

#68
AVRIL 2019

cea

clefs

LES VOIX
DE LA RECHERCHE



DERNIÈRES NOUVELLES

DU COSMOS

CONTEXTE – TECHNOLOGIES – DOMAINES D'APPLICATION – PERSPECTIVES

•

PAR

ROLAND LEHOUcq

(Direction de la recherche fondamentale)



Roland Lehoucq est astrophysicien au Département d'astrophysique (DAP-AIM) du CEA et enseignant à l'École polytechnique.

© Laurence Honnorat / Utopiales 2014

DÉFINITION

Qu'est-ce que l'Univers ?

L'Univers est, par définition, l'ensemble de tout ce qui existe. Mais tous les événements, tous les astres ne nous sont pas accessibles et les astrophysiciens définissent concrètement l'Univers comme l'ensemble des choses qu'ils peuvent observer grâce à leurs instruments. Cet « univers observable » est forcément fini pour deux raisons. D'abord, l'essentiel de l'information recueillie sur Terre nous parvient sous forme de lumière de toutes longueurs d'onde. Nous collectons aussi quelques particules et, depuis septembre 2015, des ondes gravitationnelles. Lumière et ondes gravitationnelles se propagent à la vitesse de la lumière, finie et à peu près égale à 300 000 kilomètres par seconde. Ensuite, on sait depuis le début du XX^e siècle que les objets peuplant l'Univers, notamment les étoiles, n'ont pas toujours existé. Nous ne pouvons donc observer que des objets suffisamment proches pour que leur lumière ait eu le temps de nous parvenir depuis leur formation. Autrement dit, la finitude de la vitesse de la lumière et l'âge fini des étoiles et des galaxies se conjuguent de sorte que seule une partie de l'Univers nous est accessible directement. Nos observations sont donc limitées par un horizon dont le volume intérieur définit justement l'univers observable dont parlent les astrophysiciens. Selon le modèle cosmologique actuel, cet horizon serait aujourd'hui éloigné de 45 milliards d'années-lumière et l'univers serait âgé de 13,8 milliards d'années. Comme l'horizon maritime, l'horizon cosmologique dépend de la position spatiale de l'observateur. Il dépend aussi du temps car, à chaque seconde, arrivent des informations venant d'un peu plus loin, issues d'objets tout juste entrant dans notre horizon.

Autre conséquence de la finitude de la vitesse de la lumière, un objet de l'univers observable n'apparaît donc pas comme il est au moment de son observation, mais comme il était au moment où la lumière qui nous parvient a été émise : une galaxie, par exemple, apparaît ainsi d'autant plus jeune qu'elle est plus

éloignée. Les rayons lumineux que nous recevons tissent notre cône de lumière du passé, ensemble des événements reliés à notre position spatio-temporelle - ici et maintenant - par un messager lumineux. Nous n'observons donc qu'une section (notre cône de lumière du passé) d'un volume fini de l'Univers (l'univers observable). Et encore, une partie des objets observables échappent à nos détecteurs en raison de leur faible luminosité due à leur distance spatio-temporelle considérable. Finalement, nous n'avons accès qu'à une quantité finie d'informations, perçue depuis « ici et maintenant », à partir de laquelle nous avons l'ambition de reconstruire le contenu, l'histoire et la structure de tout l'Univers. Ces obstacles posent la question de l'unicité de cette reconstruction à partir des informations partielles disponibles et donnent la mesure de la difficulté de la tâche entreprise par l'astrophysique.

Curieusement, à l'échelle des durées cosmologiques, notre situation apparaît plus favorable. Actuellement, la description la plus cohérente et la plus robuste de l'Univers est le modèle dit « de concordance » qui le décrit comme un espace homogène, isotrope, infini, de géométrie euclidienne et en expansion accélérée. Si ce modèle est correct, il existe une frontière au-delà de laquelle se produisent des événements qui nous resteront à jamais invisibles, un horizon des événements bornant notre perception future de l'Univers. Dans ce cadre, notre ciel se videra de ses galaxies au fil des milliards d'années, au fur et à mesure qu'entraînées par une expansion de plus en plus rapide, elles franchiront notre horizon des événements. Dans un futur très lointain, la cosmologie, discipline déjà difficile, risque bien de devenir impossible faute d'objets à observer. Le modèle d'Univers le plus raisonnable sera sans doute celui d'un univers-île réduit à notre galaxie - qui aura fusionnée avec celle d'Andromède, modèle qui prévalait encore au tout début du XX^e siècle quand a débuté la cosmologie scientifique ! ■



« Actuellement, la description la plus cohérente et la plus robuste de l'Univers est le modèle dit « de concordance » qui le décrit comme un espace homogène, isotrope, infini, de géométrie euclidienne et en expansion accélérée. »

DANS CE NUMÉRO

DERNIÈRES NOUVELLES DU COSMOS



12

FORMATION DES ÉTOILES ET MILIEU INTERSTELLAIRE

- L'ÉCOSYSTÈME INTERSTELLAIRE 21
- LE LONG DES FILAMENTS INTERSTELLAIRES 23
- AU CŒUR DES DISQUES PROTOPLANÉTAIRES 25



28

PHÉNOMÈNES DE HAUTE ÉNERGIE

- SUPERNOVÆ : COMPRENDRE L'EXPLOSION DES ÉTOILES MASSIVES 38
- EXPLOSIONS EXTRÊMES 40
- VESTIGES DE SUPERNOVÆ ET RAYONNEMENT COSMIQUE : LE CIEL GAMMA NOUS ÉCLAIRE 42
- ÉJECTIONS RELATIVISTES DANS LES MICROQUASARS 43

45

PERSPECTIVES

DYNAMIQUE DES ÉTOILES ET DES EXOPLANÈTES

- LA DYNAMIQUE SOLAIRE ET STELLAIRE 13
- LES EXOPLANÈTES 16
- LES INTERACTIONS ÉTOILE-PLANÈTE 18



20

COSMOLOGIE ET ÉVOLUTION DES GALAXIES

- LES IMPLICATIONS COSMOLOGIQUES DES GRANDS SONDAGES DE GALAXIES 29
- L'ORIGINE DE L'ACCÉLÉRATION COSMIQUE : NOUVELLE ÉNERGIE OU NOUVELLE PHYSIQUE ? 30
- LES AMAS DE GALAXIES, LABORATOIRES POUR LA PHYSIQUE 32
- GRANDS SONDAGES D'AMAS DE GALAXIES ET COSMOLOGIE 33
- OBSERVER LA FORMATION ET L'ÉVOLUTION DE LA PREMIÈRE GÉNÉRATION D'AMAS DE GALAXIES 34
- L'ÉNIGME DE LA FORMATION DES GALAXIES MASSIVES 36



37

L'Univers a plus d'imagination que les hommes

par Catherine Cesarsky,
astrophysicienne et membre de l'Académie des sciences



© ESO

« La progression des découvertes en astrophysique exige une programmation rigoureuse, pas seulement à l'échelle d'un laboratoire ou d'un pays, mais à celle d'un continent voire du monde entier. »

Les grandes découvertes de l'astronomie au XX^e siècle ont souvent été faites par hasard : le fond du ciel cosmologique, vestige et témoin du Big Bang ; les quasars, astres extrêmement brillants tirant leurs intenses luminosités de l'énergie cinétique acquise par la matière entraînée vers un trou noir gigantesque ; les pulsars, étoiles à neutrons magnétisées et en rotation émettant des signaux périodiques ; les systèmes d'étoiles évoluées émettant de forts flux de rayons X ; les sources de sursauts gamma... Aujourd'hui, les découvertes sont programmées. On se donne les moyens, avec des spectromètres ou des photomètres extrêmement précis, de déceler la présence de planètes en orbite autour d'étoiles et on prépare des missions spatiales dédiées pour tenter de caractériser leurs atmosphères. On construit des missions spatiales emportant des télescopes refroidis au foyer desquels des détecteurs maintenus à des températures proches du zéro absolu détectent les moindres détails des émissions émanant de l'Univers froid ou du fond cosmologique. De l'espace, mais aussi du sol aux plus hautes énergies, on traque et on examine les sources de rayons X et gamma. Pour mieux comprendre le fonctionnement du Soleil, on s'en rapproche de plus en plus. On développe des systèmes capables de percevoir le passage d'ondes gravitationnelles au sol ou dans l'espace. Une fois que les nouveaux instruments, à la pointe de la technologie, sont déployés et utilisés, on obtient le plus souvent les résultats escomptés, mais, l'Univers ayant toujours plus d'imagination que les hommes, les surprises sont nombreuses : ainsi les trous noirs stellaires en coalescence perçus par les interféromètres LIGO et VIRGO sont plus massifs que ce qui était attendu ou encore on découvre l'existence, non prévue, de galaxies très massives très tôt dans la vie de l'Univers... On sait ce qu'on cherche, on fait même à l'avance des modèles numériques très détaillés de ce qu'on pense trouver et in fine la nature décide.

La progression des découvertes en astrophysique exige une programmation rigoureuse, pas seulement à l'échelle d'un laboratoire ou d'un pays, mais à celle d'un continent voire du monde entier. La programmation du Département d'astrophysique (DAp) du CEA s'inscrit dans cette planification mondiale. Les recherches fructueuses du DAp tout au long de son histoire s'appuient en grande partie sur des réalisations, en partenariat avec le CNES, qui ont été décidées et mises en œuvre au sein de l'Agence spatiale européenne (ESA), dans ses programmes successifs Horizon 2000 et Horizon 2000+. Dans les années à venir, seront mises sur orbite les missions du programme suivant, Cosmic Vision. En 2004, la communauté a formulé une série de questions essentielles à élucider et le programme s'est bâti depuis lors pour y répondre. Si le DAp est tributaire des choix de l'ESA, il est aussi très actif d'abord en tant que force de proposition, puis en ayant des chercheurs impliqués dans les sélections, au sein ou à la tête de comités de l'ESA. La préparation du programme futur de l'ESA, Voyage 2050, qui couvrira la période 2035-2050, vient d'être annoncée.

Les programmes des agences spatiales, en général, sont complémentaires. Ainsi, pour tenter de percer le mystère des composantes dominantes de l'Univers, la matière noire et l'énergie noire, l'ESA prépare la mission Euclid, tandis qu'un télescope international, LSST, est en construction au Chili sous la houlette américaine et que la NASA étudie la mission WFirst.

Au sol, l'Europe est en pole position dans l'optique et l'infrarouge proche grâce à l'Observatoire européen austral (ESO) et le DAp, qui participe à la construction d'instruments, en est un fréquent utilisateur. L'ère des observatoires mondiaux est ouverte avec, aux très hautes énergies, Pierre Auger pour les rayons cosmiques et le futur CTA pour les rayons gamma, et en radioastronomie le réseau submillimétrique ALMA et les futurs radiotélescopes géants SKA. ■



© Nasa

•
PAR
ANNE DECOURCHELLE

(Direction de la recherche fondamentale)



Anne Decourchelle est directrice de l'UMR AIM et chef du Département d'astrophysique du CEA (Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers).

L'astrophysique, une quête technologique exigeante

L'astrophysique au CEA s'est développée dès les années 1960 dans une période de construction du spatial au niveau national, européen et international. La NASA est créée en 1958, le Centre national d'études spatiales (CNES) en 1961 et le conseil européen de recherches spatiales en 1965, préfigurant la création de l'Agence spatiale européenne (ESA) en 1975. C'est également en 1962 qu'est créé l'Observatoire européen austral (ESO), dont l'objectif est de fournir à l'Europe de grands télescopes astronomiques terrestres. La France est l'un des cinq pays fondateurs de l'ESO.

Dans ce contexte, le CEA s'ouvre aux applications vers le spatial. Dans son rapport annuel de 1961, figurent « les applications de l'électronique nucléaire à l'étude des rayonnements en océanographie, dans l'atmosphère, dans la stratosphère et en astrophysique ».

L'expertise spécifique aux missions régaliennes du CEA, basée sur une instrumentation résistante aux rayonnements (électronique, détecteurs d'électrons, de photons X et gamma), a permis d'ouvrir un pan de l'astronomie des hautes énergies au CEA, dans une période riche de découvertes. C'est en 1962 que Riccardo Giacconi (États-Unis) découvre la première source en rayons X extrasolaire, Scorpius X-1. Ce système binaire constitué d'une étoile à neutrons accrétant la matière de son étoile compagnon est une puissante source d'émission X. Cette découverte a ouvert le champ de l'astronomie des rayons X (plus de 500 000 sources actuellement) et a valu à Riccardo Giacconi, 40 ans plus tard, le prix Nobel de physique (2002). C'est dans ce cadre que furent obtenues au CEA, en partenariat avec le CNES, les premières mesures à bord de fusées et de ballons, d'électrons et de protons du rayonnement cosmique (1963, 1964) et,

en 1965, de photons X et gamma de sources astrophysiques. L'année 1965 marque ainsi la naissance de l'astrophysique au CEA, dont les 50 ans ont été célébrés à la Cité des sciences à Paris en 2015.

En support aux observations, la modélisation et la théorie de ces sources haute énergie se sont développées au CEA : accrétion sur les trous noirs ou étoiles à neutrons dans les systèmes binaires, accélération de particules dans les ondes de choc de restes de supernovæ, enrichissement du gaz intergalactique dans les amas de galaxies. En parallèle, les progrès technologiques et le développement de détecteurs infrarouges et submillimétriques au Leti ont ouvert la voie, dès les années 1990, à l'exploration et à l'étude de l'Univers froid : de la poussière interstellaire à la formation d'étoiles et l'évolution des galaxies.

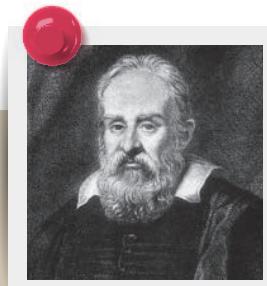
L'observation de l'Univers est, par essence, un défi. Les découvertes scientifiques reposent en grande partie sur des avancées technologiques qui permettent de transformer notre vision du monde. De la lunette de Galilée en 1609 aux instruments situés dans des conditions extrêmes à 5000 m. d'altitude au Chili ou dans l'espace sur satellite, il s'agit d'une quête exigeante pour dépasser les limites de performances des instruments existants.

Les données astronomiques sont obtenues par des dispositifs de détection variés, que ce soit en longueurs d'onde du spectre électromagnétique ou d'autres messagers, en types de mesures (imagerie, spectroscopie, polarisation...) ou en méthodologie (balayage du ciel, observations pointées...). Le traitement du signal est l'un des outils majeurs pour extraire de ces observations, les quantités physiques essentielles à leurs caractérisations.

L'Univers qui s'offre à nos yeux et à ceux de nos détecteurs et télescopes, est souvent riche en complexité, structuration spatiale multi-échelles, multi processus physiques, échelles de temps très variées, souvent non linéaires avec des couplages entre ces différentes échelles, de la formation des planètes à celle des étoiles, du trou noir central à l'évolution des galaxies hôtes. Il nécessite pour le comprendre des modélisations numériques ambitieuses.

La compréhension de l'Univers, de sa formation, de son évolution, de sa composition et de ses lois physiques, implique de confronter la théorie aux observations, la caractérisation des propriétés observées de l'Univers à leur modélisation numérique. Ce couplage étroit entre instrumentation, observations multi-longueurs d'onde et multi-messagers et modélisation constitue l'ADN de l'astrophysique menée à l'Irfu et au sein de l'unité mixte de recherche AIM (Astrophysique, Instrumentation, Modélisation). Il s'appuie sur :

- une R&D ciblée sur les détecteurs bénéficiant des domaines d'expertise du CEA;
- une capacité de réalisation et de maîtrise d'œuvre d'instruments ou de sous-systèmes;
- une grande expertise dans l'observation astronomique et l'analyse de données de haut niveau;
- le développement d'outils statistiques innovants, couplant mathématiques appliquées et astrophysique;
- le développement de simulations numériques et de modélisation ab-initio;
- des acteurs et partenaires impliqués et une forte dynamique d'échange entre les différentes expertises.



Galilée (en italien : Galileo Galilei)

Galilée, né à Pise en 1564 et mort à Arcetri, près de Florence, le 8 janvier 1642, est un mathématicien, géomètre, physicien et astronome italien du XVII^e siècle.

« L'observation de l'Univers est, par essence, un défi. Les découvertes scientifiques reposent en grande partie sur des avancées technologiques qui permettent de transformer notre vision du monde. »

L'observatoire à rayons X de l'ESA XMM-Newton est le plus grand observatoire spatial jamais construit en Europe.



© ESA - C. Carreau

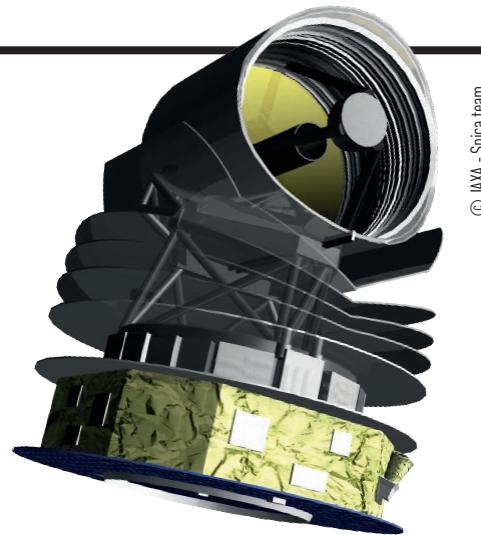
Les enjeux technologiques de la détection

Notre connaissance de l'Univers froid a beaucoup progressé grâce à un ensemble complémentaire d'observatoires spatiaux lancés entre 1989 et 2009, couvrant le rayonnement infrarouge jusqu'au millimètre de longueur d'onde (CoBE, ISO, Spitzer, Planck et Herschel). Ils ont permis de préciser où et comment naissent les étoiles, les modèles d'évolution de la matière interstellaire au cours des cinq derniers milliards d'années, et d'établir les conditions qui prévalaient dans la prime jeunesse de l'Univers.

→ LA CRYOGÉNIE

Tous ces observatoires ont en commun d'être basés sur des instruments cryogéniques avec des détecteurs refroidis, parfois à une fraction de degré au-dessus du zéro absolu. L'enjeu est de gagner en sensibilité en utilisant des détecteurs refroidis aux températures les plus basses pour mesurer une infime variation de signal. Le Département des systèmes basses températures (DSBT) du CEA travaille depuis de nombreuses années à développer notamment des systèmes adsorption et désaimantation adiabatique sur la gamme de 10 mK (-273.14°C) à 4 K adaptés aux contraintes de l'environnement spatial. Il a fourni la cryogénie sub-kelvin pour l'observatoire spatial Herschel au point de Lagrange L2, à 1,5 millions de km de la Terre ainsi que celle des instruments au pôle sud (BICEP), au Chili (APEX/ArTéMiS) et à Hawaï (Keck, MegaCam).

Un enjeu pour les futures missions spatiales est la suppression des réservoirs de liquide cryogénique au profit de cryo-réfrigérateurs mécaniques. Cette rupture technologique permet un gain de place, de masse et, surtout, accroît considérablement la durée de vie des missions. Pour des températures extrêmement froides, plusieurs systèmes doivent être associés en cascade (chaîne cryogénique) pour couvrir l'intégralité de la gamme de température. Cette tendance motive des développements sur tous les éléments de la chaîne. Cette approche s'applique aux besoins sur sites isolés - télescopes sols par exemple - pour lesquels la disponibilité de fluides cryogéniques comme l'azote liquide et, à fortiori, l'hélium liquide est difficile et/ou extrêmement coûteuse.



© JAXA - Spica team

Les objectifs ambitieux affichés pour les futures grandes missions spatiales astrophysiques (ATHENA, SPICA ou LiteBIRD) nécessitent le refroidissement de détecteurs à 50 mK ou 100 mK. Fort de son héritage, le DSBT a développé et qualifié à un haut niveau de maturité (TRL 6) un concept innovant associant un étage de refroidissement par évaporation et une petite désaimantation adiabatique miniature (Fig. 1). Cette combinaison permet d'atteindre des températures de l'ordre de 20 mK avec un système compact et léger (≈ 5 kg). D'autres solutions basées sur une succession d'étages magnétiques permettent de couvrir une gamme de température plus étendue avec un rendement élevé. Des travaux sont en cours pour maximiser la puissance de refroidissement de chacun des étages. Un prototype a démontré un refroidissement à 50 mK depuis une interface à 4 K et un démonstrateur fournissant continûment de la puissance frigorifique à 100 mK est en cours de développement. ■



•
PAR
LIONEL DUBAND

(Direction de la recherche fondamentale)



Lionel Duband est chef du département des systèmes basses températures (Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble) du CEA.



Jean-Marc Duval est responsable du Laboratoire cryoréfrigérateurs et cryogénie Spatiale (Irig/DSBT) du CEA.

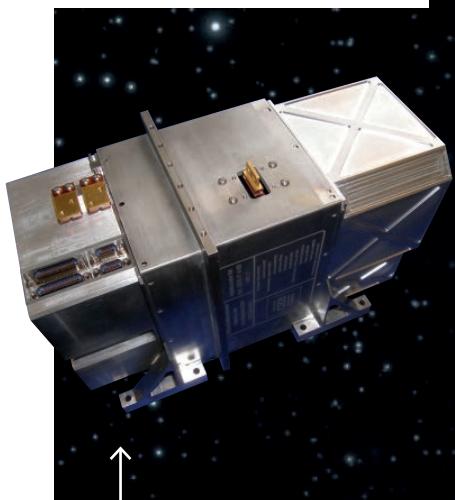


Fig. 1 : modèle d'ingénierie du cryocooler développé pour la mission SPICA.

•
PAR
**LOUIS RODRIGUEZ ET
LAURENT DUSSOPT**

(Direction de la recherche fondamentale,
Direction de la recherche technologique)



Louis Rodriguez est physicien instrumentaliste au Département d'astrophysique (DAp-AIM) du CEA.



Laurent Dussopt est physicien instrumentaliste au CEA-Leti.

→ LES DÉTECTEURS CRYOGÉNIQUES

Ces détecteurs cryogéniques, ultrasensibles à la température, ont été brevetés et mis au point par le CEA pour l'observatoire spatial Herschel (2009-2013) de l'ESA. Le CEA a ainsi développé les premières matrices de bolomètres submillimétriques tout silicium (Irfu/DAp et Leti), fonctionnant à une température de 300 mK pour équiper l'instrument PACS, qui a été le plus utilisé d'Herschel. Ces mêmes détecteurs ont, par la suite, été utilisés pour le photomètre du ballon PILOT du CNES et pour la caméra submillimétrique Artémis sur le télescope APEX (Chili).

Aujourd'hui, une nouvelle frontière observationnelle s'ouvre avec la possibilité de mesurer, à très haute sensibilité, la polarisation de la lumière térahertz et millimétrique. Elle donnera en particulier accès aux traces des ondes gravitationnelles primordiales imprimées dans le fond cosmologique micro-onde et au champ magnétique à l'œuvre dans les sites de formation d'étoiles. À cette fin, nous avons conçu et breveté de nouveaux détecteurs sensibles à la lumière polarisée et travaillant à 50 mK pour obtenir une haute sensibilité. Ces détecteurs, fabriqués sur la plateforme Silicium du Leti, sont réalisés directement sur un circuit intégré cryogénique conçu par le

Laboratoire de microélectronique du Département d'électronique des détecteurs et d'informatique pour la physique (DEDIP) du CEA, qui assure leur fonction de lecture dans un schéma above-IC (Integrated Circuit). Ces nouveaux détecteurs sont actuellement en développement pour l'instrument B-BOP (dont le CEA est responsable). B-BOP est l'un des trois instruments de l'observatoire spatial SPICA, candidat à la mission M5 de l'ESA, en collaboration avec l'agence spatiale japonaise, pour un lancement en 2032.

