

Où va l'astrophysique française ?

1. L'univers lointain et les galaxies

Frédéric Pitout, Observatoire Midi-Pyrénées

Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse.

Frédéric Pitout fait le point de la recherche dans les programmes nationaux d'astrophysique. Dans ce premier article il traite des résultats obtenus, des pistes de recherche et des projets pour les années à venir dans le domaine des galaxies et de l'univers lointain.

Introduction

Tous les 4 ou 5 ans, l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU), branche du CNRS qui coordonne et structure la communauté de l'astrophysique française, fait le point sur la période écoulée et réfléchit aux orientations à prendre pour la suivante. Le dernier en date de ces exercices a été effectué entre 2013 et 2014. Le document de prospective INSU 2015 – 2020¹ issu de ces réflexions traite essentiellement de trois préoccupations : la science (les thématiques de recherche, les orientations, l'enseignement), les moyens (développements instrumentaux, bases de données) et la structuration de la discipline (affectation de moyens, recrutements).

Depuis la fin des années 90, l'astrophysique française s'articule autour de six programmes nationaux (PN) qui couvrent les grands domaines : la cosmologie, les hautes énergies, le milieu interstellaire, la physique stellaire, la planétologie et l'héliosphère. À cela s'ajoutent quelques actions spécifiques (AS). Alors que les PN sont stables et pérennes (avec quelques redéfinitions de contour à l'occasion), les AS sont plus provisoires et répondent à un besoin plus ciblé pas forcément couvert par un ou des PN.

L'objectif de cet article en deux parties est de présenter les grandes lignes du bilan et de la prospective scientifique détaillés dans le rapport en mettant l'accent, pour chaque PN, sur certains résultats, pistes de recherche et projets futurs. Dans cette première partie, on s'intéressera à l'univers

lointain, aux galaxies (dont la nôtre) et aux hautes énergies. Dans un second temps, on traitera de la physique stellaire, de la planétologie et des relations Soleil-Terre.

Programme National Cosmologie et Galaxies (PNCG)

La cosmologie, les galaxies et les grandes structures de l'Univers font l'objet des recherches du PNCG. Le programme tente de répondre par ses activités à des questions fondamentales de l'astrophysique : dans quel univers vivons-nous ? Quels processus physiques régissent les galaxies ? Cette communauté exploite les sondages du ciel profond obtenus par de grands instruments au sol (VLT, CFHT, ALMA) ou spatiaux (HST, Spitzer, Planck, Herschel).

Ces dernières années, l'observatoire spatial Planck a apporté son lot de résultats, particulièrement dans la caractérisation plus précise du fond diffus cosmologique (*Cosmic Microwave Background* ou CMB), le rayonnement fossile du *Big Bang* dans le domaine des micro-ondes. Ce rayonnement n'est pas uniforme mais présente d'infimes variations spatiales/angulaires en fonction de la direction dans laquelle on l'observe. Ces variations, qui sont prévues par le modèle cosmologique, rendent compte de la structuration de l'univers jeune pendant les instants qui ont suivi le *big bang*. La Fig montre le spectre angulaire de puissance de la température du CMB, c.-à-d. la variation typique de température pour un écart angulaire donné. On remarque que les plus grandes variations de températures se mesurent sur des échelles angulaires de l'ordre du degré.

¹ <http://www.insu.cnrs.fr/files/documentcomplet.pdf>

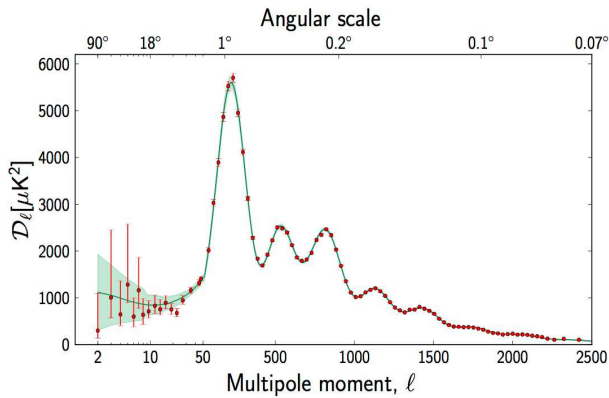


Fig.1. Spectre de puissance de la carte de température du rayonnement du fond diffus cosmologique mesuré par Planck (en rouge) avec ajustement du modèle Λ CDM (en vert (© Planck/ESA)).

On observe par ailleurs que les mesures de Planck ont permis d'obtenir un spectre jusqu'à une précision angulaire de $0,07^\circ$ et d'y détecter les sept premiers pics du spectre angulaire de puissance. Ces résultats sont en accord avec le modèle théorique en vigueur (Λ CDM pour les intimes) au niveau du pourcentage et modifient légèrement ceux des précédentes mesures. La conséquence directe est une modification des paramètres du modèle cosmologique : nombre de neutrinos limité à trois, constante de Hubble légèrement plus faible et âge de l'univers porté à 13,8 milliards d'années.

