nouveaux moyens en astérosismologie connaît un essor remarquable. Les premiers résultats sismologiques de COROT apportent des avancées importantes telles que la découverte de pulsations de type solaire dans les étoiles massives.

- D'un point de vue théorique, la généralisation du formalisme de transport dans les étoiles en rotation est une avancée importante.

Les faits marquants concernant les exoplanètes, l'autre programme phare de COROT, sont décrits § 2.6.

Forces et faiblesses de la communauté

La physique stellaire, domaine traditionnel d'excellence en France, regroupe une grande variété de thèmes de recherche. L'expertise reconnue de la France touche divers domaines de l'observation et l'instrumentation, dont ceux de la haute résolution angulaire optique et radio, de l'héliosismologie, de la spectrométrie et spectropolarimétrie, des grands relevés infrarouges et sub-millimétriques, mais également de la théorie et modélisation des étoiles. Le vieillissement de la communauté pose cependant la question de son renouvellement et des choix thématiques à faire pour entourer au mieux la mise en place de nouvelles équipes formées aux grands instruments à venir, aux traitements massifs des données, aux simulations numériques lourdes et/ou à l'instrumentation de pointe. La forte activité de la communauté dans les réseaux européens (FP-5: Planets, Clusters ; FP-6: JETSET, CONSTELLATION, Molecular Universe) et l'augmentation rapide du nombre de projets ANR acceptés concernant les thèmes du PNPS est encourageante.

Concernant l'utilisation massive de gros codes numériques, si la France s'est maintenant dotée de moyens de calculs nationaux compétitifs (par exemple le CINES), ainsi que de quelques méso-centres qui répondent efficacement à des besoins spécifiques et plus localisés, il existe cependant un déficit de main d'œuvre pour le développement de "gros" codes numériques (par exemple, d'évolution stellaire, multi-dimensionnels, MHD dans les étoiles ou dans les disques, etc). La construction de grille de modèles d'étoile (standards et non standards, étendus en terme de masse, métallicité et phases évolutives), nécessaires tant pour l'exploitation des données des grands TGE et de COROT que pour la préparation des nouvelles missions comme Gaia ou PLATO, bénéficierait également d'un meilleur accès à un grand nombre de processeurs.

Evolutions et perspectives

Les années à venir verront un intérêt particulier de la communauté pour la formation stellaire, le magnétisme, une nouvelle génération de modèles stellaires et l'étude de l'interaction de l'étoile avec son environnement. Une percée supplémentaire est notamment attendue dans le domaine de l'astérosismologie (observations et développements théoriques/modélisation associés), ainsi que dans la compréhension des atmosphères et des environnements circumstellaires des étoiles jeunes, en particulier pour les objets dits froids. Par l'observation des étoiles jeunes, et des disques autogravitants associés – une thématique fortement transverse à l'INSU –, ce sont toutes les théories de la formation des planètes qui pourront être testées par la mesure directe des conditions physico-chimiques à divers stades de leur évolution.

L'accès aux instruments d'observation existants ainsi qu'à ceux progressivement mis en service, tels que VLTI/VLTI, COROT, Herschel, ALMA, Gaia, JWST, E-ELT, est au cœur de ces avancées attendues. Il conviendra par exemple de poursuivre le développement de l'interférométrie au VLT jusqu'à la pleine obtention des performances annoncées en imagerie (instruments de seconde génération GRAVITY et MATISSE, VSI, extension du réseau actuel de télescopes

auxiliaires), ainsi que l'élargissement de la communauté interférométrique par une démocratisation de l'accès aux données traitées et exploitables scientifiquement. Le bon retour scientifique de missions spatiales en cours (COROT et Herschel), ou futures (Gaia, PLATO) doit être assuré efficacement, notamment par des observations de soutien au sol le cas échéant, mais aussi un support théorique et de modélisation.

La synergie entre modélisation et observations est bien entendu nécessaire et dans ce cadre, on notera les progrès décisifs obtenus dans le cadre de la préparation à COROT, sur des aspects jusqu'alors mal compris des oscillations stellaires (effet de la rotation, mécanismes d'excitation). La préparation de COROT est aussi à l'origine d'une nouvelle génération de modèles d'évolution stellaire multidimensionnels qui cherchent à mieux tenir compte des phénomènes de transport dans les intérieurs stellaires. Le développement de codes de transfert du rayonnement performants a permis de mieux comprendre la chronologie d'évolution des disques avec celle de la formation des planètes. Et pour préparer et interpréter les expériences des grandes installations lasers, de nouveaux codes d'hydrodynamique radiative ont également été développés. Finalement, les résultats de NARVAL et ESPADONS stimulent d'importants efforts de modélisation des effets et de l'origine des champs magnétiques stellaires.

2.5 Physique du Soleil et de l'héliosphère, relations Soleil-Terre

Sous cette dénomination se retrouvent toutes les thématiques s'attachant à décrire les couplages entre le Soleil et une planète spécifique : la Terre. Cela implique l'étude de milieux particuliers liés au Soleil – photosphère et chromosphère, couronne solaire, vent solaire et héliosphère – et aux planètes – magnétosphère, ionosphère et thermosphère – ainsi que l'analyse de tous leurs couplages. Les outils conceptuels sont pour l'essentiel ceux de la physique des plasmas chauds : théories magnétohydrodynamiques et cinétiques, avec une forte insistance sur les mécanismes de génération (dynamo) et transformation (reconnexion) du champ magnétique, d'accélération des particules et de chauffage des plasmas, de transferts radiatifs, de phénomènes non-linéaires, chocs et turbulence. Ces processus jouent un rôle fondamental dans l'organisation et la dynamique de nombre d'environnements astrophysiques: planètes telluriques et géantes, petits corps (comètes en particulier), étoiles, objets compacts et milieux interstellaires. En cela, ce domaine est lié à des thématiques attenantes de l'astrophysique (planétologie, physique stellaire, physique des hautes énergies) ainsi qu'à l'étude des plasmas chauds de laboratoire (projet ITER). Le lien avec les sciences de l'environnement et de l'atmosphère constituent d'autres ouvertures pluridisciplinaires: d'une part, la variation du flux solaire est un des paramètres pouvant influencer les évolutions climatiques; d'autre part, la variabilité solaire a une influence majeure sur l'état physique de l'environnement spatial, à des échelles temporelles de quelques heures à quelques jours (météo spatiale).

Faits marquants

Les résultats scientifiques de la discipline soulignent la forte ouverture internationale des équipes, qui sont systématiquement sollicitées pour des collaborations scientifiques et des contributions instrumentales dans un domaine fortement orienté vers le spatial. Pour de nombreux résultats issus de l'analyse de données, les outils logiciels développés dans les services de bases de données, CDPP, MEDOC, Bass2000, sont déterminants. Le développement de ces actions, souvent concertées entre les équipes et toutes très largement ouvertes à l'Europe et à l'international, est aussi un fait marquant de la décennie. Il place les équipes françaises à un excellent niveau mondial.

Soleil et héliosphère. Avec THEMIS (observatoire sol) et des techniques de spectro-polarimétrie multi-raies, les premières déterminations vectorielles du champ magnétique dans les régions actives ont pu être obtenues, offrant des cartes de champ magnétique qui, couplées à des modèles d'extrapolation et d'évolution MHD, ont permis d'établir les topologies magnétiques des structures pré-éruptives et de modéliser leur évolution. L'initialisation et la propagation des perturbations héliosphériques majeures ont pu être analysées quantitativement par une batterie d'instruments et de techniques 'remote sensing' et in-situ couvrant l'ensemble du spectre: RHESSI, SOHO, SDO, TRACE, STEREO, radiohéliographe et spectrographes de Nançay. La mission STEREO a aussi permis de réaliser les premières détections de nano-poussières interplanétaires à 1 UA.

Magnétosphère terrestre. Avec les missions spatiales CLUSTER (4 satellites, ESA) puis THEMIS (5 satellites, NASA), usant de techniques d'analyses multi-satellites, les échelles caractéristiques spatiales et temporelles (processus de reformation) des chocs sans collision ont été établies, avec le soutien de simulations numériques. L'anisotropie de la turbulence dans les milieux magnétisés a été mesurée. Le rôle respectif de la reconnexion, de la micro-turbulence et des instabilités de grandes échelles dans les transferts de matière et de flux au travers des frontières magnétiques a été caractérisé. Le phénomène – central – de sous-orage magnétique est décrypté, confirmant son aspect multiforme, éloigné de la vision standard de la reconnexion en un point unique. En couplant des observations radar sol (SUPERDARN) aux observations satellites, les modalités d'injection de plasma par reconnexion ont été précisées. Avec DEMETER, des effets anthropiques spectaculaires sur la dynamique des ceintures de radiation ont été mesurés.