Cette démarche d'intégration de fonctions instrumentales au sein du détecteur ouvre la voie à de nouvelles fonctionnalités et de meilleures performances. La spectroscopie, par exemple, pourrait bénéficier de cette approche grâce à l'intégration d'un dispositif spectroscopique au plus près de ces détecteurs à très haute sensibilité. Plus récemment, nous avons imaginé d'introduire la production électronique de froid dans le dispositif de détection grâce à une technologie similaire à l'effet Peltier qui permettrait de refroidir uniquement les quelques microgrammes de senseurs réellement nécessaires à l'observation de l'Univers. Ces développements ont été considérablement aidés par le Labex FOCUS et le CNES. ■

→ LES DÉTECTEURS CdTe

Àl'autre extrémité du spectre électromagnétique, le CEA développe des capteurs de rayons X durs (du keV au MeV) à base de semi-conducteurs CdTe (tellurure de cadmium) non refroidis et associés à des circuits intégrés spécifiques (ASIC). Ces petits cristaux lourds et denses permettent de stopper et mesurer l'énergie de chaque photon X individuellement. La distribution spectrale et temporelle de la lumière émise dans cette gamme d'énergie par les disques d'accrétion qui entourent les trous noirs ou les étoiles à neutrons, par les sursauts gamma ou encore lors des explosions de supernovæ, révèlent les mécanismes physiques à l'œuvre dans ces objets célestes de l'Univers violent.

Largement mise à l'épreuve dans l'espace sur l'instrument ISGRI à bord de la mission Integral de l'ESA depuis 2002, la technologie CdTe/ASIC fait toujours l'objet de recherches au CEA pour l'astrophysique spatiale, dans le but d'en tirer les meilleures performances. Au cours des 15 dernières années, grâce à la maîtrise des circuits microélectroniques de

lecture ultra bas-bruit et résistants aux radiations développés au DEDIP et à l'optimisation de leur intégration dans des modules 3D avec des cristaux finement pixélisés, des records ont été atteints avec la technologie Caliste développée avec le concours de la société 3D PLUS et le soutien du CNES. Ces petits composants à basse consommation et pas plus grands qu'un sucre offrent une modularité exceptionnelle pour concevoir des spectro-imageurs de grande dynamique spectrale, à haute résolution spatiale, spectrale et temporelle. La technologie est déployée dans l'instrument STIX à bord de Solar Orbiter, qui sera en février 2020, la première mission de classe moyenne du programme Cosmic Vision de l'ESA à rejoindre l'espace. STIX observera les éruptions solaires lorsque le satellite sera au plus près de notre étoile, soit à environ 43 millions de km. Il en fournira des spectro-images entre 4 et 150 keV de façon automatique. Il permettra notamment, en combinaison avec les 9 autres instruments de la charge utile, d'élucider les sources et les mécanismes d'accélération des électrons dans les éruptions. ■

•
PAR
OLIVIER LIMOUSIN

(Direction de la recherche fondamentale,
Direction financière et des programmes)



Olivier Limousin est physicien instrumentaliste au Département d'astrophysique (DAp-AIM) et directeur du Programme transversal de compétences «Instrumentation et Détection» du CEA.



© getty Images

Première NectarCAM en cours de montage à l'Irfu (CEA Paris-Saclay).

→ LES DÉTECTEURS TCHERENKOV

Les flux de photons en provenance de sources gamma de très haute énergie (supérieure à 50 GeV) sont très faibles, moins d'une particule par km² par seconde. Détecter ces photons et identifier leurs sources nécessitent de grandes surfaces de détection obtenues en utilisant des réseaux de télescopes au sol. Les photons de très haute énergie eux-mêmes n'atteignent pas le sol: ils interagissent dans l'atmosphère et créent des gerbes de particules. Les télescopes Tcherenkov atmosphériques imageurs captent le rayonnement Tcherenkov des particules chargées relativistes de ces gerbes, qui parvient au sol sous la forme de quelques dizaines de photons optiques par m². Le flash lumineux correspondant ne dure que quelques dizaines de nanosecondes.

Les télescopes Tcherenkov sont équipés en leur foyer de caméras de quelques milliers de photomultiplicateurs, qui permettent de détecter les photons individuellement. Le CEA est engagé dans la conception, l'assemblage et les tests de caméras - les NectarCAM - destinées à l'observatoire de très hautes énergies CTA, en partenariat avec le CNRS et des laboratoires espagnols et allemands. Celles-ci ont des dimensions

imposantes: 3m x 3m x 1,5m pour un poids de 2 tonnes. Elles sont équipées de 1 800 photomultiplicateurs (pixels) qui permettent d'obtenir un champ de vue de 8 degrés pour cartographier des sources étendues telles que les restes de supernovæ. Les NectarCAM peuvent lire 10 000 séquences d'images par seconde, chaque séquence durant 60 ns. Le courant de chaque pixel est lu en continu dans une mémoire circulaire, la puce Nectar, conçue au DEDIP. Le signal de groupes de 37 pixels voisins est évalué en parallèle par un système de déclenchement, qui teste l'arrivée simultanée de photons dans le plan focal de la caméra. Le bruit dû à la présence de photons ambients comme la lumière zodiacale ou les étoiles, qui n'apparaissent que dans un pixel unique est ainsi éliminé. Quand un signal est détecté par le système de déclenchement, les données sont numérisées par la puce Nectar et transférées sur disque par Ethernet. L'analyse combinée de la forme des images obtenues sur plusieurs télescopes Tcherenkov pour un même événement permet de reconstruire la cinématique des photons et de bâtir des cartes astronomiques, après avoir éliminé les gerbes atmosphériques produites par des hadrons. ■



« Les télescopes Tcherenkov sont équipés en leur foyer de caméras de quelques milliers de photomultiplicateurs, qui permettent de détecter les photons individuellement. »

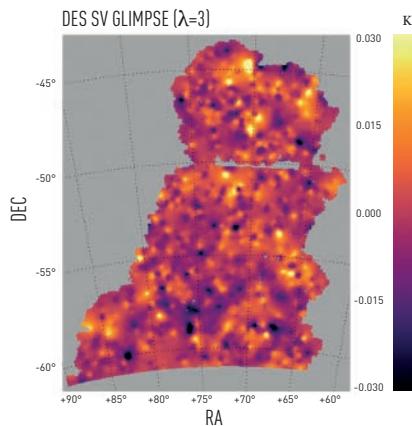
•
PAR
JEAN-FRANÇOIS GLICENSTEIN

(Direction de la recherche fondamentale)



Jean-François Glicenstein
est chercheur au Département de physique des particules (Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers) du CEA.

Fig. 1: image reconstruite par la méthode GLIMPSE développée à CosmoStat montrant la distribution de matière noire dans l'Univers à partir des données du projet DES (Dark Energy Survey). Le rapport signal-sur-bruit des pics de densité a été amélioré d'un facteur 9 par rapport aux méthodes classiques.



© Reider Hahn, Fermilab

Le développement d'outils statistiques innovants couplant mathématiques appliquées et astrophysique

•

PAR

JEAN-LUC STARCK

(Direction de la recherche fondamentale)



Jean-Luc Starck est chef du Laboratoire CosmoStat (DAP-AIM) du CEA.

Les progrès technologiques liés aux nouveaux instruments représentent également un défi pour l'exploitation scientifique des données. Le projet DES (Dark Energy Survey) génère 2,5 teraoctets (To) de données par nuit d'observation. Les données archives du futur télescope spatial Euclid contiendront 150 petaoctets (Po) de données et le projet SKA (Square Kilometre Array) en générera 2 To par seconde, avec 1 Po par jour archive ! Tout l'enjeu est d'analyser ces jeux de données avec des algorithmes capables de mettre en évidence des signaux à très faible rapport sur bruit et intégrant les méthodologies les plus avancées. Disposer de tels algorithmes est un véritable défi pour les équipes scientifiques dans les années à venir : leur capacité à y parvenir conditionne le retour scientifique de leur engagement dans les grandes missions internationales. Pour répondre à ces nouveaux enjeux, en particulier dans le cadre du projet Euclid, un laboratoire interdisciplinaire nommé CosmoStat [1] a été créé au DAP en commun avec le DEDIP. Son objectif : promouvoir de nouvelles méthodologies, développer de nouveaux algorithmes, diffuser les codes, les utiliser pour l'exploitation scientifique des

données et former de jeunes chercheurs à l'interface entre plusieurs disciplines (cosmologie, mathématiques appliquées, statistiques). Les nombreuses méthodes développées à CosmoStat concernent la restauration et la reconstruction d'images ou de cubes, la séparation de composantes ou encore la mesure des formes de galaxies (Fig.1). Ces méthodes sont basées sur des outils mathématiques très variés comme les techniques d'apprentissage, les outils statistiques, le transport optimal ou des concepts provenant de l'analyse harmonique et permettent de manipuler des données complexes comme des données hyper-spectrales, polarisées et/ou reposant dans des espaces non-euclidiens, c'est-à-dire des espaces géométriques comme la surface de la Terre. Les codes informatiques développés sont non seulement largement utilisés par les autres équipes du DAP mais aussi par d'autres unités du CEA comme la Direction de la recherche technologique pour la spectroscopie de masse et surtout NeuroSpin pour la reconstruction des images IRM cérébrales avec potentiellement un très fort impact pour la médecine néonatale où l'acquisition et l'analyse de données des prématurés est très difficile. ■

[1] CosmoStat :
<http://cosmic.cosmostat.org>

Rôle et défis des simulations numériques

Les simulations numériques jouent plusieurs rôles de premier plan dans les programmes de recherche en astrophysique. Elles permettent d'une part d'explorer les systèmes d'équations couplées régissant l'évolution des objets astrophysiques et sont, à ce titre, un outil indispensable pour l'interprétation des observations et leur confrontation aux modèles théoriques. D'autre part, elles servent à prévoir les observables correspondant aux objets étudiés, dans divers domaines de longueur d'onde : ceci confère aux simulations un rôle de plus en plus important dans la préparation des observations, l'obtention de temps de télescope et la conception des futurs instruments au sol et missions spatiales.

Les équipes de l'Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu) du CEA sont fortement impliquées dans les projets de simulations numériques, allant de la cosmologie et des grandes structures de l'Univers à la physique des étoiles et des planètes. Plusieurs codes numériques de simulation sont développés, optimisés et maintenus sur les moyens de calculs locaux. De grandes campagnes de simulation sont réalisées sur les supercalculateurs nationaux de GENCI (Grand équipement national de calcul intensif) et européens de PRACE (Partnership for Advanced Computing in Europe), dont le

supercalculateur Joliot-Curie, installé au TGCC (Très Grand Centre de calcul du CEA), fait partie et est intensivement utilisé par les astrophysiciens.

Le défi actuel pour les simulations numériques est leur adaptation à des moyens de calcul en évolution rapide. La prochaine décennie verra l'avènement de l'exascale, soit des supercalculateurs capables d'effectuer 1 milliard de milliard d'opérations par seconde. Cela offrira la possibilité de réaliser des simulations astrophysiques de précision croissante et incluant une gamme de processus physiques toujours plus complète. Toutefois ces nouveaux calculateurs ne reposent pas sur des processeurs informatiques classiques : la vitesse de calcul de ces derniers ne peut guère croître du fait de limites technologiques liées à la finesse de gravure des circuits imprimés et le nombre de processeurs inclus dans un supercalculateur (déjà de plusieurs centaines de milliers) est limité par leur consommation énergétique. Les prochaines générations de supercalculateurs reposent donc sur des nouvelles technologies telles que le calcul vectoriel et les accélérateurs graphiques. Les équipes du CEA préparent ce futur en adaptant dès aujourd'hui les codes de calcul à ces nouvelles architectures, en lien avec des spécialistes de l'algorithmique et des techniques de programmation. ■

•
PAR
FRÉDÉRIC BOURNAUD
ET PATRICK HENNEBELLE

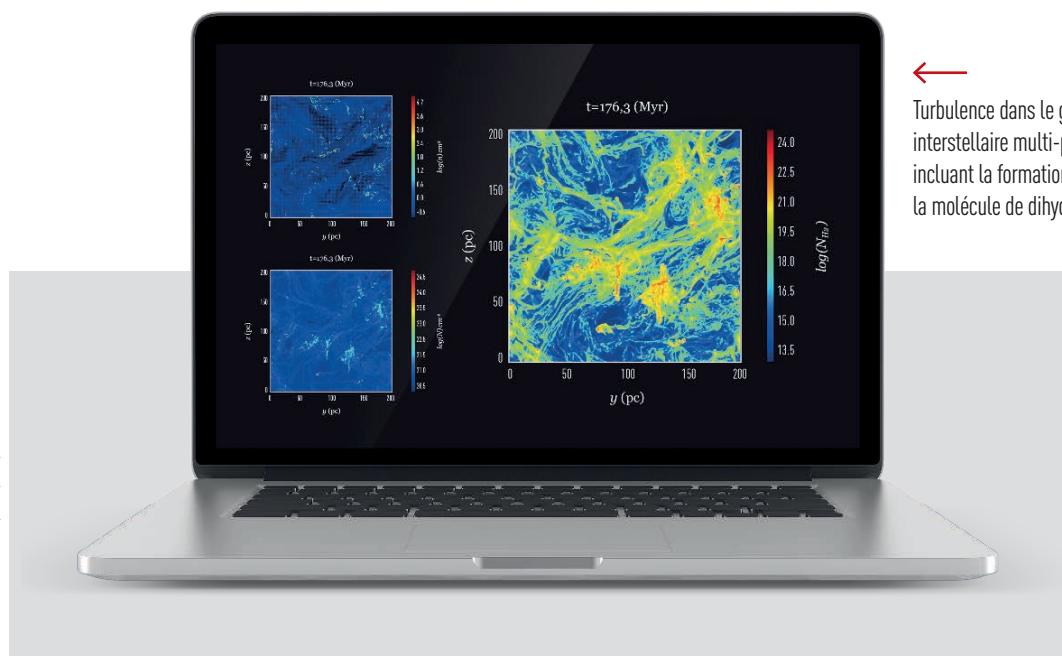
(Direction de la recherche fondamentale)



Frédéric Bournaud est astrophysicien et chef du Laboratoire cosmologie et évolution des galaxies (DAp-AIM) du CEA.



Patrick Hennebelle est astrophysicien au Département d'astrophysique (DAp-AIM) du CEA.



←
Turbulence dans le gaz interstellaire multi-phases incluant la formation de la molécule de dihydrogène.



« La prochaine décennie verra l'avènement de l'exascale, soit des supercalculateurs capables d'effectuer 1 milliard de milliard d'opérations par seconde. »

DYNAMIQUE DES ÉTOILES ET DES EXOPLANÈTES

Le Soleil et son cortège de planètes ne sont plus seuls dans l'Univers puisqu'autour des myriades d'étoiles connues, il est maintenant acquis que, pour une grande majorité d'entre elles, de nombreuses exoplanètes orbitent autour. Il y a donc convergence d'intérêt entre la recherche solaire et stellaire et la recherche sur les exoplanètes : bien connaître l'étoile hôte permet de mieux connaître sa ou ses planètes et les conditions spatiales et d'habitabilité qui en résultent.

Le magnétisme des étoiles

Les étoiles sont des objets dynamiques, turbulents et magnétiques. Comprendre l'origine de ce magnétisme et de la turbulence et des instabilités associées est essentiel car cette activité intense (via le vent et les éruptions magnétiques des étoiles) a un impact direct sur l'environnement spatial autour des étoiles et donc, dans le cas de notre système solaire, sur la Terre, sa magnétosphère et son atmosphère.

L'état turbulent, magnétique et dépendant du temps (de quelques minutes à des millions/milliards d'années) des étoiles est hautement non trivial à comprendre et à expliquer. En effet, les mécanismes physiques, dits magnétohydrodynamiques, à l'œuvre dans les étoiles impliquent un couplage non-linéaire, multi-échelles spatio-temporel qui n'a pas à ce jour de solution analytique simple ! Il est donc nécessaire d'aborder ce problème complexe [1] en déroulant les équations des fluides magnétisés le plus loin possible afin, soit d'en trouver des solutions quasi-analytiques, soit d'utiliser les supercalculateurs les plus puissants pour en approximer numériquement la solution.

Ces deux approches complémentaires ont permis au CEA d'obtenir récemment des résultats importants sur l'origine du magnétisme stellaire et des cycles (comme celui de 11 ans du Soleil) via l'effet dit dynamo, de la structure et de l'amplitude du vent de particules qui prolonge la haute atmosphère chaude des étoiles et enfin sur l'organisation du magnétisme et des ondes dans l'intérieur profond dit radiatif des étoiles de type solaire.

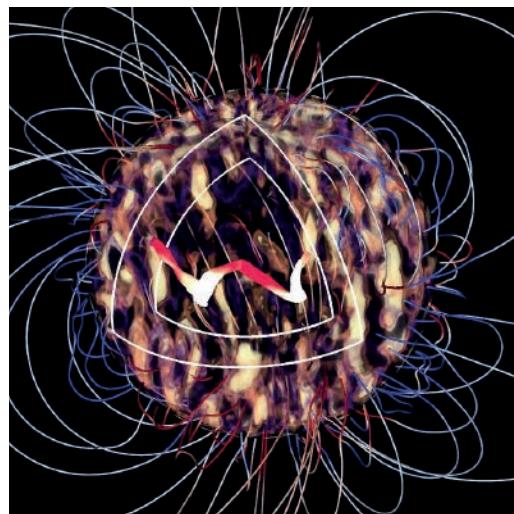
Dynamo solaire et origine du cycle de 11 ans

Sur la figure 1, nous représentons une solution d'une dynamo convective stellaire possédant un cycle magnétique commensurable aux 11 ans du Soleil. Sur les dix dernières années, les simulations du magnétisme du Soleil et des étoiles ont fait un grand bond en avant. Nous avons identifié le régime de paramètres des simulations où les solutions dynamo cycliques avec une période décennale existent (Strugarek et al. 2017, 2018).

Nous avons également compris pourquoi les étoiles ont des périodes de grand minimum, par une analyse poussée de l'interaction entre les différents multi-pôles magnétiques des étoiles (Derosa et al. 2012, Augustson et al. 2015). Enfin, nous avons étendu notre compréhension à d'autres étoiles que le Soleil, possédant une rotation, un âge et/ou une masse différents. Il s'agit maintenant de comprendre le rôle de la composition chimique sur l'intensité de l'activité des étoiles (projet ERC WHole Sun).

Fig. 1: vue 3D des mouvements turbulents (convectifs) et du champ magnétique d'une étoile de type solaire.

Le processus dynamo permet la création et la maintenance contre l'effet Joule de la plupart des champs magnétiques stellaires.



CONTRIBUTEURS

(Direction de la recherche fondamentale)



Allan Sacha Brun est astrophysicien et chef du Laboratoire dynamique des étoiles, des (exo)-planètes et de leur environnement (DAp-AIM) du CEA.



Stéphane Mathis est astrophysicien au Département d'astrophysique (DAp-AIM) du CEA.



Antoine Strugarek est astrophysicien au Département d'astrophysique (DAp-AIM) du CEA.

[1] Peut être comparé pour fixer les idées en terme de complexité à la compréhension du déplacement des masses fluides dans l'atmosphère de la Terre mais en y ajoutant une haute stratification, la turbulence et les champs magnétiques.

SUPERALFVÉNIQUE

Les ondes d'Alfvén (du nom d'Hannes Alfvén, astrophysicien suédois et prix Nobel de physique en 1970) sont des ondes magnétohydrodynamiques qu'on rencontre dans les plasmas. On dit d'un flot qu'il est superalfvénique, s'il dépasse la vitesse d'Alfvén à laquelle se déplacent les ondes (pendant magnétique de supersonique vis-à-vis de la vitesse du son).

Fig. 2 : simulation du vent solaire en 1994, → pendant un minimum d'activité.

Une carte magnétique du Soleil observée (sphère orange-rouge) est utilisée à la base du domaine de calcul pour imposer une topologie magnétique réaliste. Le vent solaire ouvre les lignes de champ magnétique dans le milieu interplanétaire (tubes oranges).

Ce vent accélère jusqu'à devenir superalfvénique lorsqu'il traverse la surface transparente appelée surface d'Alfvén.

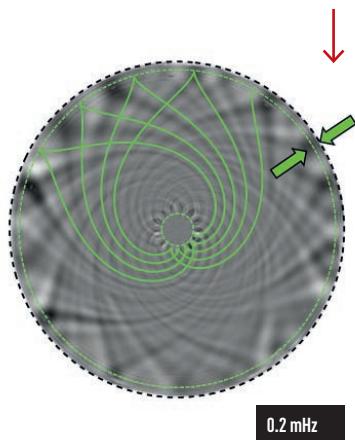
Origine du vent solaire

Le magnétisme du Soleil sculpte son environnement : il détermine les régions « froides » (dites « trous coronaux » car le champ magnétique est ouvert vers le milieu interstellaire) des régions les plus chaudes de la couronne de notre étoile où le champ magnétique est fermé sous forme de boucles. Des trous coronaux s'échappent un vent rapide de particules, en accélé-

ration à mesure qu'il s'éloigne du Soleil. Il devient successivement supersonique puis superalfvénique et peut atteindre des vitesses de 800 km/s à l'orbite terrestre. Mais comment ce vent est-il accéléré ? C'est une des questions fondamentales de physique solaire que les missions Parker Solar Probe et Solar Orbiter (voir encadré) cherchent à élucider. Nous avons développé un modèle tridimensionnel du vent solaire (Fig. 2, Réville et Brun, 2017) afin d'attaquer cette question frontalement avec une approche ab-initio basée sur le formalisme magnétohydrodynamique. Nous avons montré qu'une turbulence d'ondes, naturellement excitée à la photosphère solaire par la granulation convective de notre étoile, permet d'expliquer le chauffage de la couronne solaire et l'accélération observée du vent. De nombreuses questions restent cependant en suspens aujourd'hui : comment transcrire cette connaissance profonde du vent solaire à d'autres types d'étoiles ? Pourquoi le vent solaire présente-t-il deux populations, avec des compositions chimiques différentes ? Enfin, comment le vent solaire rétroagit-il sur la dynamo elle-même tout au long de la vie de notre étoile ? Ces questions passionnantes seront au cœur de nos recherches dans la décennie à venir.

Transport et ondes

Fig. 3 : simulation numérique tridimensionnelle non linéaire des ondes de gravité (dont la force de rappel est la poussée d'Archimède) se propageant dans le cœur radiatif d'une étoile de type solaire. En noir et blanc est rapportée la vitesse radiale des ondes tandis qu'en vert est superposé le rayon théorique le long duquel l'énergie des ondes se propage. Les cercles concentriques en pointillés indiquent les limites de la cavité de propagation des ondes (Alvan et al. 2015).



Depuis leur formation jusqu'aux stades ultimes de leur évolution, les étoiles perdent du moment cinétique. Simultanément à l'action des vents stellaires, les intérieurs stellaires sont le site de puissants mécanismes qui transportent du moment cinétique et contribuent à mélanger leurs éléments chimiques. Ces processus, appelés mécanismes de transport, sont l'équivalent dans les étoiles de ceux à l'origine des vents de grandes échelles et du transport des éléments chimiques dans l'atmosphère de la Terre. Leur impact sur la structure et l'évolution des étoiles est de première importance, puisqu'ils en modifient la vitesse de rotation, donc le magnétisme et la composition chimique avec des conséquences importantes pour leurs environnements planétaires et galactiques.

La signature observationnelle principale de ces processus va être le profil de rotation interne des étoiles depuis leur surface jusqu'à leur cœur. Ce dernier est obtenu grâce à l'hélio et l'astéro-sismologie (voir p. 15) dans les cas respectifs du Soleil et des étoiles. Par exemple, l'enveloppe convective du Soleil tourne plus rapidement à l'équateur qu'au pôle tandis que son cœur radiatif (là où l'énergie est transportée par le rayonnement) tourne comme un corps solide, la transition entre ces deux régimes très différents s'effectuant au niveau d'une couche très fine appelée tachocline (pour couche de transition de vitesse).

Avec CoRoT et Kepler/K2, l'astéro-sismologie spatiale a révélé que la vitesse de rotation des intérieurs des étoiles varie peu depuis leur surface jusqu'à leur cœur alors que des variations de plusieurs ordres de grandeurs étaient attendues du fait de l'évolution de la structure des étoiles et de l'action des vents stellaires.

Afin d'expliquer les intenses échanges de moment cinétique nécessaires pour l'obtention de tels profils de rotation, on étudie notamment, de manière ab-initio, les flots de grande échelle, les champs magnétiques et les ondes dont les intérieurs stellaires sont le siège, leurs instabilités ainsi que la turbulence en résultant. La difficulté est d'évaluer l'impact sur des temps séculaires associés à l'évolution nucléaire des étoiles de processus dynamiques le plus souvent non-linéaires et tridimensionnels, évoluant sur des temps plus courts.