Autre sujet dans lequel les chercheurs français se sont illustrés est la physique des galaxies et plus précisément la mise en évidence de deux modes de formations d'étoiles dans les galaxies. Un mode dit séculaire principal, les galaxies ont un taux de formation stellaire quasi constant, et un mode à flambée de formation d'étoiles (*starburst*). Le gaz interstellaire, réservoir de matière pour la formation d'étoiles, joue un rôle essentiel dans la détermination du mode qui domine (figure 2) et une équipe française a montré que le taux de formation stellaire croît avec le décalage spectral (*redshift*) : plus une galaxie est jeune, plus elle dispose de gaz interstellaire pour la formation d'étoiles.

L'observation extragalactique passe par des instruments de plus en plus performants et donc des télescopes aux miroirs de plus en plus grands. En Europe, outre les quelques instruments nationaux encore en service, l'observatoire européen austral (*European Southern Observatory*, ESO) assure la coordination des moyens et l'exploitation des grands télescopes installés au Chili.

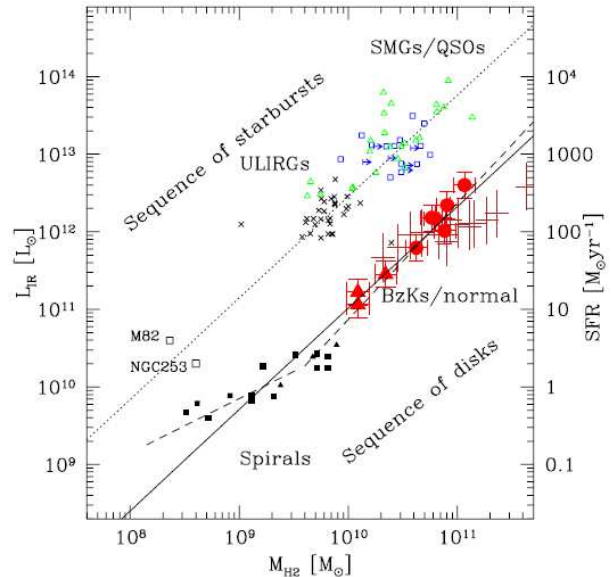


Fig.2. Diagramme montrant la luminosité infrarouge des galaxies en fonction de leur masse en H_2 . Le taux de formation d'étoiles (axe vertical à droite) et le contenu en gaz moléculaire des galaxies à divers décalages spectraux montrent comment les galaxies distantes « BzK/normal » (séquence principale) sont les versions agrandies des galaxies spirales proches, tandis que les galaxies submillimétriques « SMGs » sont les versions agrandies des galaxies locales à flambées de formation stellaire. (Daddi et al., *ApJL*, 714, 2010)

En plus des instruments déjà en fonctionnement (VLT, ALMA), le grand projet de l'ESO est le *European Extremely Large Telescope*, l'E-ELT, télescope géant de 39 m de diamètre. Dans l'espace, Le *James Webb Space Telescope* (NASA) remplacera le HST.

Programme National Hautes Énergies (PNHE)

Le PNHE, jeune PN puisqu'il a été créé en 2012, étudie les objets les plus extrêmes et les phénomènes les plus violents de l'univers. Parmi les grands défis auxquels s'attaque le PNHE citons la nature de la matière noire, l'influence des objets compacts (étoiles à neutrons, trous noirs) sur leur environnement, l'explosion d'étoiles, l'origine du rayonnement cosmique à ultra-haute énergie, l'observation de l'univers grâce aux neutrinos et aux ondes gravitationnelles. Outre les considérations théoriques et modèles numériques, les activités du PNHE s'appuient en grande partie sur des observatoires spatiaux X (Integral, XMM, Chandra) et γ (Fermi). Rappelons que les ondes électromagnétiques des domaines X et γ sont absorbées par l'atmosphère et ne peuvent donc être observées que depuis l'espace.

Les données du satellite Fermi ont permis de construire des catalogues de sources γ (figure 3) et la détection d'une cinquantaine de pulsars millisecondes dont beaucoup étaient inconnus. La comparaison avec des sources radio a mis en évidence que les émissions provenaient des magnétosphères externes des pulsars. Par ailleurs, ces détections viennent enrichir la liste de pulsars très stables nécessaires à la détection d'ondes gravitationnelles par chronométrage.