Environnements planétaires. Dans le cadre de l'étude des plasmas planétaires, les caractéristiques de l'interaction vent solaire/Mars et Vénus sont établies, y compris une évaluation de l'évaporation atmosphérique associée. Pour Jupiter, la modélisation des processus de rayonnements radio prend maintenant en compte les processus associés d'accélération d'électrons par des ondes d'Alfvén. Pour Saturne, l'effort porte sur la dynamique particulière de cette magnétosphère en rotation rapide, à fortes populations de neutres.

Relations Soleil-Terre et Météorologie de l'Espace. Plusieurs équipes françaises sont aujourd'hui fortement impliquées dans les activités scientifiques encore en émergence il y a quelques années. Il faut noter en particulier le développement de techniques pour reconstruire le spectre solaire EUV et UV, principal terme de forçage solaire pour l'ionosphère et la thermosphère solaires et sa variabilité, et des études des perturbations de la thermosphère induites par l'impact de la variabilité du vent solaire sur la magnétosphère terrestre.

Evolutions et perspectives

La prospective scientifique du domaine peut s'énoncer simplement : dans leur très grande majorité, les processus plasmas et/ou d'interaction et de couplage locaux dans les milieux ionisés sont connus, décrits et quantifiés. On dispose aussi de codes numériques qui commencent à en rendre compte fidèlement. L'aspect "système" et la conjugaison des processus multi-échelles reste le mystère. L'émergence des champs magnétiques solaires et leur évolution, le chauffage de la couronne solaire, l'accélération des particules solaires, l'efficacité d'accélération et de rayonnement d'un choc, la puissance dissipée lors d'une reconnexion magnétique, sa partition entre rayonnement et accélération, la construction d'un spectre turbulent et l'émergence de structures non-linéaires sont issus de mécanismes qui ne doivent pas se concevoir comme de simples sommations de processus élémentaires. La communauté s'attelle à ces difficultés avec de nouveaux outils d'observations : projets MMS ('super' CLUSTER de la NASA, capable d'une résolution temporelle sans précédent) et CrossScale (proposé mais non retenu au 1er appel d'offre Cosmic Vision) ; Solar Orbiter qui permettra d'obtenir les premières mesures in-situ combinées avec des observations d'imagerie à haute résolution spatiale et à une vision hors écliptique du soleil et qui, couplé à Solar Probe et à Bepi Colombo, donnera un extraordinaire ensemble de mesures de la couronne et de l'héliosphère interne. Pour les moyens sol, les initiatives concernent l'après THEMIS (projet EST) et les futurs interféromètres radio (LOFAR, FASR).

Dans le domaine de la planétologie, outre Bepi Colombo maintenant en phase d'implémentation à l'ESA, le projet EJSM mail nicole pourra permettre de disposer, enfin (horizon 2025...), d'une gamme satisfaisante et complète de mesures plasma/champ électromagnétique à Jupiter.

A plus court terme, le projet CNES PICARD sera l'occasion d'accroître le poids de la communauté dans des aspects de surveillance solaire de long terme, avec des mesures fines des paramètres fondamentaux du Soleil tels que l'irradiance et ses variations et donc de possibles implications de la communauté dans l'étude du forçage éventuel du climat par le Soleil et ses variations. Il s'agit d'une forme d'élargissement thématique qu'on retrouve sur le projet TARANIS, qui étudiera les processus fugitifs aux interfaces ionosphère/atmosphères (Sprites, Elfes..) récemment découverts et mal décrits.

Les efforts instrumentaux doivent être épaulés par des développements conceptuels et de simulations numériques d'ampleur équivalente. Sur le front de la théorie, le verrou

est bien souvent celui de la physique non-linéaire et de la turbulence, ce qui est partagé par beaucoup de domaines. Pour le numérique, la communauté française commence à disposer de simulations 3D et/ou multi-échelles à mailles adaptatives du meilleur niveau, précieuses puisqu'un des atouts du domaine est de pouvoir allier des observations de haute précision avec des modèles théoriques et des simulations numériques sophistiquées, pour une approche quantitative complète des problèmes sans trop d'équivalents en astrophysique.

2.6 Origine, évolution du système solaire, structure et dynamique de ses objets et de leurs enveloppes

La planétologie moderne s'est développée dès les années 60 avec l'exploration des sondes spatiales, en s'établissant comme discipline autonome à l'interface entre différentes disciplines : astronomie, sciences de la Terre, météorologie. La dominance américaine (et, dans une moindre mesure, russe) sur cette discipline, très forte jusqu'aux années 80, a été tempérée depuis par l'exploration spatiale européenne et japonaise. L'impact de la recherche française dans la discipline est excellent, sans doute au deuxième rang derrière les Etats-Unis. On pourrait même dire que celle-ci est d'une certaine façon mieux reconnue à l'international qu'au niveau national, où la vision transdisciplinaire, au-delà de l'astronomie, des activités de planétologie n'est pas toujours bien comprise.

Les grandes questions structurant aujourd'hui la planétologie peuvent se décliner en trois thèmes fédérateurs, qui incluent également les questionnements relevant des exoplanètes :

- la formation des systèmes planétaires
- la structure et l'évolution des corps planétaires
- les environnements planétaires primitifs.

Ces questions se retrouvent dans les thématiques plus spécifiques à chaque objet ou groupe d'objets d'étude dans le système solaire et au-delà.

Faits marquants

Dans la période récente (2004-2009), ces questions ont pu être abordées dans différents domaines:

- *le système de Saturne* a bénéficié de l'arrivée de la sonde Cassini (en orbite) et de l'atterrisseur Huygens (arrivé le 14 janvier 2005). Des découvertes remarquables ont été obtenues par cette mission : sur Titan en premier lieu, dont le système d'écoulement fluvial (de méthane) a été mis en évidence, avec un cycle «méthanologique» analogue au cycle hydrologique terrestre, qui lie les aspects météorologiques, chimiques et géologiques de ce satellite. L'observation de «geysers» sur le satellite Encelade, et la mesure directe de la composition des éjectas par l'orbiteur Cassini, ont permis des mesures remarquables. Des découvertes importantes concernent aussi les anneaux de la planète (composition, origine, découvertes de nouveaux anneaux) et la géologie des autres satellites de glace.

- *Vénus* était restée longtemps délaissée par l'exploration

spatiale, particulièrement pour l'étude de son atmosphère; la sonde de l'ESA Venus Express a permis une moisson de découvertes scientifiques. La compréhension quantitative des mécanismes de super-rotation et d'effet de serre a fait de gros progrès; la détection en infrarouge de la surface de Vénus, avec la mise en évidence d'un volcanisme récent, est un autre résultat marquant. Enfin la mesure fine des paramètres de la haute atmosphère (émissions de O₂, de NO, détection et mesure de OH) donne une vision renouvelée des régions d'interface atmosphère-exosphère, importantes pour la dynamique de toutes les planètes.

- *Mars* reste un objet très étudié dans la programmation des agences spatiales avec pas moins de 5 sondes en activité en 2010 et plusieurs en préparation. La grande question débattue reste la durée de la phase humide initiale ayant conduit à la formation d'argiles (détectées par Mars Express), et la présence de sites accessibles témoins de ces premiers âges.

- *la floraison des détections d'exoplanètes* par des détections en vitesses radiales, mais aussi en occultation (COROT, qui a permis la première détection d'une « super-Terre » près de son étoile), et en détection directe (VLT/NACO), font de ce domaine un des plus actifs à la frontière entre physique stellaire et planétologie. Ces études, longtemps cantonnées à quelques mesures de paramètres (masse, rayon, orbite), entrent aujourd'hui dans le domaine de la planétologie physique, avec les premiers spectres en spectro-photométrie obtenus sur les planètes à transit, et la comparaison possible à des modèles.

- *dans le domaine de la simulation numérique*, les résultats marquants ont été la construction d'un modèle reproduisant le bombardement tardif, qui permet de comprendre comment la fin de la construction des planètes, en déstabilisant la ceinture de Kuiper, injecte jusque dans le système solaire interne de nombreux corps entrant en collision avec les planètes déjà formées. Les modélisations dynamiques du système solaire et le comportement chaotique des orbites des planètes sont un autre résultat marquant qui aura des implications, au-delà des simulations du système solaire, pour la compréhension des systèmes d'exoplanètes.