Durant ces dernières années, des progrès majeurs ont été réalisés dans ce domaine par les chercheurs du DAp grâce à des études combinant les méthodes théoriques les plus avancées et la simulation numérique à haute performance (par exemple dans le cas des projets européens STARS2 et SPIRE). Pour le cas des ondes de gravité des étoiles de type solaire, un exemple est donné en figure 3, ces dernières permettant simultanément de sonder le cœur des étoiles et d'en extraire le moment cinétique. ■

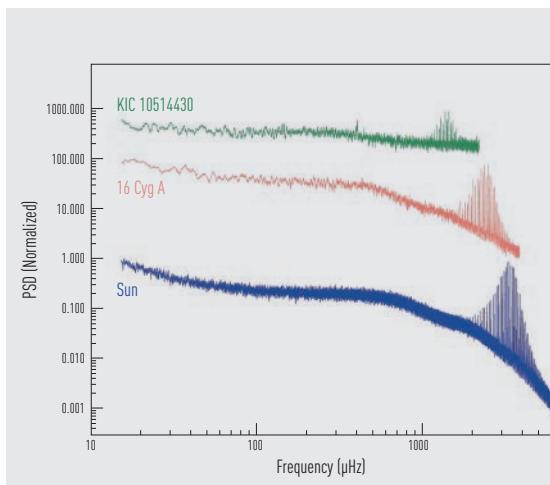


Fig. 1: densité de puissance spectrale normalisée en fonction de la fréquence du Soleil et des deux autres étoiles observées par la mission *Kepler*, 16 Cyg A et KIC 10514430. Les lignes verticales correspondent aux modes d'oscillations piégés dans leurs intérieurs. Ces deux dernières étoiles ont des masses proches de celle du Soleil mais elles sont plus âgées, constituant ce qu'on appelle une séquence évolutive sismique des étoiles de 1 masse solaire. Comme il est observé dans la figure, les fréquences des modes d'oscillation des étoiles de masse et composition chimique initiale similaires diminuent avec l'âge.

•
PAR
RAFAEL A. GARCIA

(Direction de la recherche fondamentale)



Rafael A. Garcia est astrophysicien au Département d'astrophysique (DAP-AIM) du CEA.

Éclairer l'intérieur des étoiles

La lumière du soleil et des étoiles qui nous illumine le jour et la nuit est émise par leur photosphère, l'une des couches externes de leur atmosphère. Les photons, originellement produits par les réactions nucléaires au cœur des étoiles comme le Soleil, parcourent la distance qui les sépare de la surface pendant des millions d'années. Durant ce «voyage», ils «oublient» les conditions dans lesquelles ils ont été produits ainsi que les propriétés des couches qu'ils ont traversées.

Les photons qui arrivent sur Terre ne peuvent donc pas nous renseigner que sur les propriétés de la photosphère des étoiles. Pour étudier les entrailles stellaires, les scientifiques sont obligés d'utiliser d'autres techniques. C'est là qu'intervient la sismologie: de la même façon que les sismologues sont capables de déchiffrer les entrailles de la Terre en étudiant les ondes sismiques avec des sismomètres, les hélio- et astéro-sismologues sont capables d'utiliser des ondes se propageant dans l'intérieur des étoiles pour percer leurs secrets les plus intimes (Fig. 3 p. 14).

Les étoiles comme le Soleil disposent d'une couche convective externe turbulente qui excite des ondes sonores de façon similaire à l'ébullition de l'eau dans une casserole chauffée. L'étude de ces ondes nous renseigne sur les propriétés de la cavité dans laquelle elles se propagent ainsi que sur la dynamique des plasmas qu'elles traversent. Grâce à la combinaison des ondes qui sont piégées dans différentes cavités, on peut déterminer les propriétés des intérieurs stellaires avec une grande précision.

Les travaux observationnels qui conduisent à la caractérisation de ces ondes sont complétés par des études théoriques et des simulations numériques grâce auxquelles il est possible de mieux comprendre le fonctionnement des étoiles ainsi que leur histoire et leur évolution future.

Aujourd'hui, la sismologie du Soleil et des étoiles est à son zénith. Des missions spatiales comme SoHO (ESA/NASA) ou SDO (NASA) pour le Soleil ou CoRoT (CNES/ESA) et Kepler/K2 (NASA) pour les étoiles permettent de recueillir des données d'une qualité inégalée pour mieux contraindre les modèles théoriques et ainsi améliorer notre connaissance des processus physiques qui contrôlent l'évolution des étoiles (Fig. 1). Le futur est encore plus prometteur grâce à la mission spatiale TESS, lancée en 2018 par la NASA et qui est en train de faire un balayage de presque tout le ciel avec des observations sismiques de millions d'étoiles brillantes. À plus long terme, nous sommes engagés dans la préparation de la future mission de l'ESA, PLATO, qui nous permettra d'étudier des millions d'étoiles, parmi lesquelles des dizaines de systèmes stellaires comme le nôtre. ■



© Esa

SoHO/GOLF

GOLF (pour Global Oscillations at Low Frequency) est un des douze instruments scientifiques embarqué à bord du satellite SoHO (Solar and Heliospheric Observatory), pierre angulaire du programme Horizon 2000 de l'ESA lancé le 2 décembre 1995. Depuis plus de 23 ans, GOLF nous renseigne sur la structure et la dynamique interne du Soleil grâce à l'étude des modes d'oscillation globaux. En partenariat avec le CNES, l'ESA et la NASA, le CEA était responsable du sous-système de détection ainsi que d'une partie de l'électronique, de l'ordinateur de vol et du logiciel associé. SoHO est toujours en service et sa mission a été prolongée au moins pour deux ans supplémentaires.

•
PAR
PIERRE-OLIVIER LAGAGE
(Direction de la recherche fondamentale)



Pierre-Olivier Lagage est astrophysicien et membre de l'équipe scientifique de la mission ARIEL au Département d'astrophysique (DAp-AIM) du CEA.

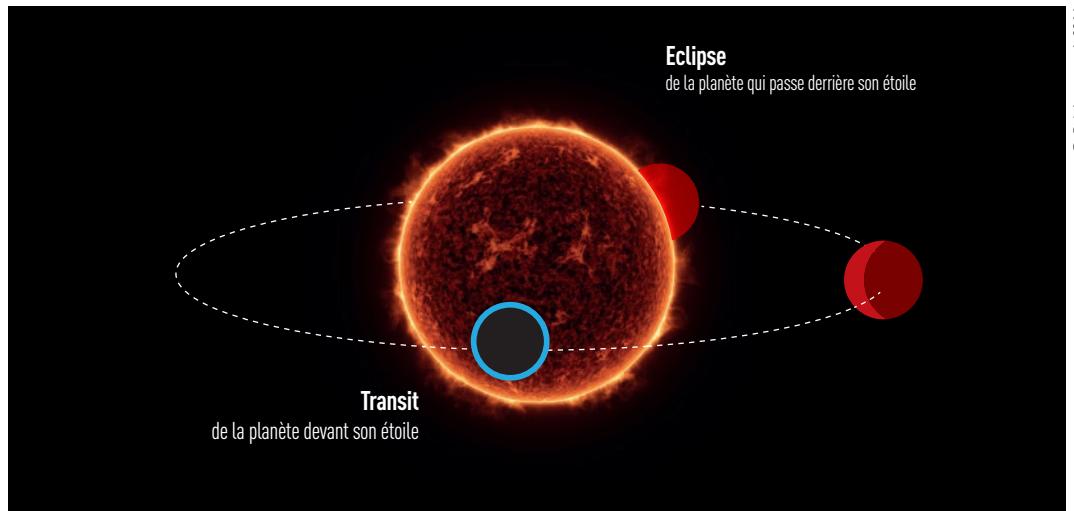
Fig. 1:
→

Éclipse: en faisant la différence entre le signal observé avant l'éclipse, qui contient l'émission de l'étoile et de la planète, et le signal observé pendant l'éclipse, qui ne contient que l'émission de l'étoile, on peut obtenir le signal en provenance de la planète. De telles observations ne sont possibles que lorsque l'exoplanète, son étoile hôte et la Terre sont alignées.

Transit: on peut également obtenir des informations sur l'atmosphère des exoplanètes en observant l'absorption par cette atmosphère (schématisée par l'anneau bleu) de la lumière de l'étoile hôte. Les molécules dans l'atmosphère absorbent la lumière de l'étoile dans des bandes de longueur d'onde caractéristiques de la molécule, le plus souvent situées dans le domaine de l'infrarouge. Les observations sont donc faites avec des spectrographes qui détectent la lumière infrarouge.

Dans l'atmosphère des exoplanètes

Sommes-nous seuls dans l'Univers ? Nous ne sommes pas encore prêts à répondre à cette question, mais nous avançons !



© Beichman et al. 2014

Ce n'est qu'en 1995 qu'une réponse positive a pu être donnée à la question de savoir s'il y a des planètes autour d'autres étoiles que le Soleil. Cette première détection d'une exoplanète a été une vraie surprise : il s'agissait d'une planète géante sur une orbite dix fois plus proche de son étoile que Mercure l'est du Soleil. Depuis lors, la « chasse à la planète » bat son plein et, à ce jour, 4 000 exoplanètes ont été détectées, dont quelques-unes sont de la taille de la Terre et sur une orbite dite « habitable », où l'eau peut être sous forme liquide. La mission spatiale TESS, ainsi que de petits télescopes au sol, sont en train de recenser, de façon systématique, les planètes orbitant dans la zone habitable des petites étoiles proches de nous. Pour les planètes orbitant dans la zone habitable des étoiles du type solaire proches, il faudra attendre la mission spatiale PLATO (voir encadré p. 18).

Alors que les découvertes d'exoplanètes vont bon train, un nouveau chapitre de leur étude s'est ouvert et va se développer fortement dans les années à venir : la caractérisation de leur atmosphère. On peut apprendre beaucoup des observations spectroscopiques d'une atmosphère d'exoplanète : par exemple, la composition moléculaire des atmosphères d'exoplanètes géantes peut retracer la formation et l'évolution de la planète, tandis que l'atmosphère des exoplanètes rocheuses peut révéler des gaz trahissant l'existence d'une activité biologique.

Des avancées majeures dans l'étude de ces atmosphères sont attendues avec la mise en service du James Webb Space Telescope (JWST, voir p. 17). Nous avons été très impliqués dans la réalisation d'un de ses quatre instruments, MIRI, ce qui nous donne accès à du temps d'observation garanti. Nous allons utiliser une grande partie de ce temps pour cibler particulièrement le cortège des sept planètes orbitant l'étoile naine Trappist 1. Nous commencerons par l'observation de la planète la plus proche de son étoile, de la masse de la Terre mais un peu plus chaude. Si la détection est positive, nous essayerons d'observer d'autres planètes du système se trouvant dans la zone habitable. La méthode utilisée pour obtenir l'émission de la planète est celle dite de l'éclipse (Fig. 1).

Parallèlement à la préparation des observations avec JWST, nous travaillons à la prochaine génération d'instruments spatiaux. En effet, JWST n'est pas seulement dédié à l'observation des exoplanètes et l'atmosphère d'une centaine seulement d'exoplanètes devrait être étudiée en détail. Or, il en faut beaucoup plus pour mettre en évidence les phénomènes physiques et chimiques à l'œuvre. Ce sera l'objet de la mission ARIEL (voir p. 17) qui étudiera l'atmosphère d'un millier d'exoplanètes à partir de 2028. Les deux prochaines décennies seront passionnantes pour la compréhension des exoplanètes ! ■

De l'importance des marées

Tout du long des découvertes des systèmes extrasolaires, est apparue une image toute autre que celle qu'on imaginait lorsque le seul système planétaire connu était notre système solaire.

Des répartitions diverses et inédites des orbites ont été observées, en particulier avec des systèmes beaucoup plus resserrés que le nôtre comme les Jupiters « chauds », ces planètes gazeuses qui orbitent très près de leur étoile, et les systèmes compacts tels que Trappist 1 dont les sept planètes orbitent leur étoile à une distance inférieure à la distance séparant le Soleil de Mercure. Dans ces systèmes, les interactions entre l'étoile hôte et le cortège planétaire sont intenses et impliquent simultanément la gravitation, les forces électromagnétiques et le rayonnement.

Dans ce contexte, la première interaction à considérer est la marée entre les étoiles, les planètes et leurs satellites naturels. Dans notre système solaire, elle est responsable de la synchronisation de la rotation de la Lune avec son mouvement orbital autour de la Terre, de l'intense volcanisme observé à la surface du satellite de Jupiter, Io, ou encore des geysers émis au pôle sud de la lune Encelade de Saturne. Les marées jouent ainsi un rôle clé dans l'évolution de l'architecture orbitale des systèmes planétaires et de la rotation des corps les constituant dont elles impactent aussi la structure et la dynamique interne.

Le mécanisme à l'origine de ces phénomènes est la dissipation de l'énergie des ondes de marées qui se propagent dans les planètes et les étoiles de manière similaire à celles voyageant dans l'atmosphère, dans les océans et dans la croûte terrestre. Durant la dernière décennie, les chercheurs du DAp ont fortement contribué à établir le lien entre l'intensité de la dissipation et la structure et la

dynamique internes des planètes et des étoiles. Ils ont ainsi établi que la dissipation des marées dans les étoiles hôtes de systèmes planétaires présente de fortes variations tout le long de leur évolution. Ces variations sont liées aux changements de structure des étoiles durant les phases jeunes de leur évolution et au freinage de leur rotation par les vents stellaires sur la séquence principale durant laquelle l'hydrogène est transformé en hélium. Elles ont un impact majeur sur l'architecture orbitale des systèmes compacts et le taux de survie des planètes proches tels que les Jupiters chauds.

Simultanément, en tirant le meilleur parti des missions spatiales d'exploration de Jupiter et de Saturne, ils ont démontré l'importance de la dissipation des marées dans les coeurs de roches et de glaces des planètes gazeuses et dans les régions résultant de leur érosion du fait des hautes pressions et températures régnant au centre de ces objets (Fig. 1). Les taux de dissipation prédicts sont en accord avec ceux mesurés pour Jupiter et Saturne grâce à la détection et à l'évaluation du mouvement de leurs lunes qui remettent en cause les valeurs communément adoptées en les augmentant d'un ordre de grandeur. Enfin, ils ont développé des modèles complets des marées atmosphériques et océaniques des planètes telluriques telles que la Terre, Vénus ou encore les super-Terres potentiellement habitables. Objectif clé : comprendre leur impact sur l'histoire de la rotation de ces planètes dont les conséquences sont multiples et cruciales pour leur habitabilité depuis l'évolution de leur climat jusqu'aux variations de leur magnétisme potentiellement protecteur. ■

PAR
STÉPHANE MATHIS

(Direction de la recherche fondamentale)



Stéphane Mathis est astrophysicien au Département d'astrophysique (DAp-AIM) du CEA.

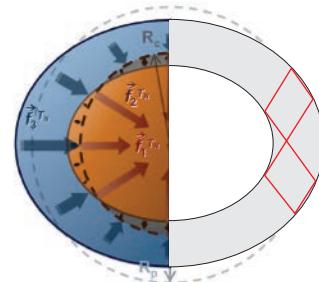


Fig. 1 : mécanismes de dissipation de marée à l'intérieur des planètes gazeuses.

À gauche, le cœur dense de roche et de glace est soumis à différentes forces résultant des marées exercées par les lunes qui sont modifiées par la présence de la profonde enveloppe fluide de la planète.

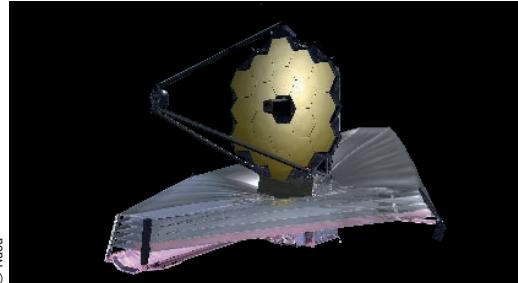
À droite, vue schématique de la propagation d'une onde de marée le long d'une couche de cisaillement (en rouge) qui conduit à une dissipation efficace dans l'enveloppe gazeuse (Guenel, Mathis & Remus, 2014).

ARIEL →

ARIEL est la mission M4 du programme Cosmic Vision de l'ESA. C'est un télescope de la classe 1m, dédié à l'observation d'un échantillon statistiquement significatif d'atmosphère d'exoplanètes. Dans le cadre d'un consortium international, en partenariat avec le CNES, et en collaboration avec des laboratoires du CNRS, le CEA est notamment responsable de l'instrument principal de la mission : le spectromètre infrarouge AIRS (ARIEL InfraRed Spectrometer).



← Le James Webb Space Telescope



© Nasa

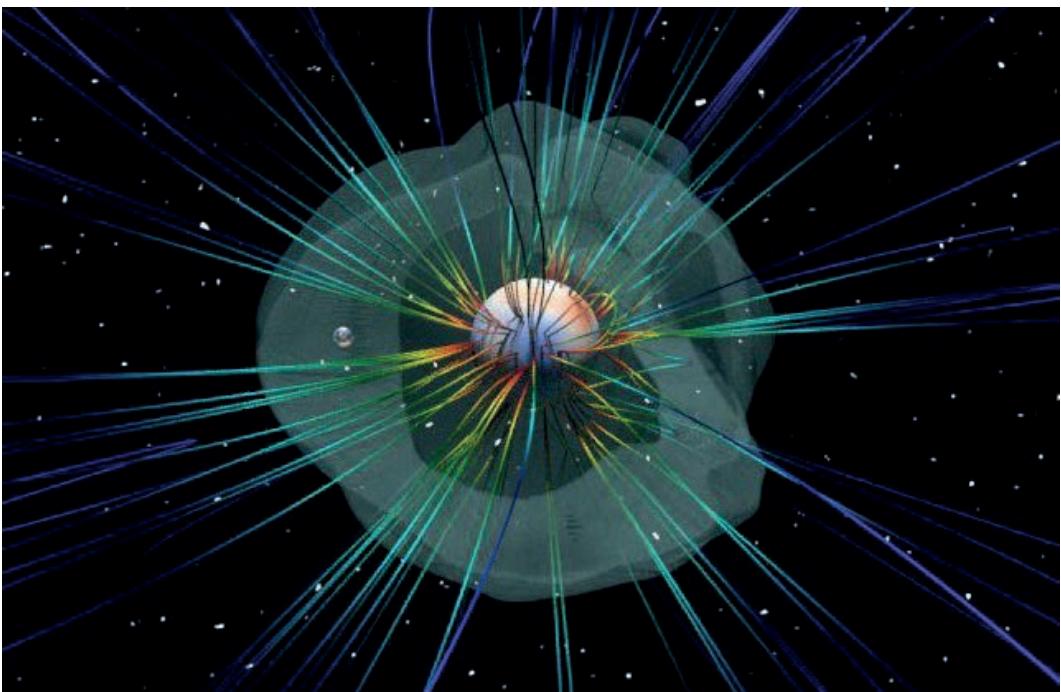
Le James Webb Space Telescope (JWST), programme phare de la NASA auquel participent l'Europe (via l'ESA) et le Canada, est le successeur du Hubble Space Telescope (HST). Le lancement de ce télescope de 6,5 mètres de diamètre est prévu en 2021 : ce sera alors le plus grand télescope jamais envoyé dans l'espace. JWST permettra des avancées majeures dans de nombreux domaines de l'astrophysique, de la cosmologie aux exoplanètes. Dans le cadre d'un consortium international, en partenariat avec le CNES, et en collaboration avec des laboratoires du CNRS, le CEA assure la responsabilité scientifique et technique de l'imageur de l'instrument infrarouge moyen MIRI (Mid InfraRed Instrument).



Fig.1 : modèle de l'atmosphère de l'étoile HD 189733.

Une super-Terre en orbite proche autour de cette étoile est indiquée pour montrer la compacité de tels systèmes étoile-planète.

Dans le cas présent, la planète poursuit son orbite en entrant/sortant de la surface d'Alfvén bleutée, menant à une évolution temporelle complexe de la connexion magnétique entre les deux corps.



•
CONTRIBUTEURS

(Direction de la recherche fondamentale)



Allan Sacha Brun est astrophysicien et chef du Laboratoire dynamique des étoiles, des (exo)-planètes et de leur environnement (DAp-AIM) du CEA.



Antoine Strugarek est astrophysicien au Département d'astrophysique (DAp-AIM) du CEA.

Les interactions magnétiques étoile-planète

Que serions-nous sur Terre sans notre cocon magnétique ? L'idée communément admise aujourd'hui est que notre magnétosphère permet à la Terre de conserver son atmosphère, essentielle à notre biosphère.

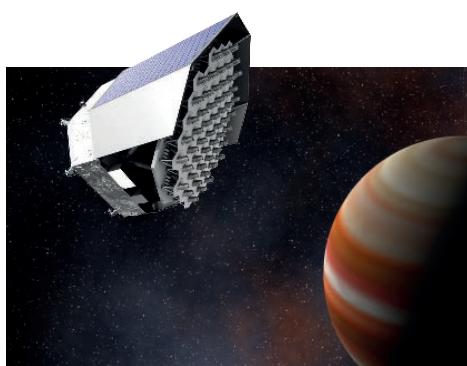
Nous ignorons tout du champ magnétique des exoplanètes ! Or, il est également déterminant pour les exoplanètes en orbite proche de leur étoile, car il détermine pour partie la migration orbitale de celles-ci en s'ajoutant aux couples de marées (voir p. 17). En effet, lorsqu'une planète est en orbite à l'intérieur de la surface d'Alfvén du vent de son étoile, une connexion magnétique s'établit entre les deux corps. De l'énergie et du moment cinétique principalement portés par des ondes d'Alfvén sont alors échangés, pouvant mener à des traces observables des propriétés

magnétiques des exoplanètes dans l'atmosphère de leur étoile hôte.

Nous avons modélisé ces systèmes compacts en 3D (Fig. 1) afin de quantifier ces échanges. Ces modèles nous permettent aujourd'hui de sélectionner les phases orbitales et rotationnelles préférentielles auxquelles observer les systèmes exoplanétaires. Ils seront un atout majeur pour la caractérisation du magnétisme des exoplanètes dans les décennies à venir, en permettant de tirer le meilleur parti d'observations multi-longueurs d'onde avec les futurs instruments SPIRou, JWST, PLATO ou encore ARIEL.

← **PLATO**

PLATO (pour Planetary Transits and Oscillations of stars) est la mission M3 du programme Cosmic Vision de l'ESA, sélectionnée en 2014 pour un lancement prévu en 2026. Son objectif : détecter et caractériser des systèmes exoplanétaires, en particulier ceux similaires au système solaire, constitués par une étoile semblable au Soleil avec au moins une planète de type terrestre en orbite dans la zone d'habitabilité. À cette fin, PLATO combinerà la détection par transit des exoplanètes avec la caractérisation astéro-sismique de l'étoile hôte. Plusieurs laboratoires français du CNRS et du CEA soutenus par le CNES participent à ce projet (Rauer et al. 2014).



© Nasa

Solar Orbiter →

Solar Orbiter est la mission M1 du programme Cosmic Vision de l'ESA. C'est une mission ambitieuse pour l'étude du Soleil qui combine de nombreux instruments (in-situ et télédétection), et qui suivra une orbite elliptique inclinée. Celle-ci lui permettra de s'approcher fortement du Soleil (autour de 30 rayons solaires) et d'observer les pôles solaires que nous ne voyons que très partiellement depuis la Terre.

Le CEA a développé, en collaboration avec le CNES, le plan focal de l'instrument STIX, spectro-imageur dédié à l'étude des éruptions solaires. Le CEA est impliqué dans le Modelling Group (MADAWG) afin de développer les simulations permettant l'interprétation des données, notamment en collaboration avec des laboratoires du CNRS et de l'Observatoire de Paris (Rouillard et al. 2019).



Enjeux de la météorologie de l'espace

Les étoiles de type solaire possèdent une activité magnétique intense modulant leur rayonnement dans la gamme de fréquence EUVX. Cette activité est accompagnée d'un vent de particules énergétiques dans lequel des tempêtes magnétiques peuvent se propager et venir directement impacter notre planète et notre société technologique (signaux radars, HF, GPS, réseaux électriques et de gaz, passagers et personnels de vol...).