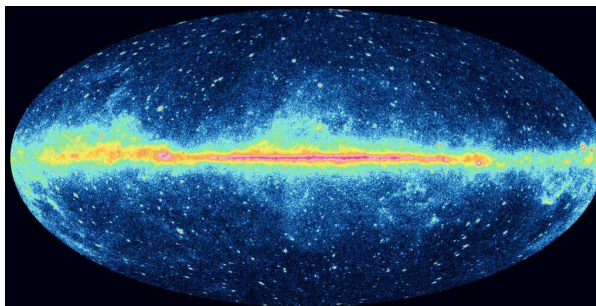


Fig.3. Carte des sources gamma supérieures à 1 GeV mesurées par le satellite Fermi. La zone rouge/jaune médiane est le disque galactique (Nolan et al., *ApJ*, 199:31, 2012).

Bien que les trous noirs piègent la lumière en leur sein par la gravité extrême (d'où leur nom), ils peuvent être observés dans le domaine X. En effet, quand la matière attirée par l'attraction gravitationnelle de ces objets accélère, elle émet des rayons X. Des observations combinées avec les télescopes spatiaux XMM, Integral (ESA) et Chandra (NASA) du trou noir super-massif Sgr A* qui se trouve au centre de notre Galaxie ont permis de caractériser ses éruptions et de déterminer qu'il était 1 million de fois plus lumineux il y a seulement une centaine d'années. Toujours concernant les trous noirs, on distingue les trous noirs d'origine stellaire (de masses inférieures à 100 masses solaires) et les trous noirs super-massifs (masses supérieures à 10^6 masses solaires). Une incertitude planait sur l'existence de trous noirs de masses intermédiaires. En étudiant la source X ultra-lumineuse HLX-1 (figure 4), une équipe toulousaine a identifié un objet qui peut prétendre à ce titre.

Le prochain grand projet de la communauté des hautes énergies est la mise en orbite de l'observatoire X Athena (ESA). Des instruments de physique plus fondamentale sont aussi à l'étude comme la détection des ondes gravitationnelles par exemple : l'installation européenne VIRGO va être remise en service (advanced VIRGO) et le projet d'interféromètre laser spatial eLISA est à l'étude (notons que depuis la publication du rapport, l'interféromètre américain LIGO a mis en évidence la déformation de l'espace-temps générée par la fusion de deux trous noirs).

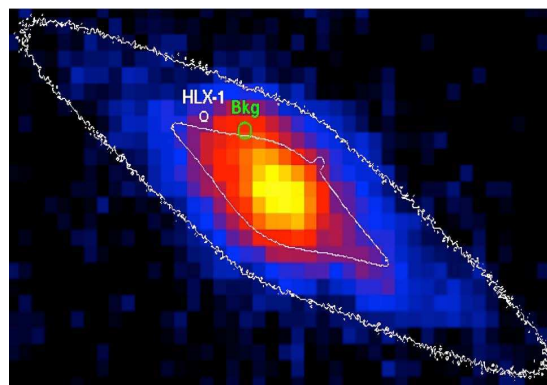


Fig.4. Galaxie hôte de HLX-1 observée dans l'UV par le télescope spatiale SWIFT (Farrell et al., *Astron. Nach.*, 332, 2010).

Physique et Chimie du Milieu Interstellaire (PCMI)

Le PCMI est un programme qui se trouve à la croisée de nombreuses thématiques scientifiques de l'astrophysique moderne. Il s'intéresse à la composition, à l'évolution et au rôle de la matière diffuse ou condensée dans les galaxies. Le milieu interstellaire (MIS) joue des rôles clés à petite échelle dans la formation des molécules complexes, briques des plus grandes structures, à moyenne échelle en constituant l'ingrédient de base de la formation stellaire et planétaire, et enfin à grande échelle dans la dynamique des galaxies. Précisément, le cycle de la matière dans les galaxies, la formation des protoétoiles et disques protoplanétaires, l'existence et le rôle de molécules organiques complexes constituent le cœur des préoccupations de cette communauté. Le milieu interstellaire étant froid, son observation se fait essentiellement dans les domaines des infrarouges (télescopes spatiaux Herschel, Spitzer et futur WFIRST) et (sub)millimétrique (réseaux d'antennes au sol IRAM et ALMA par exemple).

Le satellite Herschel a apporté de nouvelles indications sur la structuration du MIS. Ce dernier semble s'organiser en filaments dont l'épaisseur varie peu, quelle que soit la densité du filament. En confrontant les données Herschel et les données de polarisation des poussières fournies par Planck (Figure 5), les chercheurs ont apporté des éléments de réponse en considérant le rôle du champ magnétique et la diffusion ion-neutre dans la dissipation de la turbulence (notons que longtemps négligé, le rôle du champ magnétique dans la structuration du milieu interstellaire constitue un axe de recherche important et actif).