Evolutions et perspectives

La découverte de planètes extrasolaires (500 environ à ce jour) permet d'ores et déjà d'obtenir des informations physiques sur ces systèmes. L'implication d'équipes de planétologie dans ce domaine (souvent tiré par des astronomes originaires de la physique stellaire) doit permettre d'enrichir notre compréhension de leur physique par l'utilisation de modèles, en particulier pour les atmosphères planétaires, affinés par des décennies de la confrontation aux observations. La modélisation des atmosphères, en relation avec la spectroscopie moléculaire avec qui la planétologie a tissé des liens forts, est un enjeu des questions émergentes qui doivent permettre des avancées dans les prochaines années.

L'origine du système solaire reste un domaine d'étude très actif, renouvelé par la mise au point de simulations plus précises, grâce aux développements de la puissance

des calculateurs. L'étude des astéroïdes (rocheux dans la ceinture principale, glacés dans la ceinture de Kuiper), longtemps considérés comme des résidus informes de la formation du système solaire, se révèle aujourd'hui d'une richesse incomparable : familles d'astéroïdes, relations astéroïdes/météorites, dynamique des disques d'accrétion, mécanismes de collisions, relations comètes-astéroïdes, etc. Les missions spatiales en cours (Rosetta en particulier) doivent donner des petits corps du système solaire une nouvelle compréhension qui diffusera dans nos connaissances du système solaire et de sa formation.

La mission Herschel et la mise en service d'ALMA dans les prochaines années vont permettre des observations nouvelles et détaillées dans le domaine de l'infrarouge lointain et du submillimétrique, tant des planètes que des comètes.

L'étude des planètes telluriques qui se poursuivra dans la décennie 2010 reste focalisée sur l'évolution primitive des planètes et les conditions d'apparition de la vie, mais des questions plus globales se posent sur l'évolution planétaire (intérieur/surface/atmosphère), impliquant de modéliser conjointement l'apparition ou la disparition d'une dynamo, de préciser le type de volcanisme, et d'en étudier les effets sur la composition atmosphérique. La thématique des interactions intérieur/surface/atmosphère/exosphère, présente également dans les études de Titan et d'Encelade avec Cassini/Huygens, est au centre des problématiques actuelles d'étude du (des) système(s) solaire(s).

Les planètes géantes voient un regain d'intérêt, avec les études en cours de Cassini à Saturne (mission étendue jusqu'en 2017) et la préparation de la mission EJSM vers le système jovien, mais aussi dans la perspective d'un étalonnage des observations des exoplanètes par rapport à ces objets mieux connus. La question de l'origine des planètes géantes (et de leurs satellites) est en effet une question clé pour comprendre la situation des exoplanètes, et particulièrement des « Jupiter chauds », dont l'évolution orbitale est manifestement très différente de celle du système solaire.

Le cas de l'exobiologie dans la planétologie moderne mérite d'être mentionné ; longtemps restée très spéculatif et peu contrainte, la connaissance de l'évolution planétaire (incluant la proto-Terre) permet aujourd'hui de poser des questions plus pertinentes sur les conditions générales d'apparition et du maintien de la vie sur une planète, et les possibilités de détection par sonde.

En conclusion, la planétologie doit aujourd'hui être considérée au centre d'interdisciplinarités qui en font un domaine en pleine évolution. Quelques exemples en seraient: milieu interstellaire – comètes – atmosphères planétaires; formation des systèmes stellaires et exoplanètes, migration planétaire, transfert radiatif dans les exoplanètes; intérieurs planétaires, magnétisme planétaire, tectonique, évolution atmosphérique, proto-biologie; simulations dynamiques dans les disques d'accrétions, formation des planètes, évolution des disques.

Ces développements, toujours liés à des missions spatiales spécifiques, mais aussi aux méthodes de simulation et aux observations sur les télescopes au sol (VLT, ALMA,

etc.), doivent se poursuivre dans les prochaines années. La planétologie est aussi aujourd'hui la science qui permet de fonder le lien entre astronomie observationnelle et physique de laboratoire, grâce aux échantillons obtenus sur quelques objets du système solaire et de grains cométaires.

2.7 Systèmes de référence

Les évolutions des dernières années ont conduit à élargir notre vision de cette thématique. Elle regroupe les problématiques de la mesure de l'espace et du temps et de la construction de repères dans l'espace-temps ; la rotation, la forme et le champ de gravité de la Terre et ceux des autres corps du système solaire ; le mouvement des corps naturels et artificiels dans le système solaire ; les lois fondamentales de la physique, en particulier la relativité et l'interaction gravitationnelle, sur des échelles allant du micron à la taille du système solaire ; certains aspects des ondes gravitationnelles. Elle combine théorie, modélisation, traitement de données, expériences de laboratoire, moyens d'observation sol, missions et infrastructures spatiales. Elle est fortement interdisciplinaire, étant partagée avec les sciences de la terre, la physique, l'ingénierie, la physique des particules, le spatial. Elle est aussi le support d'un volet important de services d'observation.

La création en 2010 de l'Action Spécifique « Gravitation, Références, Astronomie, Métrologie » GRAM par le CNRS et le CNES, qui avait été recommandée par le colloque de prospective, doit permettre d'améliorer la coordination entre les laboratoires d'astronomie et avec ceux des autres instituts du CNRS et des autres organismes concernés par ce domaine.

Faits marquants

Parmi les faits marquants récents on peut relever :

- une contribution majeure dans la réalisation de l'ICRF2, le nouveau repère de référence céleste adopté par l'Union Astronomique Internationale en 2009. Les équipes françaises en interférométrie à très longue base (VLBI) ont été à l'origine du choix des 295 radiosources de définition de ce repère ;
- le choix des éphémérides planétaires et lunaire numériques INPOP, développées depuis 2003 et indépendantes des éphémérides américaines, comme éphémérides planétaires pour la navigation de la mission Gaia et le traitement des données obtenues au cours de la mission ;
- l'expérience de transfert de temps par lien laser T2L2 sur la mission Jason 2 en 2008. Elle promet des performances meilleures par un ordre de grandeur que celles des systèmes existants, et fait l'objet d'une intense étude aux niveaux national et international ;
- le poids très important pris par les fontaines atomiques françaises. Depuis 3 ans elles fournissent à elles seules la moitié des mesures permettant d'établir la référence internationale de la seconde, et leurs performances en

font 3 des 4 meilleures horloges au monde.

Plus généralement, les dernières années ont été marquées par la montée en puissance de l'aspect physique fondamentale de cette thématique. Cela a renforcé le volet spatial des activités, en complément des moyens existants de la géodésie spatiale, et a contribué à resserrer les liens entre les disciplines, car les tests des lois fondamentales font appel à des mesures à la limite du possible dans tous les domaines. Le GRAM doit faciliter la collaboration et la coordination au sein de cette communauté, en complément des structures plus ciblées existantes, et doit donc à terme jouer le rôle de Programme National pour la thématique.

Forces et faiblesses de la communauté

Cette thématique s'appuie sur des activités historiques d'excellence de l'astronomie française, sur des points forts de la science française en développement rapide, tel les atomes froids, sur des aspects majeurs de la politique nationale portés par des agences spécifiques (CNES, DGA, LNE, ONERA, ...). Les équipes françaises sont généralement bien constituées, certaines sont de taille importante par rapport à l'échelle internationale, elles sont bien présentes dans les structures internationales, et leurs moyens techniques sont de pointe.

La forte interdisciplinarité de cette communauté est une richesse, mais elle nécessite une vigilance de la part des laboratoires et des tutelles pour assurer sa cohérence scientifique globale et l'adéquation des ressources, en évitant les problèmes que rencontre souvent le soutien aux activités aux frontières. Le GRAM pourra être un support pour la visibilité d'ensemble de la thématique, dans la mesure de l'engagement des tutelles.

On peut identifier deux points spécifiques de difficulté actuels :

- les équipes de télémétrie laser du site d'observation du Plateau de Calern subissent de nombreux départs à la retraite, ce qui remet en question la continuité d'une partie des activités, notamment la station laser mobile. Ce problème peut être relié à la question du développement du site d'observation de Tahiti, où l'implantation de stations VLBI et laser modernes aurait un grand intérêt. Ce sujet doit certainement être traité en concertation avec les sciences de la terre ;
- la montée en puissance des expériences spatiales de physique fondamentale a nécessité un long processus de développement des relations avec les agences spatiales et avec l'industrie. Il y a aujourd'hui un besoin clair de structuration des moyens de la communauté scientifique applicables à la physique fondamentale spatiale, en capitalisant sur cette expérience, pour maximiser à l'avenir la visibilité et l'impact de cette communauté.