La météorologie de l'espace (ME) consiste à caractériser l'état dynamique du couple Soleil-Terre (et par extension des couples étoile-exoplanètes) pour anticiper et se prémunir des fureurs solaires. Il y a donc un aspect opérationnel en ME : il faut être en capacité de prévoir l'état éruptif du Soleil sur les temps courts

(quelques heures à quelques jours) et à moyen terme (la phase du cycle de 11 ans). En effet, il existe une forte corrélation entre l'état magnétique du Soleil (est-il en minimum ou maximum du cycle de 11 ans?) et le nombre d'éruptions et de nuages magnétiques qu'il produit. Grâce aux observations, on sait ainsi qu'il y a en moyenne trois nuages magnétiques par jour en maximum pour seulement un tous les trois jours en minimum d'activité. Au DAp, nous avons développé des outils innovants, basés sur la méthode dite d'assimilation de données, afin de contraindre différents modèles du Soleil avec les observations et ainsi prévoir l'état du système Soleil-Terre. La figure 2 montre le cas de la prévision du cycle 25 que nous anticipons arriver d'ici fin 2024 avec une erreur de 6 mois environ. ■

L'évolution séculaire

Les étoiles et leur cohorte de planètes évoluent sur des temps dits séculaires. Ainsi quelle était l'activité du Soleil ou la configuration orbitale de notre système solaire il y a quatre milliards d'années juste après sa formation et quelle sera-t-elle dans un milliard d'années ? Le Soleil (son rayonnement, sa rotation, son activité) était-il identique à ce qu'il est et le restera-t-il ? Les planètes avaient-elles les mêmes orbites ou la même atmosphère et composition chimique et les conserveront-elles ?

Nous savons que ce n'est pas le cas ! Pour répondre à ces questions, il est essentiel de comprendre comment chaque corps évolue au cours du temps afin de caractériser le couplage étoiles-planètes qui en résulte et la boucle de rétroaction sur l'habitabilité ou la stabilité du système que cela implique. La figure 3 représente l'évolution d'un système étoile-planète sur dix milliards d'années. Ici, nous nous concentrerons sur la rotation de l'étoile et cherchons à savoir si la planète

va survivre ou être engloutie par l'étoile. Plusieurs processus physiques sont considérés à tour de rôle : vent stellaire, effets de marée d'équilibre et dynamique, couple magnétique lié à l'interaction magnétique directe entre l'étoile et sa planète. Nos travaux sur les mécanismes physiques fondamentaux de transport de moment cinétique dans les étoiles et les planètes nous permettent de calculer précisément les couples de manière ab-initio et ainsi l'évolution détaillée au cours des temps longs des systèmes (Benbakoura et al. 2019). Dans ce cas précis, la planète ne peut survivre si tous les effets sont pris en compte simultanément : elle disparaît en 50 millions d'années (pic bleu sur la courbe de rotation de l'étoile). En effet, le moment cinétique orbital de la planète est absorbé par l'étoile, ce qui fait que sa rotation s'accélère. Si l'étoile ou la planète possède un champ magnétique plus faible, alors la disparition de la planète s'opère après un milliard d'années (pic courbe rouge), laissant un peu de répit ! ■

Fig. 2 : prévision via le nombre de taches solaires du timing et de l'amplitude du prochain cycle solaire 25 sur la période 2019-2030 (Brun et al. 2019).

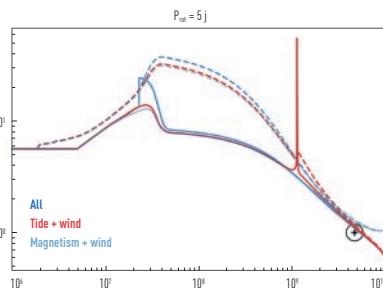
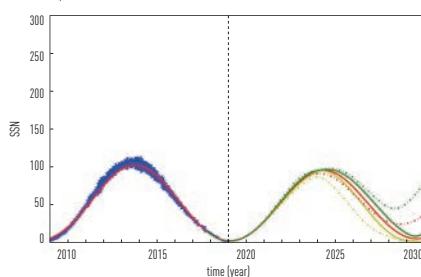


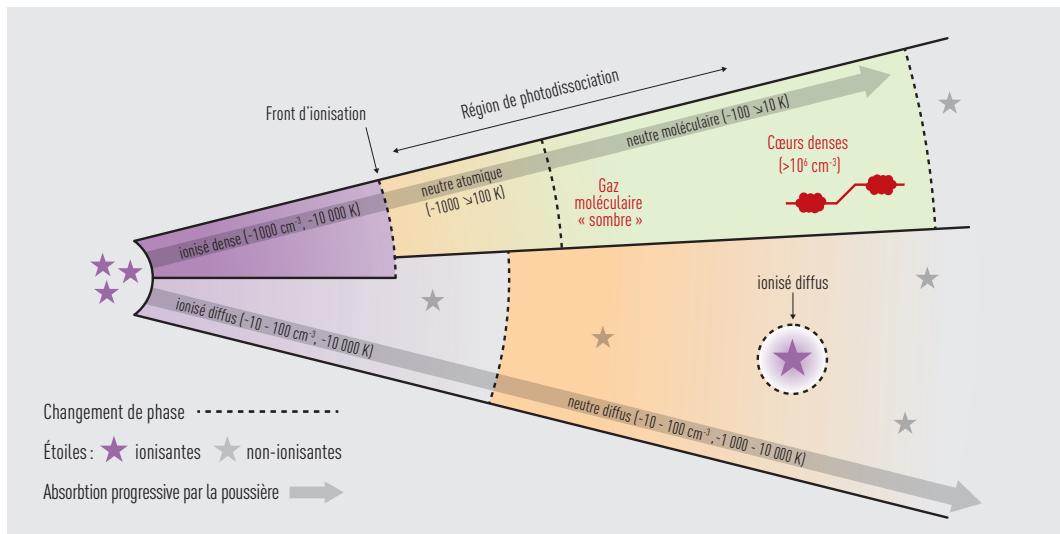
Fig. 3 : évolution du taux de rotation d'une étoile de type solaire ayant une planète de type Jupiter chaud orbitant autour. Trois cas sont considérés : en bleu clair, seul le vent stellaire est pris en compte ; en rouge, on ajoute les effets de marée et, en bleu foncé, les interactions magnétiques (type ailes d'Alfvén).

FORMATION DES ÉTOILES ET MILIEU INTERSTELLAIRE

Les étoiles sont le principal moteur de l'évolution de notre environnement astronomique, en alimentant le cycle de la matière et de l'énergie dans les galaxies. Nous leur sommes aussi intimement liés puisqu'elles sont la source des principaux éléments chimiques qui nous composent. Leur naissance, ou plutôt leur formation, est complexe et se produit dans les nuages de gaz et de poussière les plus denses des galaxies. En sondant ces nuages denses, de nouveaux liens entre les mécanismes qui président à la formation des étoiles et ceux qui structurent le milieu interstellaire aux grandes échelles sont découverts ainsi que la présence quasi systématique de disques de matière autour des protoétoiles, disques où se forment les exoplanètes que nous cataloguons désormais par milliers.

L'écosystème interstellaire

Le milieu interstellaire (MIS) qui, comme son nom l'indique, remplit l'espace entre les étoiles d'une galaxie, est loin d'être vide : il représente environ 20 % de la masse de la matière visible dans la Voie Lactée. En général, le MIS est très tenu, avec une particule par cm³ en moyenne (10 milliards de milliards de fois moins dense que l'atmosphère terrestre). Ce milieu fait partie d'un écosystème au sein duquel les étoiles - formées par effondrement gravitationnel des nuages moléculaires - agissent en retour par leur rayonnement et leur éjection violente de matière. Notre connaissance du MIS s'est grandement améliorée ces dernières années, notamment grâce aux observations de galaxies proches.



Un milieu multiphasé...

Le MIS est constitué de gaz (atomes et molécules) et de grains de poussière. Le gaz est constitué d'environ 73 % d'hydrogène et 25 % d'hélium ; les 2 % restants sont les autres éléments dits « lourds » (O, C, N, Fe, etc.) qui sont produits au cours de l'évolution des étoiles. Quant aux grains, ce sont de petites particules solides de taille inférieure au micron (plus petits que des bactéries).

Le rayonnement stellaire a pour effet de dissocier les molécules et d'ioniser les atomes, produisant ainsi différentes « phases » (Fig. 1). À la surface des nuages moléculaires, où l'hydrogène est sous forme de H₂, le monoxyde de carbone CO est dissocié. Or, par facilité, c'est souvent en observant CO qu'on mesure la masse de gaz moléculaire. Il y a donc une région moléculaire qui se dérobe facilement aux observations : elle est appelée le gaz « sombre ».

Le rayonnement stellaire a aussi pour effet de chauffer le MIS par transfert d'énergie via l'ionisation ou encore l'effet photoélectrique sur les grains dans les régions atomiques. Le gaz ainsi chauffé se refroidit en émettant un rayonnement discret (raies spectrales) ou continu. Le refroidissement du gaz et l'écrantage des rayonnements ionisants fournissent des conditions propices à la formation des futures étoiles. À l'extrême, les galaxies elliptiques, qui ont un MIS presque inexistant, ne forment quasiment plus d'étoiles.

... Et turbulent

Comme l'atmosphère terrestre ou encore les océans, le MIS est un fluide turbulent (c'est-à-dire en évolution perpétuelle et soumis à des mouvements complexes à toutes les échelles). Cette turbulence, qui trouve son origine d'une part dans les interactions gravitationnelles galactiques, d'autre part dans les explosions des étoiles, joue un rôle prépondérant dans

• CONTRIBUTEURS

(Direction de la recherche fondamentale)



Frédéric Galliano est astrophysicien au Département d'astrophysique (DAP-AIM) du CEA.



Vianney Lebouteiller est astrophysicien et chef du Laboratoire de formation des étoiles et du milieu interstellaire (DAP-AIM) du CEA.



Patrick Hennebelle est astrophysicien au Département d'astrophysique (DAP-AIM) du CEA.



Fig. 1 : vision schématique de la stratification des phases du MIS. Les amas d'étoiles jeunes sont particulièrement intéressants car ceux-ci évoluent dans un milieu riche en nuages interstellaires, produisant des phases gazeuses distinctes selon que le rayonnement arrive à pénétrer plus ou moins profondément dans ces nuages. Le rayonnement est principalement obscurci par la poussière. La structure représentée est le fruit de travaux théoriques sur les processus physiques du MIS et a été confirmée par l'observation de régions proches à haute résolution spatiale.

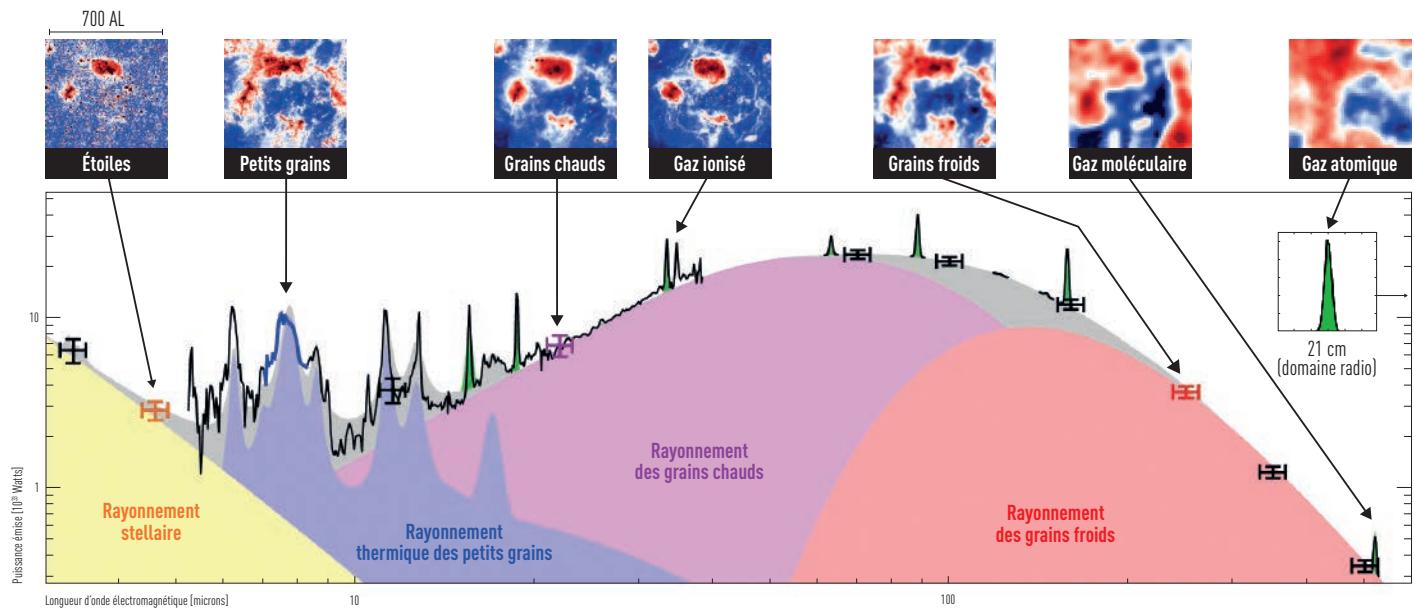
le MIS puisqu'elle est responsable, avec l'auto-gravité et le champ magnétique, de sa structure spatiale faite de nuages et de filaments de gaz dense immersés dans un milieu beaucoup plus tenu. La turbulence joue également un rôle fondamental vis-à-vis de la formation des étoiles de différentes masses au sein de ces nuages.

La turbulence est un phénomène complexe qui n'est pas encore totalement compris même dans des fluides simples. Pour l'étudier, il est nécessaire de réaliser des simulations numériques sur les grands calculateurs massivement parallèles. Ces simulations, qui peuvent comporter plusieurs milliards d'éléments de calcul, permettent de faire des prédictions quantitatives quant à la structure du milieu, qu'on peut ensuite combiner aux calculs d'émission du gaz et de la poussière pour comparer aux observations.

L'infrarouge : un domaine de choix pour observer le milieu interstellaire

Le domaine spectral de l'infrarouge (IR) concentre l'essentiel de l'émission continue des grains et de nombreuses raies de refroidissement du gaz (Fig. 2). La spectroscopie, c'est-à-dire la décomposition en longueur d'onde de la puissance rayonnée, permet d'accéder à une dimension spectrale riche en informations et s'ajoute aux deux dimensions spatiales d'une simple image. On peut ainsi construire des « cartes spectrales », pour, en chaque point d'une région, isoler les différents constituants du MIS et déduire la température, la densité, le degré d'ionisation et les abondances chimiques.

La versatilité du télescope spatial européen Herschel (2009-2013) a permis d'obtenir une vision globale de l'évolution du MIS au-delà de la Voie Lactée, dans les galaxies proches. Grâce aux nouvelles informations fournies en IR, il a ainsi été possible, pour la première fois, d'établir des modèles complexes du MIS multiphasé qui tiennent compte de tous les processus physiques connus. À partir de 2021, le James Webb Space Telescope (JWST) étendra cette compréhension à l'univers distant.



Quand on espionne chez les voisins...

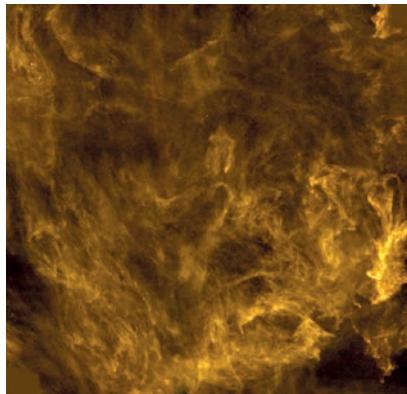
Pour comprendre globalement les processus physiques et chimiques du MIS, on cherche à accéder à des environnements différents de celui de la Voie Lactée, qui est somme toute assez monotone, avec peu de variations du taux de formation d'étoiles (environ deux fois la masse du Soleil par an, pour toute la galaxie) et de l'abondance d'éléments lourds (environ 2 % des atomes). Les galaxies proches (à l'intérieur d'une sphère de quelques millions d'années-lumière) présentent, en comparaison, un éventail beaucoup plus large de conditions, parfois extrêmes (accrétion active autour de trous noirs, abondance d'éléments lourds jusqu'à 50 fois plus faible et taux de formation stellaire jusqu'à des centaines de fois plus élevés que dans la Voie Lactée). Parmi les résultats les plus marquants obtenus avec Herschel, on notera la confirmation de l'importance du gaz sombre qui domine le budget moléculaire et la « transparence » du MIS qui permet aux rayonnements d'interagir sur de grandes distances. En ce qui concerne les grains, le télescope a montré que leur émissivité avait jusqu'alors été fortement sous-estimée, indiquant que leur constitution est très certainement amorphe (désordonnée) plutôt que cristalline (ordonnée). Enfin, il a permis de mettre en évidence l'importance de la croissance des grains dans le MIS par accrétion d'atomes du gaz.

... Pour connaître les ancêtres de la Voie Lactée

Au-delà de notre compréhension des propriétés du MIS en tant qu'objet astrophysique, étudier ces propriétés en fonction des paramètres environnementaux permet de reconstituer l'évolution des galaxies. Dans certaines galaxies proches, le MIS semble être primitif à défaut d'être primordial (composition chimique assez proche de celle juste après le Big Bang). Il est donc envisageable de considérer ces galaxies proches (ayant l'âge de l'Univers actuel) comme autant de laboratoires qui nous aident à comprendre la formation des premières étoiles et à comprendre l'évolution des galaxies après leur formation. ■

Le long des filaments interstellaires

La formation des étoiles est l'un des phénomènes les plus fondamentaux en astrophysique mais c'est aussi l'un des plus complexes. L'étude des mécanismes physiques à l'œuvre est importante pour comprendre non seulement l'origine de notre propre Soleil mais aussi la formation des systèmes planétaires aux petites échelles et l'évolution des galaxies aux grandes échelles.



© ESA / Herschel / Gould Belt Survey



© ESA / Herschel / Gould Belt Survey

Le problème met en jeu un grand nombre d'effets physiques (gravité, turbulence et magnétisation du milieu interstellaire, phénomènes de rétroaction, thermodynamique du gaz interstellaire) sur une large gamme d'échelles. Mais les produits globaux du processus de formation stellaire (distribution en masse des étoiles, taux de formation d'étoiles dans les galaxies) semblent régis par des lois assez simples et quasi-universelles. Les observations montrent que la courbe de démographie stellaire semble suivre une loi immuable avec peu d'étoiles ou «naines brunes» de très faible masse, peu d'étoiles massives et une grande majorité d'étoiles de type solaire avec une masse assez proche de celle du Soleil. De même, l'(in)efficacité du processus de formation stellaire dans le gaz moléculaire dense semble être quasiment identique dans les régions de formation stellaire proches de notre galaxie à l'échelle du parsec et dans les galaxies extérieures à l'échelle de ~ 10 kiloparsec. Clarifier l'origine de ces lois et comprendre comment seule une petite fraction de la matière du milieu interstellaire froid est convertie en étoiles représente l'un des grands défis de l'astrophysique contemporaine.

Comme les nuages interstellaires qui forment les étoiles sont froids (de l'ordre de 10 K), ils sont généralement sombres et complètement inobservables en lumière visible. Mais ils deviennent très brillants dans

le domaine de l'infrarouge lointain et du submillimétrique, observables depuis l'espace. Les images d'Herschel ont révolutionné notre compréhension du lien entre la structure du milieu interstellaire et le processus de formation stellaire et permis des avancées très significatives sur ces questions, étroitement liées à celle de l'origine des systèmes solaires dans l'Univers.

Universalité de la structure filamentaire

Dans tous les nuages moléculaires proches de notre galaxie, elles ont montré une profusion de filaments ainsi que de nombreux coeurs denses «pré-stellaires» situés le long de ces filaments. Avant 2009, des observations dans l'infrarouge avaient déjà repéré la présence de gigantesques réseaux de filaments de gaz mais leur rôle restait mystérieux. Herschel a démontré d'une part que les filaments interstellaires sont beaucoup plus répandus que ce qu'on pensait, d'autre part que la formation des étoiles a lieu principalement dans les plus denses d'entre eux. Ils apparaissent maintenant comme des éléments omniprésents et constitutifs du milieu interstellaire froid. Un enchevêtrement très riche de filaments est ainsi observé dans tous les nuages, ceux où le processus de formation stellaire n'a pas encore débuté (nuage de Polaris, fig. 1 à gauche) et ceux qui ont déjà formé un

•
PAR
PHILIPPE ANDRÉ

(Direction de la recherche fondamentale)



Philippe André est astrophysicien au Département d'astrophysique (DAP-AIM) du CEA.

Fig. 1:
À gauche, combinaison des images obtenues à 250 µm, 350 µm et 500 µm avec Herschel en direction du nuage interstellaire de Polaris qui ne montre aucune formation d'étoiles.

À droite, image composite avec Herschel du nuage d'Orion A, qui forme les étoiles de manière très active et abrite la fameuse «nébuleuse d'Orion». Les «fausses» couleurs correspondent aux différentes longueurs d'onde observées par le télescope (rouge = 250 µm, vert = 160 µm, et bleu = 70 µm).

grand nombre d'étoiles (complexe d'Orion, fig. 1 à droite). Ceci est un premier indice : l'apparition des filaments dans le milieu interstellaire doit précéder la formation des étoiles.

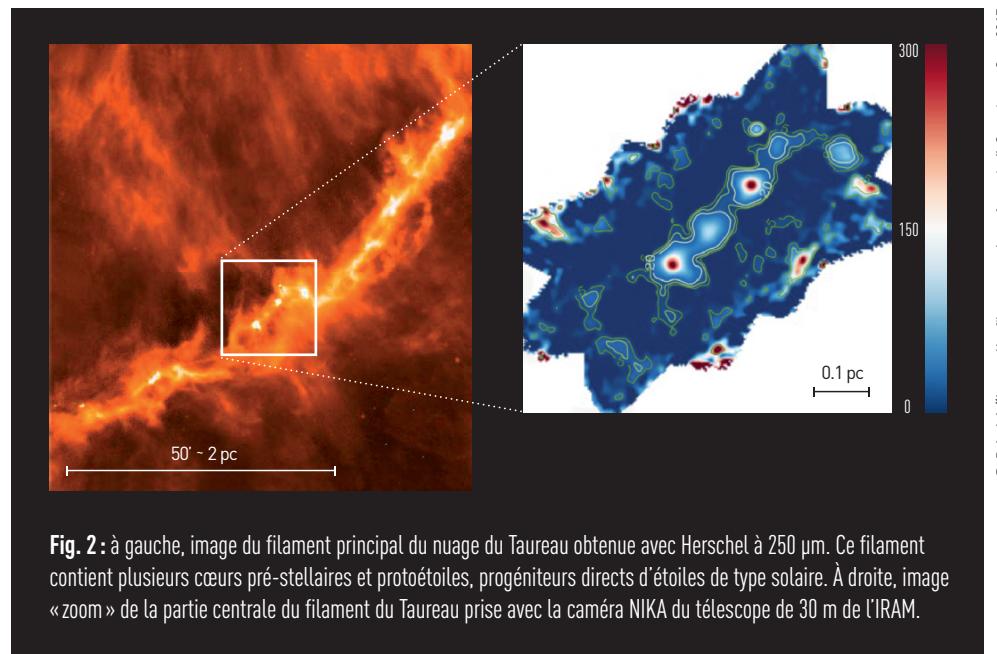
Grâce à la résolution d'Herschel dans le domaine de l'infrarouge lointain et du submillimétrique, les astrophysiciens ont mesuré, pour la première fois, précisément les dimensions des filaments interstellaires et montré qu'ils ont tous une largeur très similaire de l'ordre de ~ 0.1 pc ou ~ 0.3 année-lumière. Près de 600 filaments dans huit nuages proches de la Ceinture de Gould ont ainsi été passés au crible. Si chaque filament peut s'étendre sur plus de ~ 1 à ~ 10 pc dans l'espace, leur largeur s'écarte très peu d'une valeur moyenne de ~ 0.1 pc.