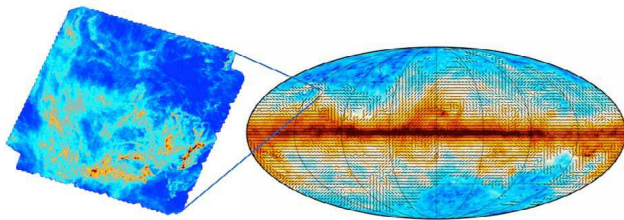


Fig.5. À gauche, la structure du MIS à 0.01 pc révélée par Herschel-SPIRE dans le nuage de gaz moléculaire Polaris Flare ; à droite, la polarisation sur tout le ciel déduite de l'émission de la poussière observée par Planck (Planck collaboration, Planck intermediate results XIX, 2014).

Les radiotélescopes du réseau ALMA donne une précision appréciable lorsqu'il s'agit de déterminer la présence de molécules complexes dans le MIS et d'en tirer les informations sur leur distribution spatiale et leur rôle de traceur des différentes régions d'une protoétoile par exemple (figure 6).

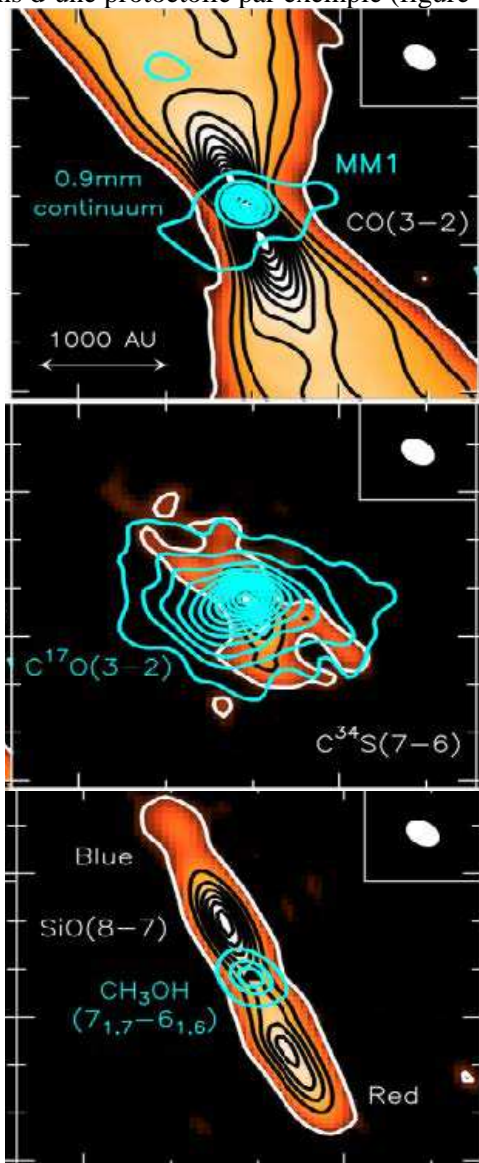


Fig.6. Protoétoile HH212 observée par ALMA où chaque molécule observée est un traceur d'une région (flot bipolaire, jet, disque d'accrétion). (Adapté de Codella et al., A&A, 2014)

Sous la houlette de l'ESO, le réseau d'antenne radio ALMA est en cours de déploiement. Sur le sol national, l'institut de radioastronomie millimétrique (IRAM) agrandit ses installations du plateau de Bure avec des radiotélescopes supplémentaires (projet NOEMA). ■

NOUVEAUTÉ



Comité de
Liaison
Enseignants et
Astronomes
www.clea-astro.eu

LES FICHES PÉDAGOGIQUES DU CLEA

L'astronomie à l'école

Cycle 3 primaire-collège

Hors-série nouvelle formule des Cahiers Clairaut n° 12



Ce livret contient un CD

ISBN 978-2-9557092-0-7

Grandir, s'ouvrir au monde et aux autres. S'adapter aux rythmes de la nature, de la vie et de la société.

S'émerveiller, être et rester curieux. Enseignants de l'école primaire et du collège, médiateurs scientifiques et parents accompagnent les enfants dans leur découverte du monde et l'exercice de leur raisonnement : partir en classe alors que le jour est levé... ou pas, observer la Lune qui joue à cache-cache... de jour comme de nuit, vivre la succession des saisons, jouer avec les ombres et la lumière, déjouer les apparences trompeuses...

Les cycles célestes constituent de belles opportunités pour prendre conscience du monde qui bouge autour de nous, et pour commencer à le comprendre.

Dans le livret : Notions de base ; (ombre, Terre, points cardinaux, constellations) ; Jour, nuit, mouvement apparent du Soleil ; Les saisons ; Le système solaire ; Le temps ; Littérature ; Glossaire.

Dans le CD : Des compléments pour l'enseignant ; Des données, des films ; Sitographie ; Liste de logiciels ; Liste d'articles des Cahiers Clairaut.