Evolutions et perspectives

A court terme la communauté devra assurer l'exploitation des missions spatiales en cours, notamment T2L2 et GOCE (champ de gravité) et la préparation des missions engagées, Gaia (astrométrie, système solaire, physique

fondamentale), PHARAO/ACES (temps/fréquence, redshift gravitationnel) et MICROSCOPE (principe d'équivalence).

A plus long terme les grandes questions déjà identifiées gardent toute leur pertinence. Pour le système de référence céleste l'exploitation des résultats de Gaia sera capitale, devant conduire à un repère optique meilleur que l'ICRF actuel. Pour la métrologie temps/fréquence l'avenir passe par le développement d'horloges basées sur des transitions optiques, avec le but à terme de redéfinir la seconde, ce qui nécessite aussi le développement de nouveaux liens permettant de comparer ces horloges ultra-précises à distance. Pour la géodésie spatiale l'objectif est un système mondial d'une précision millimétrique. Ces évolutions mènent vers un avenir où les références spatio-temporelles fondamentales seront basées sur des observations et des infrastructures spatiales, et diffusées vers la Terre ou dans le système solaire en tant que de besoin. Le système européen de navigation par satellites Galileo constituera un pas sur ce chemin. Les tests de la physique fondamentale, au-delà des missions mentionnées, se développeront par des expériences de laboratoire déjà engagées, par le développement des senseurs inertiels à interférométrie atomique et par la proposition d'instruments et de missions permettant de sonder la gravitation et d'autres effets dans le système solaire. La détection d'ondes gravitationnelles, par l'observation de pulsars ou par les interféromètres optiques, fait appel aux mêmes bases techniques et théoriques et fait donc aussi partie des perspectives. Le positionnement de cette communauté dans le programme Cosmic Vision de l'ESA est un enjeu de taille, avec la mission LISA, l'instrument « Gravity Advanced Package » GAP pour la mission EJSM, et de nouvelles propositions de missions dans le cadre de l'appel Cosmic Vision 2 en 2010.

3 - LES OUTILS DE L'ASTROPHYSIQUE

3.1 Instrumentation

Le développement instrumental est un des points forts, reconnu sur le plan international, de la communauté astrophysique française. La moitié des projets proposés dans les thématiques 'Astrophysique' et 'Système Solaire' en réponse à l'appel d'offre 'Cosmic Vision 2015-2025' lancé en 2007 par l'ESA émanaient d'Investigateurs Principaux (PI) français ; la moitié des instruments VLT/VLTI (hors ceux développés par l'ESO) étaient, ou sont, à PI français, alors que la part française dans ces agences n'est que de l'ordre de 20%. Ceci témoigne des capacités d'initiative, s'appuyant sur de vigoureux programmes de R&D, et des capacités de maîtrise d'œuvre et de réalisation, de notre communauté.

Les développements instrumentaux se font essentiellement dans le cadre des grandes infrastructures internationales, sous contrôle des agences (CNES, ESA, ESO, NASA, etc.) qui les gèrent. La discipline participe également à de nombreux projets 'Astroparticules' en collaboration avec des laboratoires de l'IN2P3. Sur la vingtaine de

laboratoires (UMR) de la discipline, la plupart participent aux développements instrumentaux au sol, et un tiers environ au développement de projets spatiaux. Les grands projets les plus récents de la discipline (par exemple VLT/VLTI, Planck et Herschel, etc.), ont eu de forts effets structurants pour l'ensemble des laboratoires impliqués: équipement en moyens lourds de réalisation et d'intégration, méthodes de gestion de grands projets, développements de compétences propres au traitement, archivage et mise à disposition des données, etc.

Mais le contexte des grandes infrastructures de la discipline continue à évoluer: les projets sont moins nombreux, mais de plus grande envergure, et certains projets spatiaux se font maintenant avec une participation renforcée des industriels, ce qui modifie le rôle du secteur académique. Ceci a des conséquences sur les plans de charge des laboratoires, suspendus aux décisions liées aux grands programmes des agences, tel Cosmic Vision ou l'E-ELT, et sur les métiers, qui doivent évoluer vers davantage de technicité et de spécialisation, dans un contexte de renforcement des aspects internationaux et de management. Le poids des phases d'études, souvent compétitives, même au niveau national, devient de plus en plus important, et nombreuses sont celles qui ne sont pas suivies de phases de réalisation. Le rôle de la R&D en est renforcé, ainsi que les besoins en spécialistes de la gestion technique des projets et en chercheurs instrumentalistes lorsque les projets sont finalement sélectionnés.

Le contexte programmatique a également évolué: apparition de l'ANR en France, rôle de plus en plus important des programmes européens successifs du PCRD, etc. Ces programmes offrent des moyens supplémentaires et sont bien adaptés aux actions de R&D, mais sont par nature non pérennes, ce qui peut poser des difficultés pour les développements instrumentaux qui s'inscrivent dans la durée. Enfin, rappelons également le rôle important joué par le programme ASTRONET pour l'établissement d'une feuille de route européenne des infrastructures de recherche.

Les priorités nationales pour les nouveaux projets ont été établies au cours du colloque de prospective de 2009 et reprennent les priorités européennes, tout en les déclinant avec les domaines d'excellence nationaux en instrumentation. Ainsi, les priorités pour les grands investissements sont l'E-ELT et son instrumentation, pour lequel des choix instrumentaux importants restent à faire, puis le projet CTA. Le projet NOEMA d'extension de l'interféromètre millimétrique du plateau de Bure à l'IRAM est en première priorité pour les projets "moyens", suivi du projet d'extension du VLTI et de la construction de l'instrument VSI, et enfin, il est recommandé de développer le spectro-polarimètre SPIROU pour le TCFH, et un spectrographe multi-objet grand champ pour l'accompagnement scientifique de Gaia. Notre communauté doit également se préserver la possibilité de participer, si l'occasion se présente, à des projets américains, au premier rang desquels le LSST, ou dans une moindre mesure BigBOSS, CCAT, ou d'autres. Enfin, il faut accompagner le développement des projets majeurs du futur, comme SKA et EST, et soutenir l'étude de l'instrument Imaka.

3.2 Base de données et archivage massif

L'astronomie développe depuis longtemps un ensemble d'archives et de services en ligne qui sont utilisés quotidiennement par la communauté internationale, et c'est une discipline pionnière dans l'évolution très significative des méthodes de recherche permise par la mise à disposition des données scientifiques. Les données couvrent l'ensemble de la chaîne de recherche, des données d'observation, conservées et mises à la disposition des scientifiques dans les archives d'observatoires, jusqu'aux résultats publiés dans les journaux, en passant par des bases de données de compilation ou des services qui mettent en ligne des données de simulation, ou permettent de faire tourner des modèles à la demande.

L'astronomie a immédiatement tiré parti de la mise en œuvre du Web, développant des services en ligne et des liens entre ces services, avec un apport majeur du Centre de Données astronomiques de Strasbourg (CDS). L'étape suivante, depuis 2000, est la mise en place progressive de l'Observatoire Virtuel (OV) astronomique, qui a pour objectif de donner à tous les chercheurs un accès transparent à l'ensemble des données de la discipline. Le développement est coordonné par l'International Virtual Observatory Alliance (IVOA), le travail étant réalisé par des projets répartis autour du monde, et ensuite implémenté dans les centres de données pour ouvrir l'accès à leurs ressources en ligne dans le cadre de l'OV. L'OV et la mise à disposition des données ont été identifiés en 2008 par la Feuille de Route ASTRONET comme l'une des infrastructures majeures de l'astronomie, en complément des télescopes au sol et spatiaux.

La France a joué un rôle moteur dans le développement de l'OV, et plusieurs équipes françaises ont participé dès l'origine aux projets européens obtenus dans différents appels d'offre pour soutenir le programme (plusieurs d'entre eux sont ou ont été coordonnés par la France). L'Action Spécifique Observatoires Virtuels France (ASOV), créée en 2004 sur la recommandation du précédent colloque de prospective, coordonne les activités OV en France et est membre de l'IVOA.