Ce résultat fournit un deuxième indice sur leur origine. Le diamètre uniforme des filaments se rapproche d'une autre échelle caractéristique connue depuis le début des années 80 : celle en dessous de laquelle les mouvements désordonnés correspondant à ce qu'on appelle la turbulence interstellaire (voir p. 21) deviennent plus lents que la vitesse du son. En comparant ces observations avec plusieurs modèles théoriques, l'équipe du « relevé de la Ceinture de Gould » avec Herschel en a conclu que les filaments observés sont probablement le résultat direct de mouvements de compression turbulents à grande échelle.

Le rôle central des filaments interstellaires

Les images d'Herschel ont aussi permis d'établir, pour la première fois, un lien direct entre la texture filamentaire du milieu interstellaire froid et le mécanisme de formation des « coeurs pré-stellaires ». Ce sont des globules ou condensations de matière froide dans les nuages interstellaires, qui, en s'effondrant sur eux-mêmes sous l'effet de leur propre poids, donnent naissance à des protoétoiles. L'un des objectifs principaux du « relevé de la Ceinture de Gould » consistait justement à recenser tous les coeurs pré-stellaires et protoétoiles dans les nuages les plus proches afin d'étudier leur courbe démographique et d'essayer de mieux comprendre l'origine de la distribution en masse des étoiles.

Dans les nuages proches de la Ceinture de Gould, ont été recensés des milliers de coeurs pré-stellaires et plusieurs centaines de protoétoiles, dont plus des trois quarts sont distribués le long des filaments les plus denses (Fig. 2), au-dessus d'un seuil critique d'environ $15 M_\odot$ par parsec exprimé en masse par unité de longueur des filaments. Cette valeur s'interprète comme le seuil au-dessus duquel les filaments deviennent gravitationnellement instables et se fragmentent sur leur longueur à une température d'environ 10 K. Ce même seuil est observé dans tous les nuages contenant un grand nombre de coeurs pré-stellaires. La turbulence interstellaire n'est donc pas suffisante pour former des étoiles. Un ingrédient



supplémentaire - la force de gravité - est nécessaire pour fragmenter les filaments les plus denses et conduire à la formation de coeurs pré-stellaires puis de protoétoiles.

Vers un scénario « universel »

En recoupant ces résultats avec d'autres observations et des modèles théoriques, un scénario en deux étapes pour la formation des étoiles de type solaire a été bâti :

- dans un premier temps, une série de compressions multiples associée à des mouvements « turbulents » supersoniques à grande échelle engendre un enchevêtrement complexe de filaments dans chaque nuage interstellaire ;
- dans un second temps, la gravité prend le dessus et fragmente les filaments les plus denses en coeurs pré-stellaires, qui se transforment en protoétoiles puis en étoiles comme le Soleil.

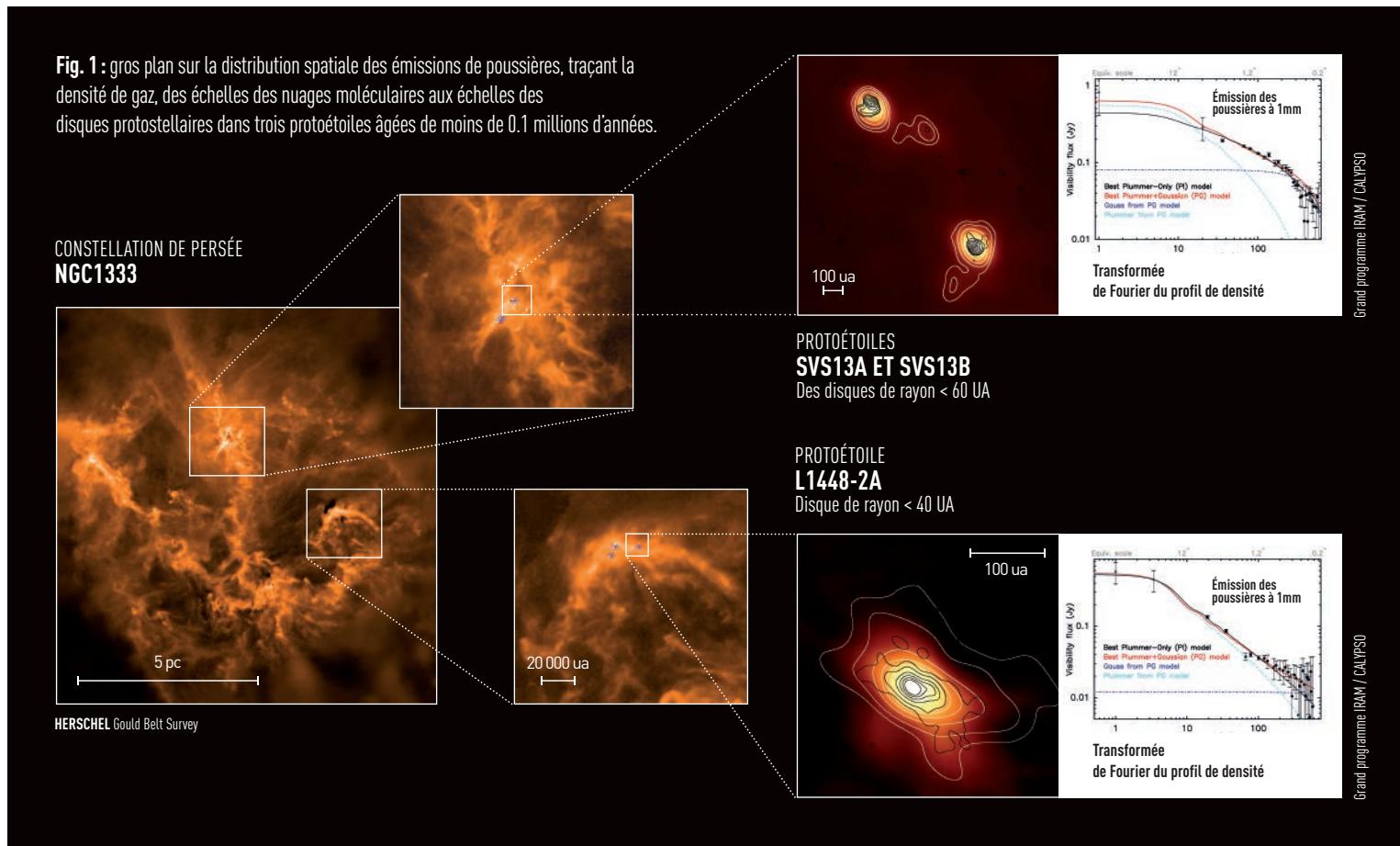
Les filaments interstellaires et les coeurs pré-stellaires apparaissent donc comme les « briques de base » de la naissance des étoiles. Et la masse par unité de longueur des filaments serait le paramètre critique qui contrôle la formation des étoiles à l'échelle du parsec.

Même si de nombreux détails restent mal compris, ce scénario fournit une piste très sérieuse pour expliquer l'origine de la masse caractéristique des étoiles et l'efficacité remarquablement uniforme de la formation des étoiles dans le gaz moléculaire dense des galaxies. Il postule que la masse caractéristique des étoiles résulte directement de la masse caractéristique de fragmentation des filaments et que la « micropysique » du processus de fragmentation joue un rôle « universel » pour réguler l'efficacité de la formation des étoiles dans le gaz moléculaire dense des galaxies comme notre Voie Lactée. ■

PERSPECTIVES

De nouveaux instruments devraient permettre des progrès décisifs dans les prochaines années. En combinant des observations avec la caméra submillimétrique ArTéMiS, dont le pouvoir de résolution angulaire est 3,5 fois meilleur qu'Herschel, à celles à encore plus haute résolution angulaire du grand interféromètre ALMA, on devrait pouvoir tester l'universalité de ce scénario au-delà des nuages proches de la Ceinture de Gould et élucider le rôle des filaments dans la formation des étoiles massives.

Quant au champ magnétique, les données obtenues avec le satellite Planck soulignent déjà son importance. Mais leur résolution angulaire n'est pas suffisante pour sonder l'intérieur des filaments et comprendre le rôle du champ magnétique. La très bonne résolution et la sensibilité sans précédent de B-BOP, l'imageur polarimétrique du télescope spatial SPICA proposé comme mission M5 de l'ESA, le permettra.



Au cœur des disques protoplanétaires

Depuis une quinzaine d'années, la recherche d'exoplanètes a été très fructueuse (voir p. 16), suggérant que la plupart des étoiles abritent des cortèges planétaires. Ces planètes sont la plupart du temps alignées dans un plan autour de leur étoile hôte (plan de l'écliptique dans notre propre système solaire), poussant les astrophysiciens à spéculer qu'elles se seraient formées dans des disques dits d'accrétion.

Formés de gaz et de poussière, ces disques sont en rotation autour des jeunes étoiles et sont le résidu de la matière ayant formé l'étoile. Pour élucider les circonstances exactes de leur formation et de leur évolution, l'étude des étoiles les plus jeunes de notre galaxie, encore appelées protoétoiles, a été entreprise. C'est d'une importance primordiale pour caractériser les mécanismes permettant de transformer le gaz du milieu interstellaire en étoiles mais aussi pour mieux

reconstituer l'origine de notre propre système solaire.

Les équipes du DAp travaillent en particulier à analyser l'émission thermique de la poussière et des molécules contenues dans le gaz circumstellaire constituant les plus jeunes protoétoiles en phase de formation, dites objets de « Classe 0 », découverts dans ce même département il y a une trentaine d'années. Des études démographiques des populations de protoétoiles (Fig. 1) menées avec des télescopes au

CONTRIBUTEURS

(Direction de la recherche fondamentale)



Anaëlle Maury est astrophysicienne au Département d'astrophysique (DAp-AIM) du CEA.



Eric Pantin est astrophysicien au Département d'astrophysique (DAp-AIM) du CEA.



Patrick Hennebelle est astrophysicien au Département d'astrophysique (DAp-AIM) du CEA.



« La comparaison des observations et des simulations numériques de formation des étoiles ont permis aux chercheurs du DAp de suggérer que l'effet du champ magnétique pourrait être un processus physique clé pour expliquer les étapes précoce de formation des disques protoplanétaires. »

sol et le télescope spatial Herschel, ont permis aux chercheurs du DAp de montrer que ces objets sont âgés de seulement quelques dizaines de milliers d'années, suggérant qu'ils conservent encore la mémoire des conditions initiales de leur formation et peuvent donc nous renseigner sur les toutes premières étapes de la formation des étoiles et des disques protoplanétaires.

En raison de leur très faible température et de leur enfouissement au cœur de cocons de matière, ces protoétoiles n'émettent pas de lumière visible mais un rayonnement submillimétrique, observable par des radiotélescopes. Les premières phases de formation des disques sont encore mal comprises car leur observation nécessite de pouvoir détecter leur faible rayonnement et le distinguer de l'émission provenant de l'enveloppe de matière circumstellaire qui alimente la protoétoile, ce qui revient à sonder des régions d'une centaine d'unités astronomiques autour des protoétoiles les plus proches situées à une centaine de parsecs. Des études menées avec les instruments les plus performants disponibles actuellement dans ces domaines de longueurs d'onde (interféromètres tels qu'ALMA ou NOEMA) ont permis de confirmer l'existence d'embryons de disques protoplanétaires autour de ces très jeunes protoétoiles, suggérant que la formation du disque est concomitante à la phase de formation de la protoétoile. Néanmoins, ces observations ont montré que ces embryons semblent se former à des échelles bien plus petites (rayons < 60 unités astronomiques) que celles prédictes par les modèles hydrodynamiques de l'effondrement des coeurs protostellaires.

Pour interpréter ces observations, il est nécessaire de développer des modèles théoriques reposant sur les principes fondamentaux de la physique. Ainsi, des simulations numériques (Fig. 2) résolvant les équations de l'hydrodynamique sont-elles réalisées en intégrant un grand nombre de processus tels que la gravité, le champ magnétique ou encore la radiation.

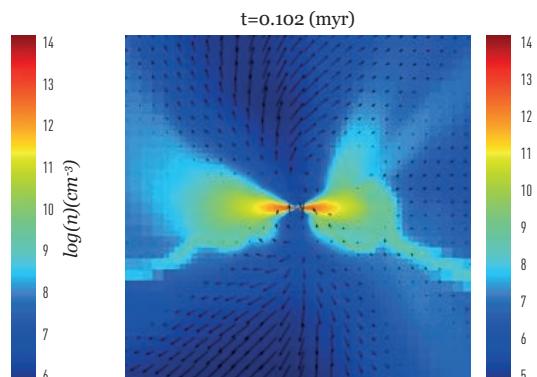
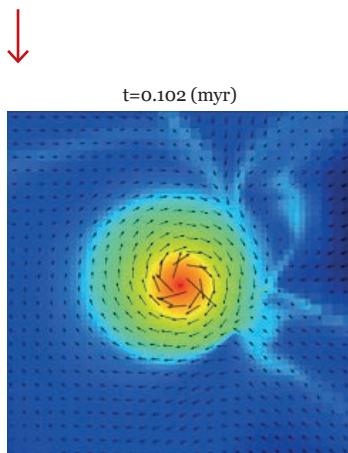
La comparaison des observations et des simulations numériques de formation des étoiles ont permis aux chercheurs du DAp de suggérer que l'effet du champ magnétique pourrait être un processus physique clé pour expliquer les étapes précoce de formation des disques protoplanétaires. De nombreux défis restent à relever pour mieux caractériser les propriétés de ces premiers embryons de disques, au sein desquels les premiers planétésimaux pourraient avoir commencé à se former : de nouvelles contraintes décisives seront obtenues dans la prochaine décennie grâce aux recherches menées avec l'interféromètre submillimétrique ALMA et le télescope spatial infrarouge JWST.

Ces disques protostellaires voient leurs grains de poussière grossir : les observations suggèrent qu'après environ un million d'années, lorsqu'ils entrent dans la phase dite protoplanétaire (ou classe II), les premiers petits embryons de planétésimaux sont déjà formés. Les résultats les plus récents semblent même indiquer que les planètes les plus massives pourraient déjà avoir été formées à ce stade ou, du moins, seraient entrées dans les phases finales de leur formation.

Durant la phase protoplanétaire qui dure 10 millions d'années environ, les grains de poussière et planétésimaux vont migrer dans le disque. Cette migration est imposée par le gaz qui, tournant légèrement moins vite que la poussière autour de l'étoile, freine les grains par frottement visqueux. Plus les grains sont gros (c'est-à-dire 1 μm et au-delà), plus ils vont sombrer rapidement depuis les couches externes vers le plan médian (sédimentation) et se rapprocher de l'étoile. Les modèles numériques montrent que ce phénomène physique est très rapide, bien plus rapide que la formation de planètes. Mais alors comment cette migration peut-elle être ralentie voire stoppée afin que la formation planétaire ait le temps de se mettre en place ? Plusieurs hypothèses sont à l'étude, dont la prometteuse théorie de « back-projection », c'est-à-dire la constitution d'une telle concentration de poussières que la physique du frottement est « inversée ».

Dès les années 1990, il a été remarqué que certains disques de cette classe présentaient un spectre infrarouge atypique, avec un déficit d'émission entre 2 et 20 μm . Ce déficit a été interprété dans un premier temps, puis confirmé grâce à l'imagerie à haute résolution angulaire, comme étant dû à la présence

Fig. 2 : simulation numérique d'un disque protostellaire. Les deux figures représentent des coupes de densité, vues de face à gauche et vues de profil à droite. Les flèches représentent le champ de vitesse. Au-dessus et en dessous du disque, des jets de matière sont émis. Ce processus dit d'accrétion-éjection joue un rôle important en astrophysique.



d'un vide de matière dans les régions centrales. Ces vides ont des tailles variables allant des quelques UA jusqu'à la centaine d'UA. Ce type de disque a été appelé « disque de transition » (Fig. 3) : ils font la transition entre les disques primordiaux continus et les disques plus évolués, ont perdu une grande partie de leur masse et sont également plus structurés. La raison physique de l'apparition de ces vides internes avec l'âge du système reste aujourd'hui inconnue. Plusieurs théories sont évoquées pour l'expliquer : photo-évaporation (érosion par le rayonnement énergétique de l'étoile) progressive du disque ; accumulation de la matière en planètes devenues indétectables car trop petites ; piégeage dans des maxima de densité créées par des planètes, des particules de poussières lors de leur migration radiale.

Une étude plus poussée a montré qu'à un âge compris entre 6 et 8 millions d'années, 20 % des disques protoplanétaires sont de type transitionnel. On suppose aujourd'hui que cette phase, même si elle ne dure que $\sim 100\ 000$ ans, fait partie de l'évolution naturelle d'un disque typique et constitue les premières phases de ce qu'on appelle la dissipation du disque.

Les vides de matière interne sont loin d'être les seules structures présentes dans les disques, comme l'imagerie à très haute résolution angulaire, par exemple avec l'instrument VLT/SPHERE (Fig. 4), l'a montré. Structures spirales, sillons et condensations azimutaux sont pléthores : il n'existe quasiment

Fig. 3 :
schéma de disque de transition
(en bas) en regard
d'un disque primordial (en haut).

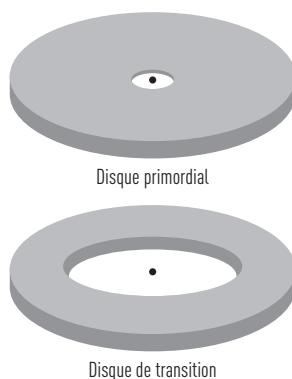


Fig. 4 :
divers disques protoplanétaires observés
dans l'infrarouge en très haute
résolution angulaire grâce à l'optique
adaptative (VLT/SPHERE) et leurs
différents types de structures : vides de
matière, sillons, spirales. Pour référence
d'échelle, les tailles de notre système
solaire et du système planétaire autour
de HR8799 sont montrées.

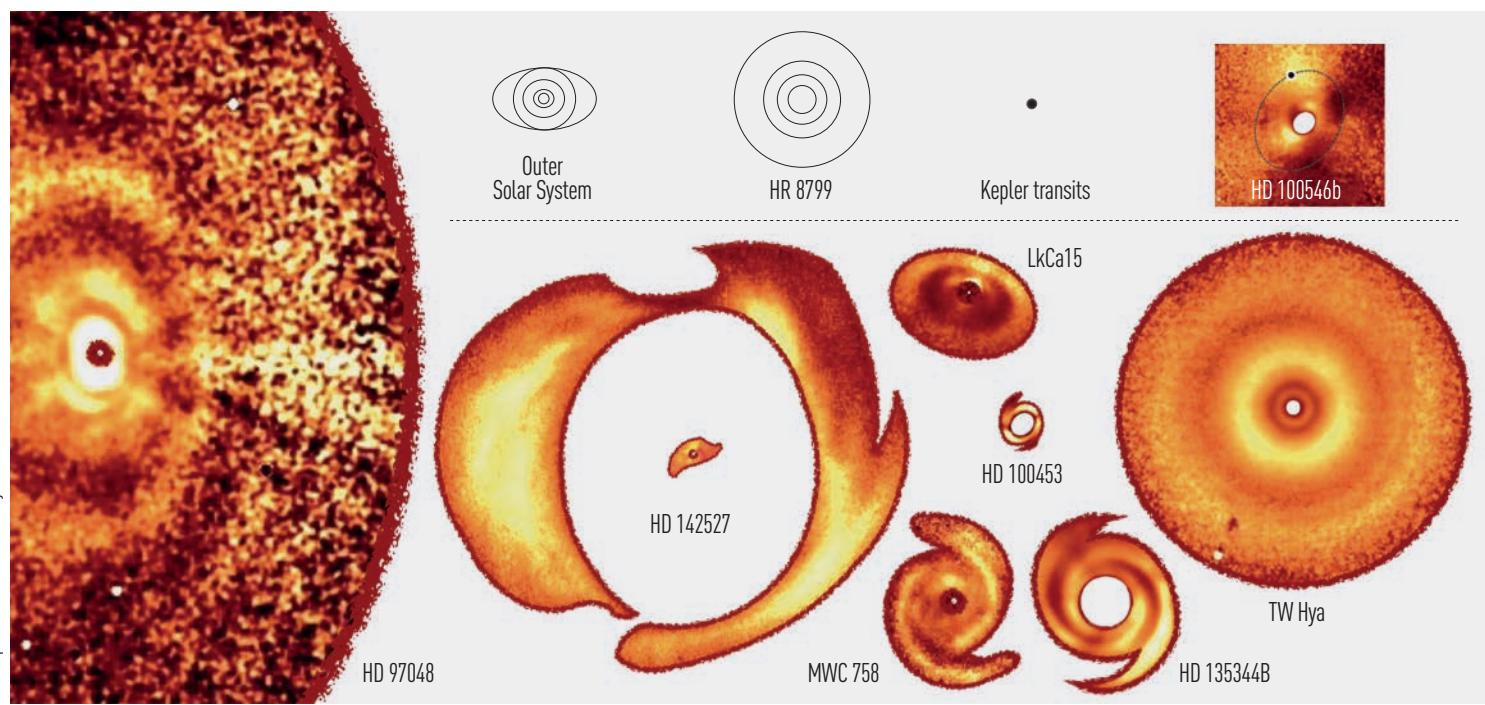


aucun disque ne montrant aucune structuration radiale ou azimutale !

L'origine de ces structures reste largement débattue, même si l'hypothèse de la planète massive déformant le disque via gravitation et résonances mécaniques reste la plus évoquée. En outre, il semble, mais cela reste à confirmer, que les disques les plus jeunes aient de préférence des structures de type sillons alors que les structures spirales apparaissent plus tardivement, à partir d'environ 8 millions d'années.

Mais quand et comment se forment les planètes dans ces disques ? Pour répondre à cette question, il faut détecter un nombre assez grand de planètes en formation et étudier leurs caractéristiques. Malgré les efforts considérables entrepris dans le domaine, il n'a été possible à ce jour que de détecter deux à trois planètes, sous réserve de confirmation de ces résultats. Pourquoi les planètes en formation sont-elles si difficiles à détecter, alors qu'on en détecte autant autour des étoiles plus âgées ? Cela reste aujourd'hui un mystère !

Le CEA a été un acteur important dans le domaine de l'étude des disques protoplanétaires. Sa contribution va se poursuivre avec les instruments JWST/MIRI à l'horizon 2021 et E-ELT/METIS en 2026. Étant donné ses performances en termes de sensibilité et de résolution angulaire, METIS sera notamment en parfaite synergie avec les observations obtenues avec ALMA. ■

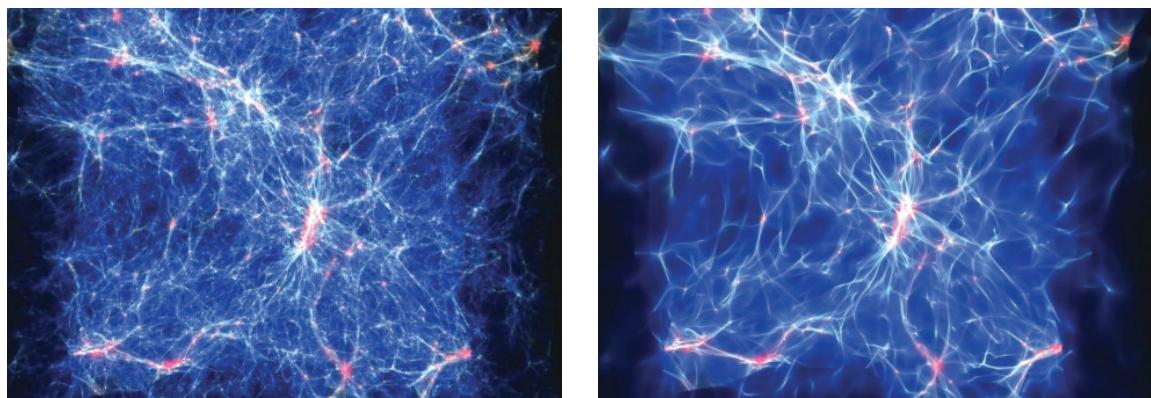


COSMOLOGIE ET ÉVOLUTION DES GALAXIES

Depuis les échelles des galaxies à celles des très grandes structures de l'Univers, en passant par les amas de galaxies, la cosmologie vise à élaborer un scénario permettant de remonter aux origines des formes dans l'Univers et utilise l'Univers comme un laboratoire où tester les lois fondamentales de la physique ainsi que l'existence de composantes encore indétectables en laboratoire, comme la matière et l'énergie noires.