L'OV astronomique passe progressivement, au niveau international, en phase opérationnelle. On voit aussi émerger des projets où les équipes françaises sont leaders ou très actives dans des disciplines voisines, la physique héliosphérique et la planétologie, qui ont également obtenu des soutiens européens. Des liens existent également avec les développements en physique atomique et moléculaire (projet VAMDC piloté par la France) grâce à la force des activités pluri-disciplinaires dans le domaine de la physico-chimie d'intérêt astrophysique.

La France a développé au fil du temps un réseau de centres de données disciplinaires : le CDS, labellisé en 2008 Très Grande Infrastructure de Recherche, pierre angulaire de l'ASOV ; BASS 2000 et MEDOC, pour les aspects sol et spatiaux des données solaires ; le CDP, Centre de Données de la Physique des Plasmas. Il faut citer également le centre d'expertise Terapix pour le traitement

des données grand champ, et le JMMC pour le traitement des données interférométriques. L'émergence du concept d'OV et les actions de sensibilisation menées par l'ASOV ont produit une floraison de nouveaux acteurs et de services qui mettent en ligne de l'information souvent plus focalisée. On en trouve dans pratiquement tous les OSU à composante astronomique, et plusieurs établissements mutualisent des moyens pour ces développements.

Les enjeux sont, dans l'esprit des recommandations d'ASTRONET, de pérenniser les centres de données et les services, d'une part, et les compétences OV et leur coordination européenne et internationale, d'autre part, ce qui nécessite de trouver des financements au niveau national et au niveau européen. L'une des actions majeures dans la phase actuelle du projet est d'assurer la formation des utilisateurs à l'utilisation des fonctionnalités avancées de l'OV.

3.3 Simulations numériques

Le calcul intensif est devenu un outil indispensable pour la plupart des thématiques astrophysiques. C'est à la fois un moyen de mener des études théoriques, et un outil pour interpréter et valoriser les observations. De grands défis scientifiques qui nécessitent l'utilisation du calcul intensif se retrouvent dans tous les domaines décrits § 2. Ils sont résumés ci-dessous :

- *la cosmologie et la formation des grandes structures* (PNCG), domaine dans lequel les simulations ont fait des progrès considérables, et permettent maintenant de traiter tout l'Univers observable, en commençant à distinguer les amas de galaxies. Il faut citer pour ce thème et le suivant l'apport du projet Horizon ;

- *la formation et l'évolution des galaxies, l'histoire de la formation des étoiles* (PNCG). Les simulations sont essentielles pour mieux comprendre la formation et l'évolution des galaxies, et accompagner les grands relevés de population de galaxies à toutes longueurs d'ondes et à toutes époques, remontant jusqu'au Big Bang ;

- *l'étude des astres condensés et des trous noirs, physique relativiste* (PCHE). L'étude des astres compacts et de la matière condensée nécessite de résoudre les équations relativistes. Il faut citer ici le logiciel LORENE. L'étude des disques d'accrétion autour d'étoiles jeunes et de trous noirs (instabilités, accrétion, éjection) est un autre objectif important pour les simulations dans ce domaine ;

- *le calcul et la simulation des processus moléculaires* (PCMI, PNP). La description des processus moléculaires dans les milieux interstellaires et circumstellaires et les atmosphères planétaires est devenue de plus en plus complexe, intégrant progressivement toutes les composantes du gaz et les interactions dans celui-ci, et faisant appel aux méthodes de calcul quantique de la physique moléculaire et de la chimie théorique ;

- *la dynamique et la fragmentation du milieu interstellaire, la formation des cœurs pré-stellaires* (PCMI, PNPS). Afin d'interpréter les observations de plus en plus détaillées du processus de formation des étoiles, les simulations

numériques doivent couvrir une large gamme d'échelles (de plusieurs centaines de parsecs à une fraction d'unité astronomique), et inclure des processus variés (gravité, champ magnétique, transfert de rayonnement, chimie hors équilibre) ;

- *la formation et évolution du Soleil et des étoiles, interactions Terre-Soleil* (PNST, PNPS). La dynamique, la formation et l'évolution des étoiles, la propagation du vent solaire, son interaction avec la magnétosphère terrestre et la dynamo terrestre, sont liées à la physique des plasmas chaud et froid, et à leurs approximations fluides. Ces phénomènes sont fortement non linéaires et turbulents, et nécessitent un approche numérique lourde ;

- *la formation des planètes et systèmes planétaires* (PNP). Les scénarios de la formation des planètes font apparaître différentes étapes de nature très différente (formation des cœurs solides, des planètes géantes, interactions de marée planètes – disques), et les codes et techniques utilisés font appel à une large gamme de compétences.

Pour l'ensemble de ces thématiques, l'accès à une grande puissance de calcul permet le raffinement des modèles physiques et l'augmentation de la résolution numérique, qui est un enjeu particulièrement important pour de nombreux champs de la recherche. Pour certaines thématiques, il est nécessaire de pouvoir avoir accès à un grand nombre de processeurs (plusieurs centaines à quelques milliers) sur des durées pouvant parfois atteindre la semaine, voire le mois.

Les ressources en calcul utilisées sont à la fois les moyens de calcul intensifs locaux (serveurs, grappes de serveurs), régionaux (mésocentres), et centralisés (centres nationaux et internationaux). Il faut noter que ces dernières années ont enfin vu l'émergence d'une infrastructure claire et solide pour le calcul intensif en France, organisée en pyramide avec les moyens locaux et régionaux à la base, puis les moyens nationaux, et enfin au sommet les moyens européens, grâce à la création du GENCI qui, entre autres, assure un financement pérenne et de bon niveau pour les moyens nationaux, et au projet européen PRACE.

3.4 Astrophysique de laboratoire

L'astrophysique de laboratoire se définit comme l'ensemble des activités au laboratoire (expérimentales ou théoriques) dédiées à des problématiques astrophysiques. L'apport de cette activité à l'analyse des données en astronomie et en planétologie est essentiel. Elle a connu un développement notable depuis une dizaine d'années et la communauté française a acquis dans ce domaine une visibilité internationale forte. Son rôle devrait croître avec le développement d'observatoires de plus en plus sophistiqués au sol et dans l'espace qui offrent une couverture complète du spectre électromagnétique. De plus, les sondes spatiales orbitant autour des objets du système solaires sont de véritables laboratoires volants, capables de prélever et analyser in situ des échantillons solides et gazeux, voire de les ramener sur Terre. Enfin, la complexité de certains phénomènes astrophysiques (par exemple les nanoparticules du milieu interstellaire,

ou la réactivité à très basse température) conjuguée à la difficulté de recueillir des informations autrement que par télédétection, a rendu nécessaire le développement d'études en laboratoire.

L'astrophysique de laboratoire se décline donc selon plusieurs modalités : i) la détermination (expérimentale ou théorique) de données fondamentales (spectroscopie, réactivité, équation d'état, etc.), ii) la simulation des processus à l'œuvre dans les milieux astrophysiques (chocs et jets stellaires, évolution de la matière, etc.), iii) la fabrication de matériaux analogues aux matériaux astrophysiques et la mise en œuvre de procédés d'analyse toujours plus performants. Elle fait appel à des expériences dédiées et repose beaucoup sur des approches interdisciplinaires impliquant l'astrophysique avec d'autres domaines de la physique et de la chimie. Certaines de ces études ont une forte interface avec les sciences de la Terre et de l'atmosphère. Les activités d'astrophysique de laboratoire sont aussi bien intégrées dans l'Observatoire Virtuel avec le développement de standards pour rendre les bases de données de physique interoperables.

Cinq thématiques peuvent être identifiées : (1) Spectroscopie moléculaire et des solides. Le besoin en données de spectroscopie des gaz comme des solides est toujours d'actualité, notamment dans le domaine submillimétrique, exploré par le satellite Herschel lancé en 2009. (2) Plasmas chauds, dynamique et propriétés microscopiques de la matière dense et chaude, en liaison principalement avec la physique stellaire. (3) Etudes des processus microphysiques, pour comprendre comment la matière interstellaire évolue et comment se forment les matériaux détectés, et enrichir les modèles des objets et milieux astrophysiques. On peut rattacher les processus nucléaires à cette thématique même si les études sont menées dans des laboratoires IN2P3 pour ce dernier point. (4) Matière extraterrestre: analyse in situ et analogues / simulations en laboratoire. (5) Métrologie temps/fréquence.

L'INSU fournit un soutien et une coordination de l'astrophysique de laboratoire par l'intermédiaire des programmes nationaux (PCMI, PNP, PNPS). Des GDR spécialisés (par exemple SPECMO, DYNAMO) complètent le dispositif. Le PIR OPV (devenu EPOV) joue aussi un rôle pour le financement de certaines expériences. Toutefois, le budget limité de ces programmes ne leur permet pas de mettre en place une véritable politique incitative en terme de développements instrumentaux. Leur rôle est d'inciter à la formation d'équipes pluridisciplinaires, de structurer les activités, et de soutenir le fonctionnement des expériences, le plus souvent sur une base pluri-annuelle. Au cours du temps, des réseaux de collaboration impliquant des équipes françaises et étrangères se sont constitués.

Les équipes relèvent du périmètre de l'INSU, de l'INP, de l'INC et de l'INS2I principalement. Les réseaux permettent une « immersion » des équipes pratiquant l'astrophysique de laboratoire dans des laboratoires se situant dans le « cœur de métier » et facilitent ainsi la circulation des idées et des techniques. Cependant, il faut noter que la dispersion géographique et institutionnelle qui résulte du fonctionnement actuel de l'astrophysique

de laboratoire est un handicap pour sa visibilité par les disciplines constituées ainsi que pour les recrutements par les instances disciplinaires. La définition de critères de recrutement spécifiques aux activités interdisciplinaires comme l'astrophysique de laboratoire, ainsi que la formation en amont par des thèses interdisciplinaires, pourraient constituer de bons remèdes à ces difficultés.

3.5 Services d'Observation

Les observations de phénomènes naturels sur de longues périodes de temps sont un dispositif incontournable de toutes les disciplines de l'INSU, et la communauté des Sciences de l'Univers est investie d'une « mission de service » pour les mener à bien. Les Services d'Observation sont labellisés par l'INSU, avec trois sections, astronomie, terre interne, et surface et interface continent/océan/atmosphère, et leur liste est régulièrement remise à jour.

Les Services d'Observation en astronomie sont définis pour l'essentiel par regroupements fonctionnels qui suivent le chemin d'acquisition et de distribution des données, avec aussi des services spécifiques pour la métrologie de l'espace et du temps et la surveillance solaire et les relations Soleil-Terre. Ce sont :

- métrologie de l'Espace et du Temps
- instrumentation des grands observatoires au sol et spatiaux
- stations d'observation nationale et internationales
- grands relevés et sondages profonds
- centres de traitement et d'archivage des données
- surveillance solaire, relations Soleil-Terre, environnement terrestre.

Les Services d'Observation, qui permettent de mettre en œuvre les moyens d'observation, sont l'une des forces de la discipline, ainsi que les personnels du corps des Astronomes et Physiciens (CNAP), dont les missions, en symbiose avec la mission de l'INSU, combinent recherche, enseignement et tâches de service dans les services labellisés. Leurs compétences scientifiques assurent la pertinence des services, et une part de leur évaluation repose sur leur apport à ceux-ci.

Le groupe de travail de l'exercice de prospective chargé de l'examen des Services d'Observation a noté que la structuration en grands types fonctionnels demeure bien adaptée aux missions de service en Astronomie-Astrophysique. Il recommande de renforcer la coordination des services au niveau national et local, avec entre autres une structure spécifique au niveau de la Commission Spécialisée Astronomie et Astrophysique, et des procédures plus formalisées de labellisation, de suivi et de dé-labellisation.

Les Services d'Observation sont donc évalués régulièrement, et susceptibles d'être dé-labellisés lorsqu'ils ne sont plus pertinents, mais leur gestion dépasse le cadre des quadriennaux des laboratoires et des financements sur programme. Elle doit être du ressort des OSU et des tutelles pour l'attribution des postes et des moyens pluriannuels pour la maintenance et la jouvence.

4 – contexte national et international

4.1 Relations avec les autres disciplines

Par la vaste gamme des objets et milieux célestes étudiés, l'astrophysique offre un champ d'investigation inégalé pour la connaissance des phénomènes fondamentaux, et la mise en perspective des théories élaborées à partir du cadre plus restreint offert à l'expérimentation sur Terre. Les observations ouvrent l'accès à des conditions difficilement reproductibles en laboratoire (grandes distances, hautes pressions et densités ou au contraire vides extrêmes et basses températures, champ magnétique fort, faible accélération, etc.) et donc la possibilité d'étendre les tests des lois physiques connues dans de nouveaux régimes. Mais les interfaces de l'astrophysique ne se limitent pas à la physique fondamentale. Les questionnements et découvertes astrophysiques suscitent des développements novateurs, théoriques ou expérimentaux, dans de nombreuses branches de la physique, de la chimie, des mathématiques, du traitement du signal comme de l'ingénierie. En retour, la démarche d'exploration de l'univers se nourrit des avancées d'autres domaines scientifiques. La multiplicité des collaborations nouées autour de la question des origines, origine de l'univers, origines des planètes et du système solaire, origine de la vie, une des interrogations majeures de l'humanité, illustre parfaitement la fécondité des collaborations interdisciplinaires pour l'astrophysique.

L'astrophysique des hautes énergies, ainsi que les questionnements sur l'origine et la structure de l'Univers, intéressent une communauté où les chercheurs de l'IN2P3, de l'INSU et de physique théorique (INP) s'associent. Les recherches s'appuient sur les grands relevés, dans une vaste gamme de longueurs d'onde (domaine millimétrique et submillimétrique pour le CMB, domaine visible pour l'énergie noire, domaine des hautes et très hautes énergies, etc). Les avancées remarquables dans la détection de photons gammas (télescopes HESS, Fermi et bientôt CTA) ouvrent un nouveau champ de l'astronomie. Les PIR « Astroparticules », puis « Particules et Univers », contribuent à l'animation et à la structuration de cette communauté en liaison étroite avec les Programmes et GdR INSU. Une commission interdisciplinaire existait lors des deux précédents mandats du comité national, mais n'a pas été renouvelée. Le besoin d'échanges entre communautés de physiciens des particules, théoriciens et astrophysiciens, est toujours vivace et devrait permettre un meilleur partage des compétences autour des grands projets.

Le domaine de la gravitation et des systèmes de référence d'espace et de temps est un autre domaine d'interface avec la physique fondamentale. En effet, l'étude des systèmes de référence apporte des possibilités nouvelles pour tester la physique fondamentale et plus particulièrement la relativité générale, que ce soit le principe d'équivalence, l'invariance de Lorentz, ou l'existence de forces supplémentaires. Le domaine est donc fortement interdisciplinaire, tant par les méthodes mises en œuvre, qui vont des horloges utilisant les dernières avancées de la physique quantique aux

systèmes de positionnement ultra-précis et aux calculs de mécanique céleste les plus détaillés, que par le champ d'application des résultats. Il faut noter la participation récente de cette communauté aux programmes des agences spatiales, qui fait émerger, comme expliqué plus haut, le besoin d'une structuration à l'échelle nationale et européenne. L'INSU vient de mettre en place une action spécifique sur cette thématique, pilotée conjointement avec l'INP.

L'étude des milieux astrophysiques requiert une expertise interdisciplinaire à propos des processus physiques, chimiques et dynamiques impliquant les atomes et molécules, les grains de poussière, les particules énergétiques, les plasmas, le rayonnement et le champ magnétique. L'astrophysique est donc naturellement en interface avec diverses branches de la physique et de la chimie, physique des plasmas, physique atomique et moléculaire et réactivité notamment. Ces activités se regroupent sous le vocable « astrophysique de laboratoire » qui fait l'objet d'un chapitre séparé.

L'astrophysique est naturellement aussi en interface avec les autres disciplines de l'INSU : l'exploration toujours plus avancée du système solaire et la diversité étonnante des systèmes d'exoplanètes offrent un champ d'investigation toujours plus vaste à la planétologie, où les compétences des spécialistes de géophysique, géochimie, climatologie, océanographie, astrophysique peuvent s'épauler. L'exploration à peine entamée des caractéristiques des exoplanètes a déjà fait entrevoir la très grande variété de leurs propriétés, qui pose des défis nouveaux pour leur modélisation. La météorologie de l'espace et la climatologie de l'espace sont deux thématiques en émergence, où peuvent se retrouver les spécialistes de physique solaire et de l'atmosphère terrestre. L'étude de l'évolution des atmosphères primitives, l'impact de l'activité des étoiles hôtes sur ces atmosphères, ainsi que l'établissement de critères de présence d'une éventuelle activité biologiques, sont autant de questions d'interface entre astrophysique, physique des atmosphères et éventuellement biologie. La Cosmochimie apporte un savoir faire incomparable pour l'étude des matériaux terrestres et extraterrestres, qui contraint fortement les modèles de formation et d'évolution du système solaire. Le programme national de planétologie (PNP) joue pleinement son rôle de structuration et d'animation scientifique de la planétologie. Le PIR « Origines des planètes et de la Vie », renouvelé sous l'intitulé « Environnements planétaires et Origines de la Vie » prend en compte plus spécifiquement les questions relatives à la caractérisation des exoplanètes et à la composition des atmosphères, en relation avec la question de l'origine de la Vie. Il comporte un important volet de chimie et de biologie dans la poursuite des activités du GDR Exobiologie.