Fig. 1 : répartition de l'hydrogène intergalactique, tirée de simulations au TGCC pour une matière noire standard (gauche) ou composée de neutrinos stériles (droite). Le lissage des petites structures apparaît clairement dans ce deuxième cas.



Les implications cosmologiques des grands sondages de galaxies

La cosmologie a récemment connu des progrès considérables grâce aux grands sondages de galaxies ou de ténus filaments d'hydrogène omniprésents dans l'espace intergalactique, menés aux échelles de centaines de millions d'années-lumière. Ces études ont peu à peu affiné notre connaissance sur l'évolution de l'Univers, sur la nature de la matière noire ou sur la masse des neutrinos, et commencent même à apporter des contraintes sur de possibles modifications des lois de la gravité décrites jusqu'ici par le modèle de la relativité générale d'Einstein. Le CEA a fortement contribué à cette épopée et continue à jouer un rôle leader dans ce domaine sur le plan international.

La cartographie tridimensionnelle de la matière est la clef de voûte de ces découvertes. Elle est obtenue par le sondage spectroscopique de millions de galaxies et quasars avec les projets BOSS, eBOSS et prochainement DESI. Les deux coordonnées de chaque objet sur la voûte céleste sont complétées, pour la troisième dimension, par la mesure de son décalage spectral (ou redshift), d'autant plus élevé que l'objet est distant. L'objectif de ces cartes ? Y repérer l'empreinte laissée dans la distribution de la matière par la recombinaison des protons et des électrons dans l'Univers âgé de 380 000 ans. Il s'agit d'un excès de probabilité, appelé oscillations baryoniques acoustiques (BAO), de trouver deux galaxies séparées d'une distance caractéristique de 450 millions d'années-lumière. À haut redshift, les quasars sont utilisés comme phares cosmiques illuminant le milieu intergalactique. Le gaz d'hydrogène neutre qui s'y trouve imprime dans les spectres de ces quasars une succession de pics d'absorption appelée forêt Ly-alpha. Leur étude a permis au CEA d'obtenir la première mesure, encore aujourd'hui la plus précise, du taux d'expansion de l'Univers il y a environ 11 milliards d'années et a montré

la nécessité de l'existence d'énergie noire, indépendamment des contraintes imposées par le fond diffus cosmologique et les supernovæ. Dès les premières données, cette analyse a, par ailleurs, validé qu'à l'échelle de quelques milliards d'années-lumière, la répartition des galaxies retrouve l'homogénéité postulée par le principe copernicien sur lequel repose toute la cosmologie.

Les forêts Ly-alpha apportent, en outre, une information clef sur l'impact des particules légères dans l'Univers, comme nous l'avons démontré grâce à près de 15 millions d'heures de calcul au Très Grand Centre de Calcul du CEA à Bruyères-le-Châtel (Fig. 1) : les neutrinos et les particules de matière noire tiède ont tendance à lisser les structures aux échelles de quelques mégaparsecs. Obtenu par comparaison entre données et simulations, la limite supérieure de 0,12 eV sur la masse des neutrinos actifs et les contraintes sur la masse des neutrinos stériles ou d'axions sont parmi les plus fortes à ce jour.

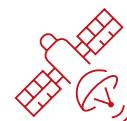
Aujourd'hui, les sondes se diversifient ; après l'observation des quasars et des galaxies, celle de galaxies jeunes permet d'explorer des époques encore inexploitées dans l'histoire de l'Univers. Les approches également se multiplient. Alors que la mesure des BAO fut l'objectif principal des grands sondages pendant près d'une décennie, celle des effets de distorsion gravitationnelle dus à l'effondrement de la matière sur les structures les plus denses permet d'aborder de nouvelles questions. Les redshifts des galaxies ont en effet deux contributions : le redshift cosmologique et une composante provenant de la vitesse particulière des astres. Ces distorsions portent la marque de la formation des structures et dépendent donc des lois de la gravité. Leur mesure précise permet ainsi de tester la relativité générale et de contraindre des modèles de gravité modifiée. ■

•
PAR
NATHALIE PALANQUE-DELABROUILLE

(Direction de la recherche fondamentale)



Nathalie Palanque-Delabrouille est physicienne au Département de physique des particules (Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers) du CEA.



«Aujourd'hui, les sondes se diversifient ; après l'observation des quasars et des galaxies, celle de galaxies jeunes permet d'explorer des époques encore inexploitées dans l'histoire de l'Univers.»

•

PAR
VALERIA PETTORINO

(Direction de la recherche fondamentale)



Valeria Pettorino est astrophysicienne au Département d'astrophysique (DAp-AIM) du CEA.

« Le CEA joue un rôle majeur dans les études galactiques destinées à mesurer le WL, du développement d'instruments à la reconstruction d'images de formes galactiques, en passant par l'interprétation de données. »



© Getty Images

L'origine de l'accélération cosmique : nouvelle énergie ou nouvelle physique ?

Déterminer la cause de l'accélération cosmique est l'un des grands défis de la cosmologie. S'agit-il d'une constante (Λ CDM) ou d'un nouveau fluide (énergie noire, DE) ? Existe-t-il une nouvelle force qui modifie la gravité telle que décrite par Einstein (gravité modifiée, MG) ?

Le CEA travaille sur l'analyse de l'énergie noire et de la gravité modifiée dans le cadre de la mission Planck de l'Agence spatiale européenne (ESA) qui a mesuré le rayonnement du fond diffus cosmologique (CMB), la lumière émise 380 000 ans après le Big Bang. Dans la publication finale des données [1], nous avons actualisé [2] et testé différents scénarios combinant les résultats de Planck à d'autres jeux de données (Fig.1).

Le trajet de la lumière issue d'une galaxie lointaine est dévié par la présence de matière noire : ce phénomène provoque une distorsion (cisaillement cosmique) de l'image de la galaxie observée. Mesurer ce cisaillement peut permettre de reconstruire la

matière noire, c'est-à-dire la lentille qui dévie la lumière. Cet effet de « lentille gravitationnelle » est étudié statistiquement, car la déflexion est généralement infime (effet gravitationnel faible, WL). De leur côté, l'énergie noire et la MG affectent la lentille gravitationnelle et la forme de son potentiel gravitationnel. Le WL est donc également une puissante sonde pour tester l'énergie noire et la gravité modifiée.

Le CEA joue un rôle majeur dans les études galactiques destinées à mesurer le WL - du développement d'instruments à la reconstruction d'images de formes galactiques, en passant par l'interprétation de données. Il a participé au télescope Canada-France-Hawaii (TCFH) en fabriquant la caméra MegaCam, qui a permis de déterminer la fraction de

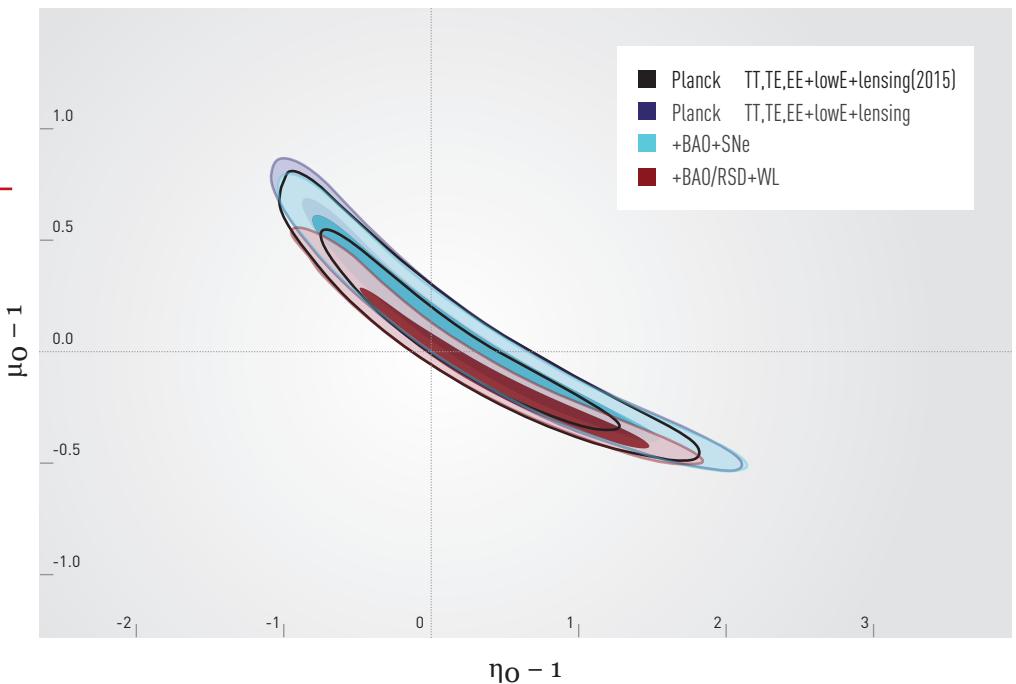


Fig. 1 : [1]

Résultat de l'analyse finale de Planck testant les fonctions μ, η : les deux sont de 1 dans le modèle Λ CDM (intersection des lignes pointillées).

Toute détection d'une déviation par rapport à 1 indiquerait un écart par rapport à la théorie standard de la gravité.

Les contours colorés représentent une probabilité de 95 % des valeurs des paramètres pour cadrer avec l'ensemble de données correspondant.

Les résultats sont conformes au modèle Λ CDM.

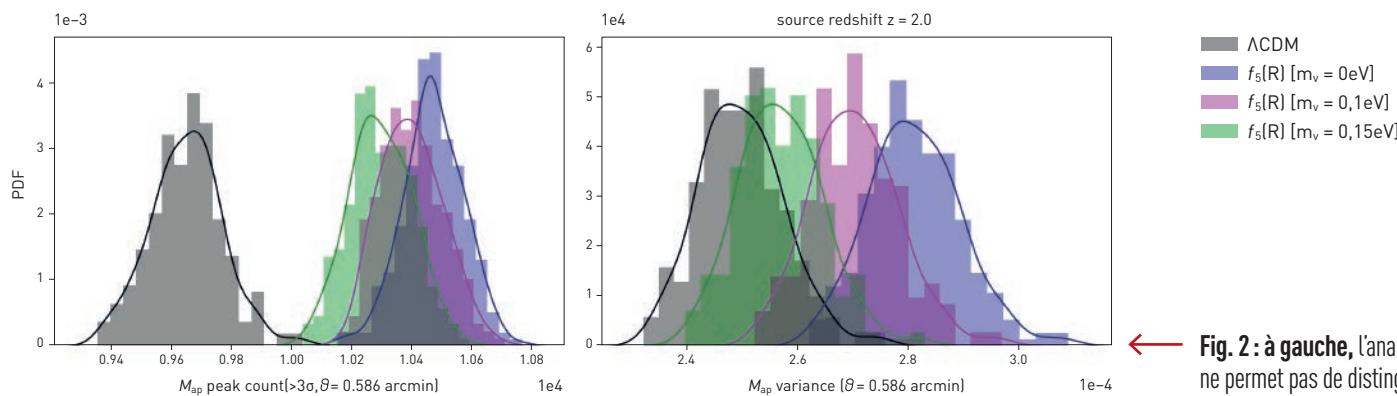


Fig. 2 : à gauche, l'analyse WL standard ne permet pas de distinguer Λ CDM (en gris) et MG (différents modèles en couleur).

À droite, Nous avons identifié une observable WL différente (pics) pouvant convenir [6].

matière noire et d'énergie noire remontant jusqu'à 8,8 milliards d'années dans le passé [3 - 4]. Nous apportons une contribution essentielle au télescope spatial Euclid de l'ESA qui sera lancé en 2022 - du développement technologique à l'exploitation scientifique des données. La combinaison du WL et d'autres sondes, comme les amas de galaxies et le CMB, constitue également un défi : à ce titre, le CEA dirige le groupe de travail chargé de cette combinaison dans le cadre de la mission Euclid.

Nous avons notamment extrait des informations à partir de données de WL, indécelables dans les analyses classiques. En voici quelques exemples représentatifs. Nous avons démontré à l'aide d'un nouvel algorithme, que nous avons rendu public, que l'existence proposée d'une concentration de matière noire dans l'amas Abell 520 n'était pas réelle. Si elle avait été confirmée, cette concentration aurait été incompatible avec l'hypothèse classique de matière non collisionnelle. Nous avons également abordé la question suivante [6] : les cartes de cisaillement

gravitationnel nous permettent-elles de distinguer les effets d'une constante cosmologique de ceux de la gravité modifiée ? Nous avons réussi à identifier la signature la plus efficace pour réaliser cette distinction entre les différents modèles théoriques (il s'agit du comptage de pics, Fig.2). Nous avons en outre montré que les réseaux neuronaux convolutifs améliorent notre capacité à distinguer une constante cosmologique des théories de gravité modifiée, mettant en évidence une nouvelle application du machine learning en cosmologie [7].

Ces résultats montrent combien le choix de la bonne observable statistique joue un rôle crucial dans l'interprétation des données et dans l'obtention, avec les mêmes données, d'une découverte ou non. Enfin, le CEA codirige le programme Canada-France Imaging Survey (CFIS), lancé en 2017, nécessaire pour dériver les redshifts photométriques dans le cadre de la mission Euclid, c'est-à-dire déterminer la distance des galaxies observées et reconstruire l'expansion de l'Univers. ■

- [1] <https://arxiv.org/abs/1807.06209>
- [2] <https://arxiv.org/abs/1502.01590>
- [3] <https://arxiv.org/abs/1708.06356>
- [4] <https://academic.oup.com/mnras/article/430/3/2200/981767>
- [5] <https://arxiv.org/abs/1708.00269>
- [6] <https://arxiv.org/abs/1805.05146>
- [7] <https://arxiv.org/abs/1810.11030>

•

PAR GABRIEL PRATT

(Direction de la recherche fondamentale)



Gabriel Pratt est astrophysicien au Département d'astrophysique (DAP-AIM) du CEA.

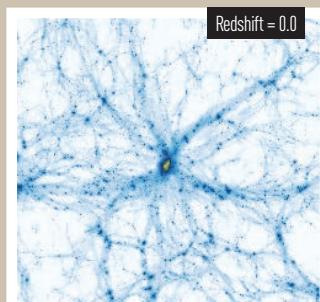
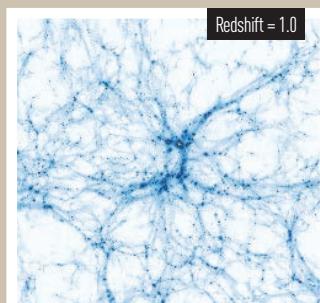
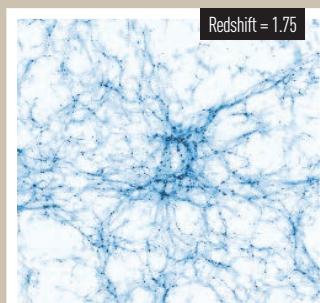


Fig. 1: sur ces images issues d'un programme de recherche du CEA réalisé sur les moyens de calcul de GENCI, nous observons la distribution de la matière noire d'un amas massif de galaxies en train de s'effondrer lentement sous l'influence de la gravité. Les redshifts de 1,75 et 1,0 correspondent respectivement à 10 et 8 milliards d'années en arrière, tandis que le redshift de 0,0 correspond à l'époque actuelle.

Les amas de galaxies, laboratoires pour la physique

Lorsque la densité de matière dans une région donnée de l'Univers devient suffisamment élevée, elle se dissocie de l'expansion et commence à subir un effondrement gravitationnel. Ce processus hiérarchique a conduit à la formation d'étoiles, de galaxies, de groupes de galaxies et, enfin, des premiers amas de galaxies à un redshift^[1] d'environ 2, quand l'Univers n'avait environ qu'un quart de son âge actuel.

Depuis lors, les amas se sont développés par accrétion continue de matière le long des filaments qui tracent la structure en mousse de la « toile cosmique ». Situés à l'intersection de ces filaments, ils représentent la manifestation la plus récente de la formation hiérarchique de la structure.

Les amas peuvent contenir des milliers de galaxies, mesurer des millions d'années-lumière et afficher une masse totale pouvant atteindre un milliard de millions (10^{15}) de fois celle du Soleil. Leur composition reflète celle de l'Univers : 85 % de leur masse est composée de matière noire, qui ne peut être détectée qu'indirectement et seuls les 15 % restants de la masse sont visibles. Les galaxies représentent moins de 3 % de la masse totale d'un amas : la masse visible est dominée par un plasma raréfié qui remplit l'espace entre les galaxies. Ce milieu intra-amas (intra-cluster medium, ICM) est exceptionnellement chaud (plus de 10 millions de degrés) et se refroidit par émission de photons dans le domaine des rayons X. L'interaction des photons du fond diffus cosmologique (CMB) avec l'ICM produit l'effet Sunyaev-Zel'dovich (distorsion spectrale du CMB dans la direction d'un amas).

Les observatoires spatiaux du rayonnement X, tels que XMM-Newton et Chandra, produisent des images de l'émission de rayons X, ce qui permet d'obtenir des cartes précises de la distribution de la densité de gaz. Par ailleurs, le spectre du rayonnement X peut être mesuré pour déterminer la température du gaz sur l'ensemble de l'amas. Dans un amas en équilibre, la force gravitationnelle due à la matière noire est compensée par la pression du gaz. À partir de là, les équipes du CEA ont obtenu des mesures précises de la distribution de la matière noire dans les amas à un redshift de 1, soit il y a environ 8 milliards d'années. Ces profils de matière noire présentent une densité piquée au centre,

comme le prédisent les simulations numériques cosmologiques et sont étonnamment similaires à ceux qu'on observe dans les objets de l'époque actuelle. Parallèlement, une vaste campagne de simulations numériques conduite par les équipes du CEA a révélé la remarquable stabilité de la distribution de la matière noire au cours du temps cosmique (Fig. 1).

La plus grande partie de l'accrétion qui stimule la croissance des amas est « au repos », mais des fusions occasionnelles se produisent entre des objets de masse similaire. Cette coalescence d'amas convertit l'énergie cinétique en énergie thermique, ce qui donne lieu aux événements les plus énergétiques de l'Univers depuis le Big Bang. Des ondes de choc de plusieurs milliers d'années-lumière, progressant à des milliers de kilomètres par seconde, sont projetées dans le plasma de l'ICM, chauffant le gaz et générant des mouvements de masse et de turbulence pouvant durer plus d'un milliard d'années.

La spectroscopie des rayons X à haute résolution offre la possibilité de détecter directement les mouvements de masse et de turbulence dans le plasma de l'ICM en mesurant le déplacement et l'élargissement des raies spectrales d'émission. À terme, nous espérons mesurer ces quantités avec précision grâce aux microcalorimètres à haute résolution actuellement développés pour le spectromètre X-IFU (X-Integral Field Unit) destiné à ATHENA, la mission spatiale de prochaine génération de l'ESA dans le domaine des X, dans laquelle le CEA joue un rôle majeur. Les milliers de détecteurs de l'instrument X-IFU cartographieront à des échelles spatiales sans précédent le champ de vitesses du plasma de l'ICM engendré dans les amas de galaxies lorsqu'ils fusionnent ensemble. Cela nous permettra de relier ces mouvements turbulents à l'ensemble de la « toile cosmique » et d'offrir une perspective inégalée sur la physique du plasma de l'ICM lors de ces événements extrêmes. ■

[1] Dans un Univers en expansion, les objets s'éloignent de l'observateur, ce qui fait que leur spectre évolue progressivement vers des énergies d'autant plus faibles que ces objets sont lointains. Le décalage vers le rouge cosmologique (redshift) d'un objet est une mesure de ce décalage spectral. Il peut être directement lié à l'âge de l'objet émetteur.

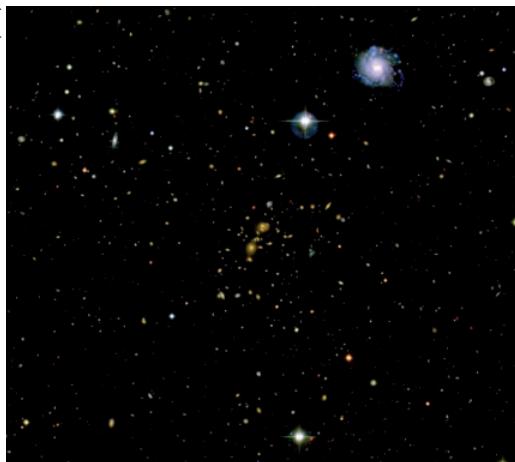


Fig. 1 : image en lumière visible (à gauche) et en rayons X (à droite) de l'amas XLSSC006, situé à une distance d'environ 4,5 milliards d'années-lumière de la Terre. Le halo lumineux rose (fausse couleur) code l'intensité du rayonnement X émis par le gaz chaud de l'amas.

Grands sondages d'amas de galaxies et cosmologie

Les amas de galaxies sont des concentrations de galaxies regroupant de quelques dizaines à quelques milliers d'entre elles. Paradoxalement, les galaxies ne constituent que quelques pourcents de la masse des amas. Un gaz diffus occupe l'espace entre les galaxies : chauffé à des températures de plusieurs dizaines de millions de degrés, celui-ci émet des rayons X (Fig. 1). L'étude du mouvement des galaxies dans les amas implique l'existence d'une troisième composante - la fameuse « matière noire » - mais comme celle-ci n'émet pas de lumière, on ne sait rien de précis sur sa nature, d'où son nom. Elle constitue 80 % de la masse des amas, contre 15 % pour le gaz X et 5 % pour les galaxies.

Les amas de galaxies sont les plus grandes entités cosmiques. Ils se sont formés sous l'action combinée de la gravité et de l'expansion de l'Univers (Fig. 2). Les premiers amas apparaissent environ 3 milliards d'années après le Big Bang, à une époque où l'accélération de l'expansion devient dominante. La comparaison des propriétés des amas à différentes époques cosmiques nous permet donc de tester les modèles cosmologiques : selon que l'Univers est plus ou moins dense, et l'expansion plus ou moins rapide, on trouvera des amas plus ou moins massifs à une époque donnée. Ainsi, les amas nous permettent de tester à la fois les théories de la gravitation, les propriétés de la matière noire et la géométrie de l'Univers. Il s'agit donc de recenser la population des amas en fonction du temps, donc de leur distance. On peut entreprendre des relevés couvrant une

grande partie du ciel dans les domaines visible ou infrarouge, afin de détecter les concentrations de galaxies. Mais l'opération est compliquée par la superposition des galaxies des amas avec les autres galaxies sur la sphère céleste, ce qui brouille l'information provenant de régions situées à différentes distances. On leur préfère donc les relevés dans la bande X, car une source étendue signale de façon univoque la présence d'un amas de galaxies : les grandes quantités de gaz chaud ne se trouvent que dans les amas, ce qui réduit considérablement les effets de superposition.

Pour pouvoir comparer les observations avec les prédictions des modèles cosmologiques, il faut relier la luminosité X des amas à leur masse et estimer comment elle évolue au cours du temps. En effet, si on détecte plus d'amas que prévu, ce n'est pas nécessairement parce qu'ils sont plus nombreux, mais peut-être parce qu'ils sont plus lumineux que prévu ! C'est grâce aux simulations numériques qu'il est possible de modéliser conjointement la formation des amas et l'évolution du gaz (voir p. 32). Les premiers résultats d'analyse cosmologique d'amas de galaxies détectés par l'observatoire de XMM de l'ESA ont été obtenus par le projet XXL du DAP [1]. ■

•
PAR
MARGUERITE PIERRE

(Direction de la recherche technologique)



Marguerite Pierre est astrophysicienne au Département d'astrophysique (DAP-AIM) du CEA.



Fig. 2 : évolution de la structure de l'univers. Simulation numérique de la composante gazeuse dans un cube de 300 millions d'années-lumière de côté. Le contraste de densité augmente au cours du temps et les premiers amas apparaissent à l'intersection des filaments vers 3 milliards d'années. Aujourd'hui, certains amas sont très massifs (10^{15} masses solaires, au centre du cube).

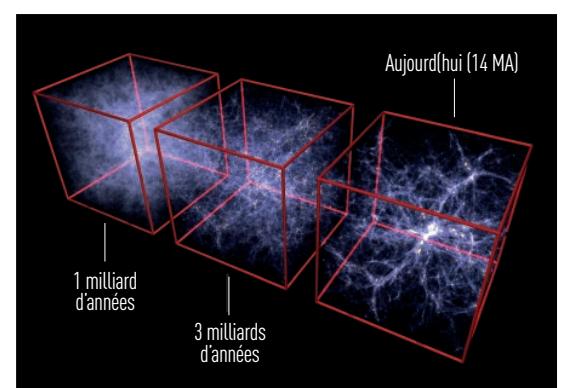




Fig. 1 : image RVB obtenue par le télescope spatial Hubble de l'un des amas les plus lointains connus (CL-1449 ; Gobat et al. 2011). Les galaxies de l'amas, principalement dans le quart inférieur gauche de l'image, se distinguent par leurs couleurs les plus rouges.



© Hubble Space Telescope WF3 Camera (Strazzullo et al., ApJ, 2016)

.

PAR

EMANUELE DADDI

(Direction de la recherche fondamentale)



Emanuele Daddi est astrophysicien au Département d'astrophysique (DAP-AIM) du CEA.

Observer la formation et l'évolution de la première génération d'amas de galaxies

L'identification des amas de galaxies les plus lointains est un sujet de recherche très actif dans le monde entier et au CEA (Fig. 1) pour étudier les processus physiques clés de la formation des galaxies et de la cosmologie.

Environ 3 à 4 milliards d'années après le Big Bang, la formation des étoiles et la croissance des trous noirs atteignent leur pic d'activité (par ex., Madau & Dickinson, 2014). C'est également l'époque où les galaxies les plus actives occupent le centre des structures à grande échelle, alors que dans l'Univers local, elles les évitent (par ex., Elbaz et al. 2007). Ces structures à grande échelle ne sont pas faciles à distinguer des véritables amas, qui sont gravitationnellement liés à l'intérieur d'un seul halo massif de matière noire (lire la discussion dans Diener et al. 2015) et des proto-amas, surdensités plus faibles de plusieurs millions d'années-lumière, qui abritent de multiples halos de matière noire (Chiang et al. 2013 ; Muldrew et al. 2015). Cette distinction, en apparence triviale, est pourtant extrêmement difficile dans l'Univers très lointain. En effet, seuls deux véritables amas sont

connus dans l'Univers primitif grâce à un signal clair d'effondrement gravitationnel (« virialisation »), détecté sous la forme d'un gaz chaud intergalactique émettant un rayonnement X. Tous deux ont été découverts par des groupes du CEA, y compris l'amas le plus lointain actuellement connu, CL 1001, observé seulement 2,5 milliards d'années après le Big Bang (Wang et al. 2016). Cette situation changera radicalement d'ici dix ans, lorsque la mission ATHENA de l'ESA, dont le lancement est prévu en 2034, détectera ce signal dans les premières structures.

Parallèlement, nous étudions au CEA la possibilité d'utiliser le réseau d'antennes millimétriques ALMA (Atacama Large Millimeter Array) pour détecter le gaz chaud par le biais de son impact sur le fond diffus cosmologique (effet Compton inverse) par l'effet Sunyaev-Zel'dovich. Les premiers résultats, prometteurs, sont en cours d'analyse.

La première génération d'amas est essentielle pour tester les théories de croissance des structures, donc notre modèle cosmologique, et étudier les sites de formation des galaxies les plus massives, comme les elliptiques locales, dont l'origine reste controversée. Pour devenir elliptiques, les galaxies doivent avoir subi une transformation au cours de laquelle elles ont perdu leur disque, sont devenues sphéroïdales et ont cessé de former des étoiles. Il n'est pas clairement établi si ce phénomène se produit avant ou après leur entrée dans le cœur des amas. En outre, les amas à haut redshift sont intéressants pour l'étude de deux phénomènes passionnants et encore mystérieux (Fig. 2). Premièrement, nous savons qu'une certaine énergie a été injectée dans le milieu intergalactique pendant la formation des amas actuels, mais son origine demeure incertaine. Nous

commençons aujourd'hui à étudier ce processus en action. Deuxièmement, la formation des amas devrait présenter des preuves de l'accrétion de gaz froid, carburant de la croissance des galaxies, issu de l'environnement à grande échelle. Ce phénomène, prédict par la théorie mais qui n'a pas encore été observé, est crucial pour comprendre la formation des galaxies.

Cet âge des premiers efforts exploratoires héroïques s'achèvera bientôt, lorsque la mission Euclid dévoilera de grands échantillons de la première génération d'amas, que le télescope SKA (Square Kilometer Array) retracera la distribution et la concentration de l'activité dans les galaxies, que les futures installations du VLT et de l'ELT fourniront de nombreux spectres et, bien sûr, qu'ATHENA mesurera leurs émissions de rayons X. Une révolution dans ce domaine devrait s'amorcer dans les 5 à 10 prochaines années. ■

« Cet âge des premiers efforts exploratoires héroïques s'achèvera bientôt. Une révolution dans ce domaine devrait s'amorcer dans les 5 à 10 prochaines années. »

© Keck/LRS/Valentino et al., ApJ, 2016

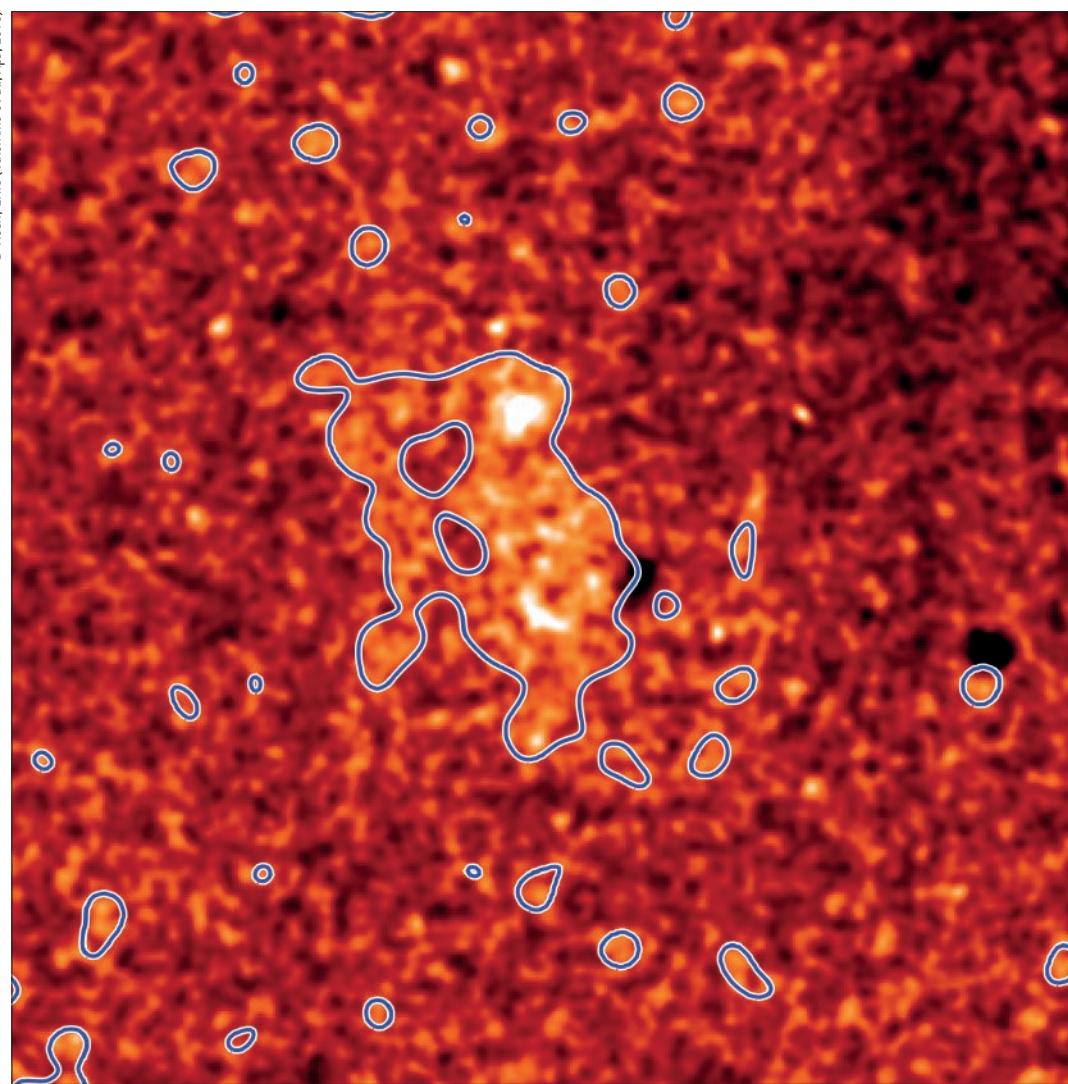


Fig.2 : carte des émissions d'hydrogène Lyman-alpha (Ly- α) dans la même structure que la fig. 1, découverte surprenante de gaz froid diffus issue de nos travaux CEA (Valentino et al. 2016) que nous continuons d'étudier, probablement liée aux deux phénomènes mystérieux mentionnés dans le texte (injection d'énergie et accrétion de gaz froid).

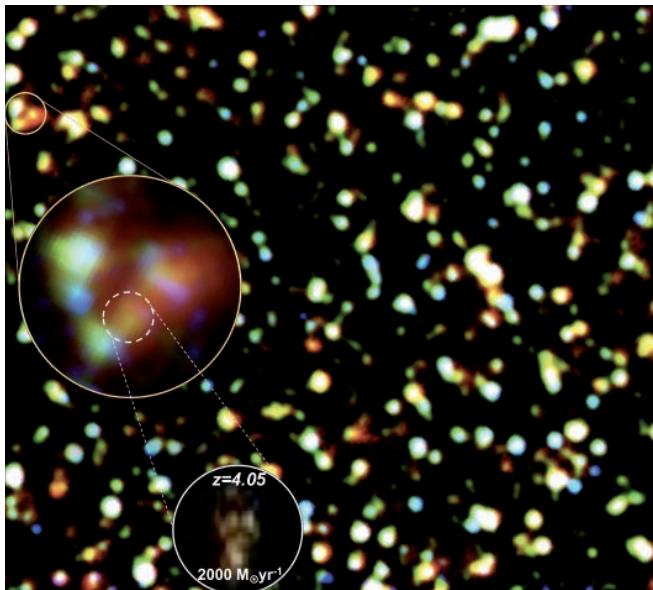
•
PAR DAVID ELBAZ

(Direction de la recherche fondamentale)



David Elbaz est astrophysicien au Département d'astrophysique (DAP-AIM) du CEA.

L'image du satellite Herschel présente une myriade de points lumineux qui sont autant de galaxies dont certaines forment 100 à 1000 fois plus d'étoiles que la Voie lactée, à l'instar de la galaxie située à un décalage spectral de $z=4.05$ dont la lumière qui nous arrive aujourd'hui fut émise 1,5 milliard d'années après le Big Bang et qui forme 2000 soleils par an ou un soleil toutes les 4 heures. L'image en zoom du satellite Hubble ressemble à une empreinte de patte, l'empreinte d'un dinosaure-galactique...



L'énigme de la formation des galaxies massives

Les galaxies les plus massives de l'Univers ne forment plus d'étoiles depuis plusieurs milliards d'années. Ces galaxies mortes - en prenant comme référence de vitalité d'une galaxie l'intensité avec laquelle elle forme de nouvelles étoiles - posent de nombreuses questions : qui sont leurs ancêtres ? Quand et comment ces galaxies « elliptiques » changèrent-elles de forme en perdant leur disque pour devenir sphéroïdales ? Pourquoi ne forment-elles plus d'étoiles et comment donnèrent-elles naissance à tant d'étoiles peu après le Big Bang ?

Comme il n'existe pas de galaxie aussi massive formant des étoiles, on a d'abord pensé que ces galaxies provenaient de la fusion de plus petites galaxies mortes. Le satellite Herschel de l'ESA, en particulier sa caméra PACS réalisée sous la maîtrise d'œuvre du CEA, bouleversèrent cette vision en découvrant une profusion de galaxies massives lointaines formant des étoiles à des rythmes de plusieurs centaines de masses solaires par an. Tels des archéologues, nous avons trouvé des ossements que nous avions attribués à l'accumulation de plusieurs animaux connus, alors que nous étions face au squelette d'un animal qui n'existe plus aujourd'hui, une sorte de dinosaure galactique. Quelques cas extrêmes étaient déjà connus, mais les observations d'Herschel montrèrent qu'il fut un temps dans l'histoire de l'Univers où les galaxies dinosaures dominaient la production d'étoiles. Ces ancêtres des galaxies elliptiques massives avaient été manqués, même dans les images les plus profondes du satellite Hubble, en raison de la grande quantité de poussière interstellaire qui absorbe la lumière des étoiles nouvellement nées. Par chance, cette poussière

rayonne dans l'infrarouge lointain - domaine d'observation d'Herschel, dévoilant les nouvelles générations d'étoiles.

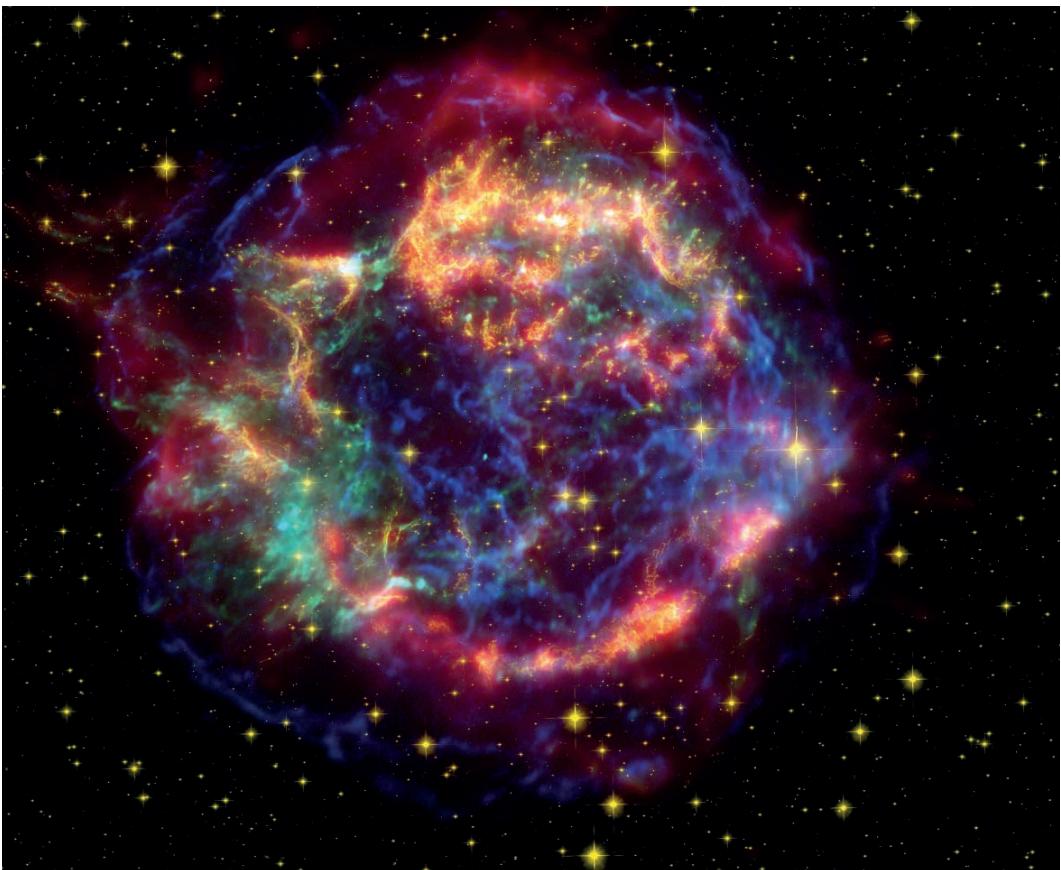
Les elliptiques massives étaient donc nées il y a environ 10 milliards d'années sous la forme de monstres formant des étoiles à un rythme prodigieux. L'interféromètre millimétrique ALMA (Atacama Large Millimeter Array) et l'observatoire de l'Institut de radioastronomie millimétrique (IRAM) ont apporté la pierre d'achoppement de cet édifice en mesurant l'évolution de la quantité de poussière et de matière interstellaire contenues dans les galaxies au cours de l'histoire de l'Univers. Ces réservoirs ne permettaient aux galaxies de former des étoiles à de tels rythmes que pendant environ 500 à 600 millions d'années. Or, il fallait invoquer plusieurs milliards d'années pour expliquer l'universalité de la formation d'étoiles découverte par les équipes du CEA avec la « séquence principale de la formation d'étoiles » des galaxies (l'étroite corrélation entre l'intensité de formation d'étoiles et la masse d'une galaxie). Une seule explication possible : les galaxies devaient recevoir en permanence de la matière intergalactique, véritable manne en provenance de l'espace. Et justement, les simulations numériques venaient de montrer que des filaments de matière intergalactique devaient nourrir les galaxies de façon continue. Cette théorie offrait de surcroît une explication naturelle à la mort des galaxies : en chutant dans les galaxies les plus massives, la matière libérait une énergie si grande qu'elle réchauffait la matière environnante provoquant l'arrêt de l'apport de matière. Puis quelque 500 millions d'années plus tard, la galaxie avait épuisé ses réserves. ■



PHÉNOMÈNES DE HAUTE ÉNERGIE

L'astrophysique des hautes énergies est l'étude des phénomènes les plus violents de notre Univers : explosions d'étoiles massives et formation des astres compacts (pulsars, magnétars, trous noirs), chocs et accélération des rayons cosmiques, accrétion et éjections relativistes par les astres compacts. Ces objets sont des laboratoires d'une physique de l'extrême : compacité, champs magnétiques et gravitationnels, chocs, accélération et vitesses mis en jeu sont les plus intenses permis par la physique contemporaine. Ces phénomènes sont étudiés au CEA par des approches théoriques, numériques et expérimentales.

Fig.1 : reste de la supernova Cassiopée A →



© NASA / JPL-Caltech

•

PAR

THIERRY FOGLIZZO

(Direction de la recherche fondamentale)



Thierry Foglizzo est astrophysicien et chef du Laboratoire de modélisation des plasmas astrophysiques (DAP-AIM) du CEA.

Supernovæ : comprendre l'explosion des étoiles massives

« La formation des trous noirs résulte des explosions ratées, lorsque la masse de l'étoile à neutrons atteint un seuil critique d'environ 2-3 fois la masse du Soleil. »

L'explosion des étoiles massives connues sous le nom de supernovæ est un processus clé en astrophysique pour disséminer les noyaux lourds formés par les réactions de fusion nucléaire, et donner naissance aux objets compacts tels que les étoiles à neutrons et les trous noirs.

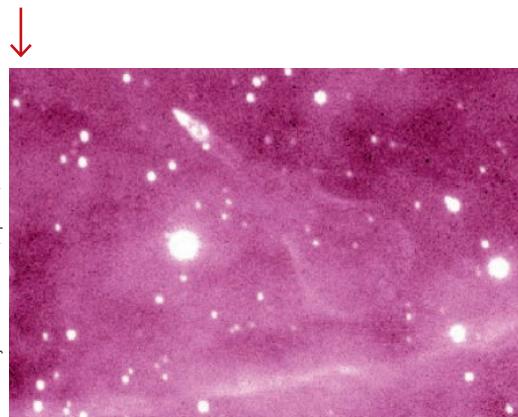
La mort explosive d'une étoile massive commence par l'effondrement de son cœur, lorsque la masse de fer synthétisée dans son cœur approche le seuil critique de 1,4 fois la masse du Soleil.

Le principal défi de la théorie des supernovæ est de comprendre le mécanisme qui transforme l'effondrement en explosion. Le seuil d'explosion dépend de l'absorption de neutrinos dans la région dense de 150 kilomètres qui entoure l'étoile à neutron en formation. La formation des trous noirs résulte des explosions ratées, lorsque la masse de l'étoile à

neutrons atteint un seuil critique d'environ 2-3 fois la masse du Soleil.

Au sein du Département d'astrophysique (DAP), le Laboratoire de modélisation des plasmas astrophysiques (LMPA) utilise des outils analytiques, numériques et expérimentaux pour caractériser les instabilités hydrodynamiques qui se développent au centre de l'étoile. Cet ingrédient clé est responsable d'une déformation de la région dense post-choc (Fig.1) qui favorise une direction privilégiée pour l'absorption des neutrinos et pour la mise en mouvement de l'onde de choc. Les mouvements asymétriques dans

Fig. 2: la nébuleuse de la guitare est une onde de choc produite par le mouvement d'une étoile à neutron à plus de 1 000 km/s.



© Chatterjee & Cordes 2002, ApJ 575, 407

le voisinage dense de l'étoile à neutron génèrent des ondes gravitationnelles et des fluctuations du flux de neutrinos. Il faut plusieurs heures pour que l'onde de choc parcourt la gigantesque enveloppe stellaire et produise l'explosion lumineuse appelée supernova.

La fontaine à supernovæ inventée au DAp révèle la dynamique asymétrique de la dernière seconde qui précède l'expansion du choc, au moment décisif où le cœur de l'étoile s'effondre en protoétoile à neutrons. Cette expérience démontre que l'apparition de mouvements transverses résulte naturellement des lois de la mécanique des fluides. En conséquence de cette dynamique, les étoiles à neutrons sont propulsées à plusieurs centaines de kilomètres par seconde et entraînées en rotation jusqu'à plus de dix tours par seconde (Fig. 2).

La connexion astrophysique repose sur l'analogie entre les vagues de surface dans la fontaine et les ondes acoustiques dans l'étoile. Les chercheurs du LMPA utilisent cette expérience pour renforcer leur intuition physique à propos des instabilités des ondes de choc. La simplicité de l'expérience permet aussi au public de découvrir la physique des supernovæ et la formation des étoiles à neutrons et des trous noirs. La fontaine à supernovæ fait partie de la collection permanente du Palais de la Découverte à Paris depuis 2015 (Fig. 3).

Dans l'expérience, l'onde de choc est représentée par un changement soudain de la hauteur de la surface libre de l'écoulement appelé ressaut hydraulique. Ce ressaut est similaire au ressaut circulaire de cuisine lorsque l'eau du robinet rencontre la surface horizontale de l'évier et s'écoule radialement vers l'extérieur. La principale différence dans l'expérience est que l'eau est injectée radialement vers le centre.

Les lois universelles de la mécanique des fluides sont responsables du même phénomène dans le cœur de l'étoile et dans la fontaine, à une échelle un million de fois plus petite. Les lois d'échelles garantissent que la

dynamique de l'expérience est cent fois plus lente que celle du cœur stellaire. Le phénomène le plus intéressant dans l'expérience est l'évolution instable de l'écoulement. Bien que l'injection d'eau soit stationnaire et homogène, des mouvements transverses apparaissent avec des amplitudes de plus en plus grandes. Ils transforment le ressaut circulaire en mouvement oscillatoire (Fig. 4) qui finit par tourner dans une direction aléatoire pendant que les régions internes tournent en sens opposé.

Même si les ingrédients physiques de la fontaine sont simplifiés par rapport à un cœur stellaire, les simulations numériques 3D les plus avancées suggèrent que cette simple expérience capture plusieurs processus clés de la théorie des supernovæ. Complémentaire des simulations numériques, elle nous apprend qu'un effondrement sphérique peut conduire à une explosion de travers et à la naissance d'une étoile à neutrons en mouvement et en rotation.

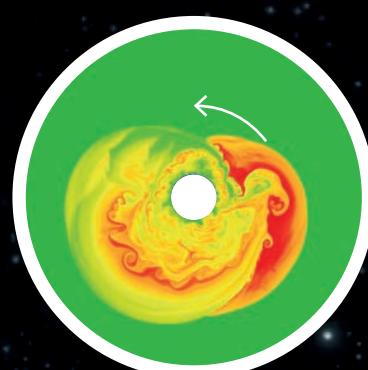
Le prochain défi consiste à comprendre comment la diversité de structures stellaires induit une diversité d'instabilités hydrodynamiques et conduit à des scénarios d'explosion différents distinguables par leur empreinte en neutrinos et en ondes gravitationnelles, par les propriétés de l'objet compact résiduel et par les inhomogénéités de composition des éjectas.

Deux douzaines de neutrinos avaient été observés en 1987 en provenance de la supernova SN1987A dans le Grand Nuage de Magellan proche de notre galaxie. Les détecteurs actuels de neutrinos et d'ondes gravitationnelles sont prêts à observer la prochaine supernova galactique. ■

Fig. 3: la fontaine à supernovæ du Palais de la découverte.