Les méthodes et moyens d'observations utilisés en astrophysique ouvrent des champs de recherche féconds à d'autres disciplines. Le traitement de l'information est un des exemples les plus marquants. En effet, le développement de méthodes de traitement d'image robustes est devenu un impératif majeur pour les nouveaux projets (grands relevés du ciel, optique adaptative, astrophysique des très hautes énergies, interférométrie,

etc.). Réciproquement, les recherches menées par les laboratoires d'astrophysique apportent aux STIC (INS2I, INSIS, INSMI) des problématiques et des contributions originales. On peut citer les questions de la déconvolution et la reconstruction d'images, de la séparation de sources, et de l'analyse de données hyperspectrales, sans oublier l'analyse temps-fréquence (notamment pour le CMB). Les compétences acquises dans le domaine de la gestion des bases de données interrogeables à distance sont importantes, à la fois pour la mise en place des bases elle-mêmes, mais aussi dans le développement d'outils destinés à gérer une grande quantité de données. Ces compétences préfigurent aussi l'outil scientifique et l'enjeu technologique qu'est l'Observatoire Virtuel astronomique – un précurseur pour toutes les disciplines en terme de mise à disposition des données scientifiques.

L'astronomie s'est développée sur l'ensemble du spectre électromagnétique, et même au-delà en utilisant les nouveaux messagers que sont les particules comme les neutrinos, et bientôt les ondes gravitationnelles. Pour atteindre les meilleures performances (sensibilité, résolution spatiale, spectrale, temporelle, champ de vue, etc.), la communauté est très investie dans de nombreuses activités d'instrumentation, la photonique étant un domaine d'excellence de la discipline. Des collaborations existent avec des laboratoires d'ingénierie mais ces activités pourraient être mieux mises en valeur. Les projets astrophysiques étant très exigeants au niveau des spécifications instrumentales (sensibilité, conditions extrêmes de fonctionnement, autonomie), ils permettent l'émergence de nouveaux concepts qui peuvent ensuite être repris dans d'autres contextes. Il faut noter que les pôles de compétitivité sont des acteurs importants pour la mise en réseau des laboratoires et industriels ainsi que pour le financement (par exemple OPTITEC en Provence).

Avec ses nombreuses thématiques aux interfaces d'autres disciplines, l'astrophysique est confrontée à la difficulté de l'évaluation des activités interdisciplinaires. Il faut veiller à valoriser le travail réalisé dans de telles collaborations, au niveau de l'évaluation des laboratoires, des équipes comme de celles des chercheurs. Il est également important que des experts de l'ensemble des disciplines soient présents dans les structures d'évaluation. Même si le débat sur la formation initiale n'est pas tranché, il est souhaitable, quand les conditions locales le permettent, d'encourager les écoles doctorales à financer des thèses sur des sujets interdisciplinaires. Le CNRS peut faciliter cette politique en participant au financement des bourses de thèse sur des sujets fléchés. La question de la gestion des recrutements dans les très nombreux champs interdisciplinaires en interface avec l'astronomie n'est pas résolue.

4.2 Organisation nationale

Le contexte de l'organisation nationale de l'astronomie en France est en forte évolution, avec en particulier la réforme du CNRS et l'application de la loi LRU (Liberté et Responsabilité des Universités). La particularité des Sciences de l'Univers est le pavage par les Observatoires des Sciences de l'Univers, qui sont entre autres en charge de l'organisation des Services d'Observation, avec la mise à disposition des personnels

du corps des astronomes. L'équilibrage des responsabilités entre CNRS, Universités et Grands Etablissements, et la prise en compte du caractère national, international et long terme des activités, sont fondamentaux pour la discipline.

Dans ce contexte, le rôle des Unités Mixtes de Recherche (UMR) au cœur du dispositif de recherche doit être réaffirmé comme un élément essentiel des succès de la recherche nationale, permettant de combiner l'organisation nationale (CNRS) et régionale, avec des ambitions européennes et internationales partagées. L'importance d'une politique de laboratoire dans les UMR est rappelée et soutenue : elle permet d'afficher des axes de recherche sur le long terme, par rapport à une dérive vers un simple rôle d'hôtel à projets. La recherche dans une discipline à moyens lourds doit avoir une partie programmée et une partie non programmée, ce qui demande un niveau correct en soutien de base et en moyens communs.

Le rôle des grands organismes reste essentiel pour la communauté astronomique : le CNES, en particulier, est un acteur-clé pour le bon déroulement et le suivi des expériences spatiales proposées au niveau européen et mondial, grâce à la structuration des laboratoires spatiaux. La gestion des grands instruments sol et spatiaux nécessite une structuration nationale des laboratoires et des projets, face au risque de parcellisation de politiques locales. L'INSU est le garant de l'établissement et de la mise en œuvre d'une stratégie nationale.

4.3 Le contexte européen

L'astronomie est une discipline très fortement structurée au niveau européen. Au-delà du rôle intégrateur joué par les grandes agences sol et espace (ESO-ESA), la prise en compte aujourd'hui par les laboratoires et les équipes de la dimension stratégique des différents programmes mis en place par l'Union Européenne est indéniable. Sur les cinq dernières années par exemple, on dénombre près de 150 actions différentes pour un budget de plus de 60M€ et ayant entraîné une activité à hauteur de plus de 150 hommes.an. Au-delà des réseaux traditionnels on voit apparaître aujourd'hui à une place tout à fait importante les grands programmes de la Communauté Européenne.

Le CNRS a, comme on l'a souligné plus haut, la responsabilité de l'ERA-NETASTRONET, qui a notamment permis de coordonner les politiques scientifiques des organismes européens en astronomie. L'établissement d'une première véritable prospective astrophysique européenne s'est ensuite prolongé par l'établissement d'une feuille de route pour la mise en chantier des grandes infrastructures de recherche au service de ces priorités.

Le CNRS doit continuer à soutenir cet engagement en œuvrant pour mieux décliner ces grands programmes en appels d'offre adaptés aux développements des laboratoires français et doit aussi accompagner concrètement les équipes dans les diverses étapes des projets européens, avec le souci en particulier de pérenniser les acquis, ce que ne permettent pas les financements européens.

4.4 Relations avec la société

L'astronomie est un canal remarquable pour sensibiliser le public, et en particulier les jeunes de tous milieux, aux questions et à la démarche scientifiques. C'est aussi un portail pour attirer les jeunes générations vers les carrières scientifiques et technologiques, et une façon efficace de combattre la montée des fausses sciences et de la pensée irrationnelle. La communauté a toujours considéré la diffusion des connaissances et la formation des étudiants comme des tâches importantes, et un groupe de travail du colloque de prospective s'est penché sur leurs différents aspects : enseignement universitaire, enseignement dans le primaire et le secondaire, et diffusion des connaissances vers le grand public.

L'un des soucis majeurs est la perte globale, hors Ile-de-France, du nombre d'allocations doctorales ministérielles pour les doctorants de la discipline, avec le passage au LMD et au système des grandes Ecoles Doctorales généralistes. Pour ce qui concerne les filières de Licence et Master, la difficulté quelquefois rencontrée pour négocier la « bi-appartenance » entre la Physique et les Sciences de l'Univers est notée. Pour l'enseignement en primaire et secondaire, il serait souhaitable qu'un astronome participe aux comités d'élaboration des programmes, et il faudrait mieux structurer les actions de formation des enseignants. Pour ce qui concerne les actions vers le grand public, où la demande est très forte, il faut continuer à encourager la participation des collègues de tous les corps. L'Année Mondiale de l'Astronomie (AMA09) a été un temps fort, et il faut trouver les moyens de pérenniser les actions les plus réussies mises en place à cette occasion. La création d'un réseau des chargés de communication des établissements serait sans doute utile.

Un autre élément de l'impact sociétal de la discipline est la valorisation, qui a été l'objet d'un autre groupe de travail de l'exercice de prospective. L'impact économique de la discipline est difficile à analyser suivant les critères habituels de valorisation des activités de recherche. Malgré un nombre réduit de brevets, licences d'exploitations et entreprises créées, l'étude menée montre que les investissements alloués au développement de l'astronomie en général, et de l'investissement associé aux instruments en particulier, ont des retombées conséquentes pour le secteur industriel. Les partenaires de la discipline considèrent que les réelles retombées dépassent ce qui est immédiatement mesurable par l'ouverture de marchés internationaux, et bien au-delà de l'astronomie.

Remerciements

Ce texte fait largement appel aux documents produits par les groupes de travail de l'exercice de prospective de l'INSU 2009, dont quelques-uns étaient pilotés par des membres de la Section, mais pas tous, et de loin, et à ceux produits par des groupes de travail thématiques pilotés par les responsables des Programmes Nationaux et du GdR PCHE. On retrouvera les textes complets et la liste des auteurs dans le document de prospective de l'INSU. Nous remercions les nombreux contributeurs qui ont permis de bâtir cette vision de

la conjoncture dans le domaine « Système Solaire et Univers Lointain », et soulignons le très gros travail de collecte d'information, d'analyse et de synthèse qu'ils ont accompli.

ANNEXE

ACES : Atomic Clock Ensemble in Space
ALMA : Atacama Large Millimeter/submillimeter Array
AMA09 : Année Mondiale de l'Astronomie 2009
AMS-02 : Alpha Magnetic Spectrometer - 02
ANR : Agence Nationale de la Recherche
ANTARES : Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch
ASOV : Action Spécifique Observatoires Virtuels France
BAO : Baryon Acoustic Oscillations
BASS2000 : Base de données Solaires Sol 2000
BigBOSS : Big Baryon Oscillation Spectroscopic Survey
BOSS : Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (projet du SDSS-III)
CCAT : Cornell Caltech Atacama Telescope
CDPP : Centre de Données de la Physique des Plasmas
CDS : Centre de Données astronomiques de Strasbourg
CEA : Commissariat à l'Energie Atomique
CFHT : Canada-France-Hawaii Telescope
CFHT-LS : Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey
CHARA : Center for High Angular Resolution Astronomy
CINES : Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur
CNAP : Conseil National des Astronomes et Physiciens
CNES : Centre National d'Etudes Spatiales
CMB : Cosmic Microwave Background
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
COROT : CONvection, ROTation et Transits planétaires
COSMOS : Cosmological evolution Survey
CTA : Cherenkov Telescope Array
DEMETER : Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions
DGA : Direction Générale de l'Armement
E-ELT : European Extremely Large Telescope
EJSM : Europa Jupiter System Mission
ELT : Extremely Large Telescope
EPOV : Environnements Planétaires et Origine de la Vie
ERA-NET : European Research Area - Network
ESA : European Space Agency
ESFRI : European Strategy Forum for Research Infrastructure
ESO : European Southern Observatory (The European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere)
ESPaDOnS : Echelle SpectroPolArimetric Device for the Observation of Stars
EST : European Solar Telescope
EUCLID : ESA Dark Energy mission
EUV : Extreme UV
FASR : Frequency Agile Solar Radiotelescope
GALEX : Galaxy Evolution Explorer
GAP : Gravity Advanced Package
GdR : Groupement de Recherche
GENCI : Grand Equipement National de Calcul Intensif
GFT : Ground Follow-up Telescope
GOCE : Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

GRAM : Gravitation, Références, Astronomie, Métrologie
GRAVITY : General Relativity Analysis via VLT Interferometry
HESS : High Energy Spectroscopic System
HR : Hertzsprung-Russell
HSHS : Hubble Sphere Hydrogen Survey
ICRF : International Celestial Reference Frame
IMAGES : Intermediate MAss Galaxy Evolution Sequence
IMF : Initial Mass Function
IN2P3 : Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules
INC : Institut de Chimie
INP : Institut de Physique
INPOP : Intégrateur Numérique Planétaire de l'Observatoire de Paris
INS2I : Institut des Sciences Informatiques et de leurs Interactions
INSMI : Institut National des Sciences Mathématiques et de leurs Interactions
INSIS : Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes
INSU : Institut National des Sciences de l'Univers
INTEGRAL : International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory
IOTA : Infrared Optical Telescope Array
IRAM : Institut de Radioastronomie Millimétrique
ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor
IVOA : International Virtual Observatory Alliance
IXO : International X-ray Observatory
JETSET : Jets Simulations, Experiments and Theory
JMMC : Jean-Marie Mariotti Centre
JWST : James Webb Space Telescope
LHC : Large Hadron Collider
LISA : Laser Interferometer Space Antenna
LMD : Licence – Master - Doctorat
LNE : Laboratoire National de métrologie et d'Essais
LOFAR : Low Frequency Array
LORENE : Langage Objet pour la RElativité Numérique
LRU : Libertés et Responsabilités des Universités
LSST : Large Synoptic Survey Telescope
MAMBO : Max-Planck Millimetre Bolometer
MASSIV : Mass Assembly Survey with SINFONI in VVDS
MATISSE : Multi-AperTure mid-Infrared SpectroScopic Experiment
MEDOC : Multi Experiment Data and Operation Centre
MHD : MagnétoHydroDynamique
MICROSCOPE : MICRO-Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence
MIS : Milieu Interstellaire
MMS : Magnetospheric MultiScale
NACO : NAOS (Nasmyth Adaptive Optics System) – CONICA (Near Infrared Imager and Spectrograph)
NASA : National Aeronautics and Space Administration
NOEMA : NOrthern Extended Millimeter Array
ONERA : Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
OPTITEC : Pôle de compétitivité Optique et Photonique
OPV : Origine des Planètes et de la Vie
OSU : Observatoire des Sciences de l'Univers
OV : Observatoire Virtuel
PAH : Polycyclic Aromatic Hydrocarbon
PCRD : Programme Cadre de Recherche et Développement
PCHE : Phénomènes Cosmiques de Haute Energie

(GdR)

PCMI : Physique Chimie du Milieu Interstellaire (PN)

PHARAO : Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite

PI : Principal Investigator

PIR : Programme Interdisciplinaire de Recherche

PIRENEA : Piège à Ions pour la Recherche et l'Etude de Nouvelles Espèces Astrochimiques

PLATO : PLANetary Transit and Oscillations of stars

PN : Programme National

PNC : Programme National Cosmologie

PNCG : Programme National Cosmologie et Galaxies

PNG : Programme National Galaxies

PNP : Programme National Planétologie

PNPS : Programme National de Physique Stellaire

PNST : Programme National Soleil-Terre

PRACE : Partnership for Advanced Computing in Europe

R&D : Recherche et Développement

RHESSI : Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager

SAURON : Spectroscopic Areal Unit for Research on Optical Nebulae

SDO : Solar Dynamics Explorer

SDSS : Sloan Digital Sky Survey

SKA : Square Kilometer Array

SNIa : SuperNovae de type Ia

SOHO : Solar and Heliospheric Observatory

SPECMO : SPECtroscopie MOleculaire

SPICA : Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics

SPIROU : SpectroPolarimètre InfraROUge

STEREO : Solar TERrestrial RELations Observatory

SUPER-

-DARN : Super Dual Auroral Radar Network

SVOM : Space-based multiband Variable Object Monitor

T2L2 : Transfert de Temps par Lien Laser

TARANIS : Tool for the Analysis of RAdiation from lightNING and Sprites

TAROT : Télescope A Action Rapide pour les Objets Transitoires

TBL : Télescope Bernard Lyot

TCFH : Télescope Canada France Hawaii

Terapix : Traitement Elémentaire, Réduction et Analyse des Pixels de MegaCam

TGE : Très Grand Equipement

THEMIS : Télescope Héliographique pour l'Etude du Magnétisme et des Instabilités Solaires (sol)

THEMIS : Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms (satellites)

TRACE : Transition Region and Coronal Explorer

UA : Unité Astronomique

UMR : Unité Mixte de Recherche

UV : UltraViolet

VAMDC : Virtual Atomic and Molecular Data Centre

VLBI : Very Long Base Interferometry

VLT(I) : Very Large Telescope (Interferometer)

VSI : VLTi Spectro-Imager

VVDS : VIMOS Very Deep Survey

XMM : X-Ray Multi-Mirror

WIRCAM : Wide-field InfraRed CAMera

WL : Weak Lensing