Fig. 4: la déformation du ressaut hydraulique dans la fontaine à supernovæ et dans sa simulation numérique est similaire à celle de l'onde de choc dans la simulation numérique de l'effondrement stellaire.



© T. Foglizzo, M. González, R. Kazeroni

Vue d'artiste de la coalescence
de deux étoiles à neutrons

•
PAR
JÉRÔME GUILET

(Direction de la recherche fondamentale)



Jérôme Guilet est astrophysicien
au Département
d'astrophysique (DAp-AIM) du CEA.



© Dana Berry, SkyWorks Digital, Inc.

« Une autre classe de sursauts gamma encore plus courts (d'une durée inférieure à deux secondes) correspond non pas à l'explosion d'une étoile massive classique mais à la coalescence de deux étoiles à neutrons. »

Explosions extrêmes

Certaines explosions de supernovæ sortent du lot par leur puissance extraordinaire. Ainsi la classe des supernovæ superlumineuses émettent cent fois plus de lumière qu'une supernova usuelle. D'autres, appelées hypernovæ, se distinguent par leur énergie cinétique et leur association avec l'émission d'un flash de quelques dizaines de secondes en rayons gamma, appelé sursaut gamma.

Pendant leur courte durée, les sursauts gamma sont les objets les plus lumineux de l'Univers et peuvent être observés jusqu'à des distances cosmologiques. Ils servent ainsi de phares permettant de sonder l'évolution des galaxies dans l'univers lointain lorsqu'il était encore jusqu'à 10 fois plus petit qu'aujourd'hui.

Une autre classe de sursauts gamma encore plus courts (d'une durée inférieure à deux secondes) correspond non pas à l'explosion d'une étoile massive classique mais à la coalescence de deux étoiles à neutrons (une étoile à neutrons est un astre extrêmement dense rassemblant entre une fois et demi et deux fois la masse du soleil dans un rayon de 10 km). C'est tout récemment, en août 2017, qu'une telle coalescence a été observée directement pour la première fois grâce à la détection d'ondes gravitationnelles par les interféromètres LIGO et VIRGO. L'observation du sursaut gamma associé ainsi qu'un rémanent à d'autres longueurs d'ondes du spectre électromagné-

tique a marqué le début d'une nouvelle ère d'exploration de l'Univers dite multi-messager.

Ces différents phénomènes explosifs extrêmes nécessitent d'une part un réservoir d'énergie phénoménal, d'autre part un processus capable d'extraire cette énergie sur un temps suffisamment court. Un des scénarios les plus populaires considère comme source d'énergie l'énergie cinétique d'une étoile à neutrons pouvant dépasser 10^{52} erg lorsqu'elle tourne avec une période de quelques millisecondes. Un champ magnétique extrêmement intense de 10^{15} G permettrait alors d'extraire efficacement cette énergie pour la transmettre à l'explosion. Il existe une classe d'étoile à neutrons appelées magnétars dont l'observation indique une telle intensité du champ magnétique, ce qui en fait les aimants les plus puissants connus dans l'Univers. Ces observations sont un indice en faveur du scénario théorique, dit du « magnétar milliseconde », mais le lien entre leur naissance et les explosions extrêmes n'a pas encore été fermement établi, notam-

ment par manque de modèles théoriques prédictifs et de signature observationnelle directe.

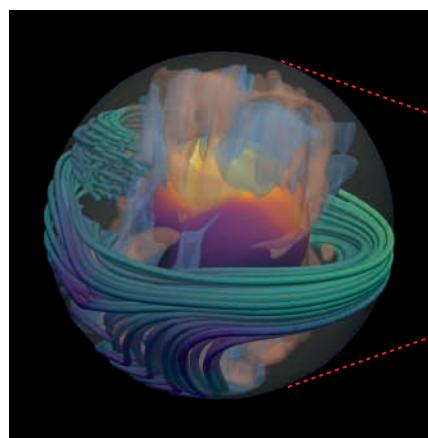
Le défi majeur des modèles théoriques est d'expliquer l'origine du champ magnétique. Au sein du Département d'astrophysique, le Laboratoire de modélisation des plasmas astrophysiques (LMPA) développe des simulations numériques tridimensionnelles de l'évolution du champ magnétique dans les premiers instants suivant la naissance d'une étoile à neutrons. Dans le cadre d'une ERC Starting Grant appelée MagBURST, qui a débuté en 2017, les premières simulations démontrant la génération d'un champ magnétique compatible avec celui d'un magnétar viennent ainsi d'être obtenues.

Le champ magnétique est généré par les mouvements du fluide constituant l'intérieur de l'étoile à neutrons. Celui-ci étant un très bon conducteur d'électricité, il peut générer les courants à l'origine du champ magnétique grâce à un mécanisme de dynamo. Cette dynamo pourrait être provoquée par des mouvements convectifs de façon similaire au cœur de fer liquide terrestre ou au Soleil (voir p. 13). Les premières simulations d'une dynamo convective dans une étoile à neutrons naissante ont montré l'apparition d'une nouvelle branche donnant naissance à des

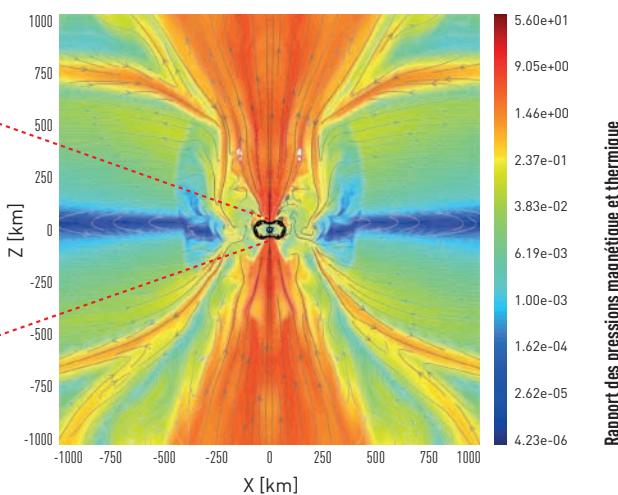
champs magnétiques extrêmement intenses de 10^{15} à 10^{16} G si la rotation est suffisamment rapide (Fig. 1). Dans les zones plus externes de l'étoile à neutrons, un autre mécanisme, dû à l'instabilité magnéto-rotationnelle similaire à celui se déroulant des disques d'accrétion, peut également se développer. Le prochain défi théorique consistera à déterminer l'interaction entre les deux mécanismes dynamos et leur impact sur les propriétés de l'explosion de supernova concomitante.

En parallèle de ces travaux numériques, le LMPA et le Laboratoire d'étude des phénomènes cosmiques de haute énergie (LEPCHE) collaborent sur les signatures observationnelles de ce scénario, notamment dans le cas où le magnétar naît de la coalescence de deux étoiles à neutrons. Le satellite franco-chinois SVOM (voir ci-dessous) permettra d'observer ces objets dans plusieurs longueurs d'ondes du spectre électromagnétique et sera ainsi un complément précieux des observatoires d'ondes gravitationnelles. L'observation de rayons X quelques heures à quelques jours après la détection d'ondes gravitationnelles pourrait ainsi donner la première preuve directe de la formation d'un magnétar. ■

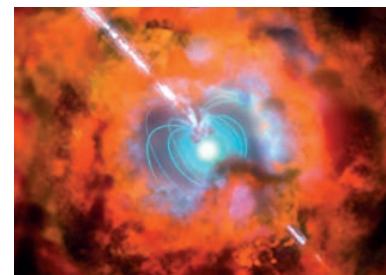
MAGNÉTAR



HYPERNOWA



Vue d'artiste d'un sursaut gamma provoqué par la naissance d'un magnétar.



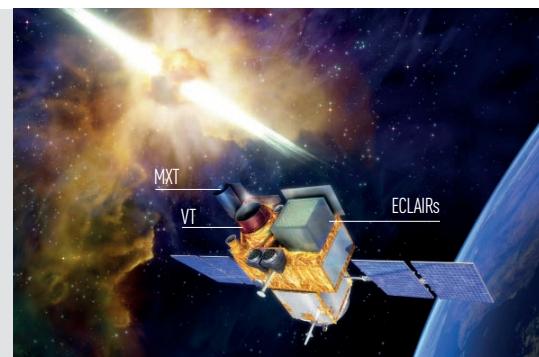
© ESO



Fig. 1: simulations numériques, à gauche de la dynamo convective à l'intérieur d'un magnétar en formation (Raynaud et al. en préparation) et à droite de l'explosion d'une supernova magnétorotationnelle provenant de sa naissance (Bugli et al. en préparation).

SVOM →

La mission franco-chinoise SVOM observera, dès 2021, les sursauts gamma produits par certains effondrements d'étoiles massives ou coalescences d'étoiles à neutrons. Son télescope ECLAIRS détectera l'émission prompte en rayons gamma et localisera l'événement sur le ciel en temps réel grâce au logiciel scientifique réalisé par le CEA. Il demandera de réorienter le satellite pour observer la rémanence du sursaut grâce aux télescopes embarqués, dans le visible pour le VT chinois et en rayons X pour le MXT français dont le plan focal est réalisé au DAp. Le segment sol français, coordonné par le CEA, traitera les données des instruments français et recevra les alertes sursauts pour les distribuer à des télescopes dédiés et à toute la communauté mondiale afin d'avoir un suivi complet de ces événements énigmatiques.



© CNES

•
PAR FABIO ACERO
ET FRANÇOIS BRUN

(Direction de la recherche fondamentale)

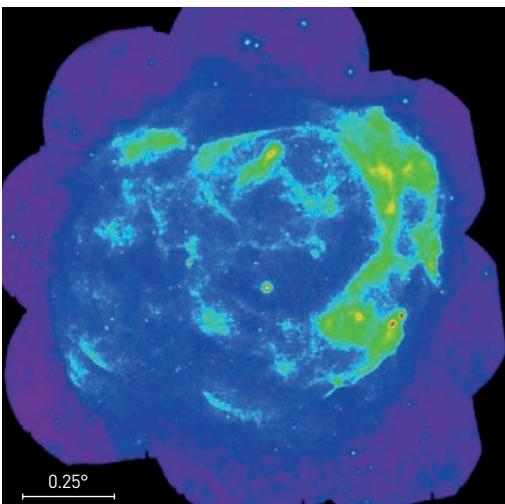


Fabio Acero est chercheur CNRS au Département d'astrophysique (DAP-AIM) du CEA.

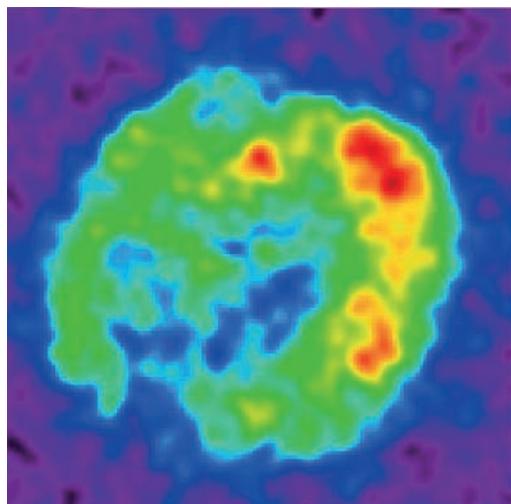


François Brun est chercheur au Département de physique des particules (Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers) du CEA.

Fig. 1: exemple du SNR RX J1713.7-3946 vu en rayons X (à gauche) et en rayons gamma du TeV (à droite). Les images sont à la même échelle.



XMM-Newton



H.E.S.S.

Vestiges de supernovæ et rayonnement cosmique : le ciel gamma nous éclaire

Les rayons cosmiques, ou RC, sont des particules de haute énergie, principalement des protons et des noyaux, mais aussi quelques électrons, qui frappent la Terre de manière isotrope et continue. Depuis leur découverte en 1912, les sources astrophysiques qui en sont à l'origine restent difficiles à déterminer.

Étant chargées, ces RC sont déviés lors de leur propagation par les champs magnétiques interstellaires et intergalactiques. Le spectre en énergie des RC, qui s'étend d'une centaine de MeV à plus de 10^{20} eV, présente une légère inflexion à 10^{15} eV (PeV), énergie en dessous de laquelle les RC seraient accélérés au sein de notre galaxie. Les forts chocs associés à l'explosion très énergétique qui accompagne la mort d'étoiles massives (appelés restes de supernovæ ou SNR) sont de bons candidats pour accélérer des hadrons et ce jusqu'à des énergies du PeV.

L'énergie de ces explosions, combinée au taux de supernovæ dans la galaxie (2-3 par siècle), permettrait de maintenir le flux des RC si seulement environ 10 % de cette énergie était utilisée pour l'accélération. En outre, les modèles d'accélération diffusive par onde de choc prédisent des spectres en loi de puissance relativement compatibles avec les observations.

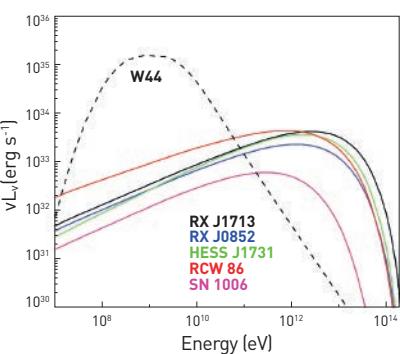
Pour valider cette hypothèse, nous étudions le rayonnement des particules accélérées au sein des SNR grâce aux observations en rayons X et en rayons gamma pour en sonder les propriétés (Fig. 1).

Dans le domaine du GeV, le LAT à bord du satellite Fermi a permis de réaliser un sondage de l'ensemble du ciel et de produire des catalogues de sources de photons gamma, en particulier un catalogue de SNR. À plus haute énergie, H.E.S.S. a réalisé un relevé dans le domaine du TeV des régions les plus internes de notre galaxie. En plus de recenser les SNR connus, H.E.S.S. a permis de révéler de nouveaux candidats et de conduire une étude de population en comparant les données au TeV et celles dans le domaine radio.

Le Fermi-LAT a permis d'identifier certains vestiges comme accélérateurs de hadrons, ce qui confirme que les SNR peuvent accélérer la composante principale du RC. Cependant, cette signature spectrale n'a pu être observée que dans des vestiges âgés ($T > 10^4$ ans) où la vitesse du choc a fortement diminué et l'énergie maximum atteinte par les particules ne permet pas d'expliquer le flux de RC aux plus hautes énergies (brisure dans le spectre autour de 10 GeV).

Les études conjointes GeV/TeV ont révélé deux principales catégories de vestiges émettant en rayons gamma. D'un côté, des SNR souvent jeunes ($T < 5000$ ans) dont le spectre gamma est dominé par une

Fig. 2: Comparaison des distributions d'énergies spectrales en luminosité pour des SNR jeunes dont le spectre pique vers 10^{12} eV et pour un SNR plus âgé dont l'émission pique autour de 10^9 eV.



émission leptonique et dont l'onde de choc évolue dans un milieu ambiant peu dense ($n \sim 0.1 \text{ cm}^{-3}$) et de l'autre côté des vestiges en interaction avec un milieu dense ($n > 1 \text{ cm}^{-3}$) dont le spectre est dominé par un processus hadronique (comme W44 en fig. 2). Ainsi l'environnement dans lequel évolue le SNR joue un rôle aussi important sur son émission à haute énergie que l'âge de l'objet. Il y a donc une difficulté observationnelle à mesurer les propriétés des hadrons dans des restes jeunes car la faible densité du milieu (i.e. la densité des cibles pour le processus hadronique) résulte en un faible niveau d'émission gamma comparé au canal leptonique. H.E.S.S. n'a par ailleurs pas permis de révéler de SNR « PeVatron » (accélérant des hadrons au PeV).

En conclusion nos observations montrent que pour l'instant les SNR, tout en restant d'excellents candidats, ne remplissent pas encore toutes les conditions pour être la source principale des RC galactiques.

Les relevés de Fermi et H.E.S.S. ont toutefois apporté une moisson de résultats importants, notamment en révélant d'autres types de sources qui pourraient contribuer au spectre du rayonnement cosmique. Par exemple, un PeVatron été identifié au centre galactique par H.E.S.S. (potentiellement lié à l'activité du trou noir Sgr A*). L'accélération des RC pourrait également prendre place par effets collectifs au sein des régions de formation d'étoiles comme le cocon du Cygne.

La sensibilité de H.E.S.S. ne l'a pas permis mais la prochaine génération d'instrument, incarnée par CTA, permettra de sonder la population de SNR dans l'ensemble de la Galaxie et ce jusqu'à des énergies permettant d'identifier de manière univoque les accélérateurs des RC. En outre, la détection de nouveaux SNR, la caractérisation de l'environnement des sources, cruciale pour modéliser l'émission de photons gamma, sera fortement accrue grâce au prochain satellite en rayons X, ATHENA. ■

Éjections relativistes dans les microquasars

En 1962, via des compteurs Geiger embarqués dans une fusée Aerobee, l'équipe de R. Giacconi découvre Scorpius X-1, la première binaire X de l'histoire. Trente ans plus tard, F. Mirabel (CEA) observe, en radio, des jets relativistes au sein de binaires X et découvre ainsi les microquasars. Retour sur quelques-unes des récentes avancées sur ces objets fascinants.

Un système « binaire X » est composé d'un objet compact (trou noir ou pulsar) et d'un compagnon stellaire. L'accrétion de la matière du compagnon et des jets violents sont les moteurs énergétiques des microquasars. La luminosité due à l'accrétion est $L \propto \dot{M} \times \frac{M}{R}$ (\dot{M} taux d'accrétion, M/R compacité de l'accréteur) et vaut typiquement [1] $L \sim 10^{33} \text{ W}$ pour 1g de matière accrétée (~20 fois la fusion d'1g de deutérium-tritium). L'accrétion se fait via un disque de plasma (Fig. 1 page suivante) dont le pic d'émission (thermique) est à 1 keV. Les jets émettent par rayonnement synchrotron et dominent depuis la radio. Les régions les plus proches du trou noir sont lieux d'intenses processus et d'échanges matière-énergie encore très mal compris aujourd'hui (Fig. 1). Accrétion-éjections sont omniprésents dans l'Univers (formation stellaire, formation des astres compacts, cœur des galaxies...) et facilement étudiables dans les microquasars grâce à leur brillance et leurs temps d'évolution relativement courts (jour-mois).

Le CEA et l'expertise du « multi-longueur d'onde »

L'origine, la composition, les processus d'accélération des jets, leurs liens avec l'accrétion et leur rétroaction sur le milieu interstellaire sont certaines des questions étudiées par les astrophysiciens du CEA.

A partir d'observations simultanées au sol et dans l'espace [2], ils ont d'abord grandement contribué à la découverte des différents types de jets : jets brefs et ultra-relativistes ($v \geq 0.9c$) contre jets compacts continus de faible vitesse ($v \leq 0.1c$). La dernière décennie a surtout permis d'associer les éjections discrètes à de brusques bouffées d'accrétion signant l'origine même de la matière éjectée. Les jets compacts sont associés à des états où l'accrétion est plus régulière et peu efficace : l'énergie gravitationnelle est ici redistribuée dans les jets plutôt que sous forme radiative.



PAR
JÉRÔME RODRIGUEZ ET
FABIAN SCHUSSLER

(Direction de la recherche fondamentale)



Jérôme Rodriguez est astrophysicien et chef du Laboratoire d'étude des phénomènes cosmiques de haute énergie (DAp-AIM) du CEA.



Fabian Schüssler est astrophysicien au Département de physique des particules (Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers) du CEA.

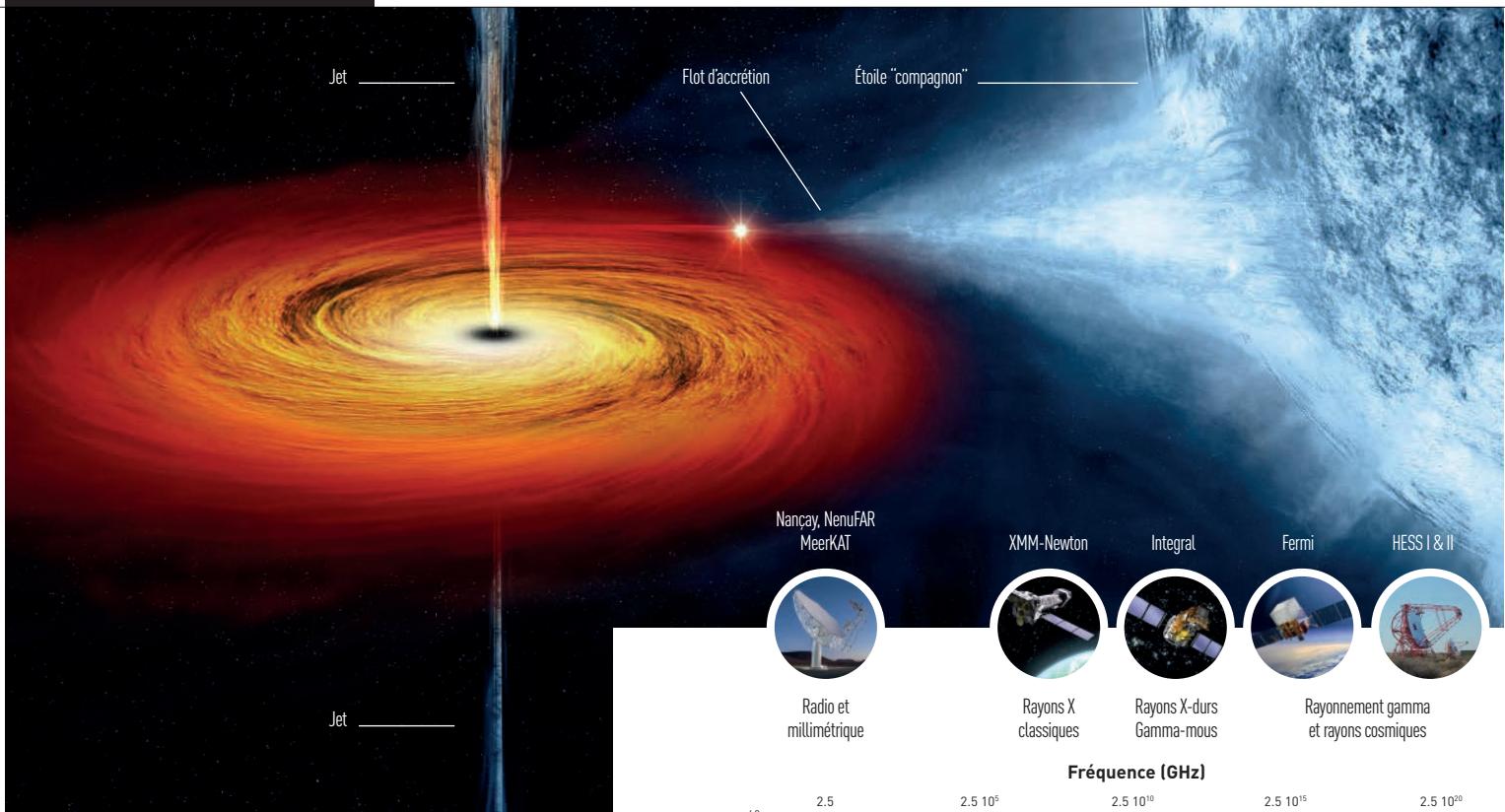


Fig. 1 : spectre large bande du microquasar Cyg X-1 (Pepe et al. 2016).

On y voit les jets, l'étoile compagnon, le flot d'accréation.

Le jet produit un rayonnement Synchrotron dominant le domaine radio, l'étoile un rayonnement thermique dans le visible et le disque d'accréation un rayonnement thermique dans les X mous classiques.

L'origine du spectra à plus haute énergie est très débattue : les X-durs semblent être du rayonnement Compton-inverse, avec une composante potentielle synchrotron au MeV, provenant probablement du jet, contraignant, le cas échéant, fortement la composition et l'énergétique des jets. Les traits pleins sont les émissions prédictes de ces différents milieux dans ce modèle. Le bandeau supérieur montre les instruments utiles avec fortes participations des équipes du CEA.

MeV, provenant probablement du jet, contraignant, le cas échéant, fortement la composition et l'énergétique des jets. Les traits pleins sont les émissions prédictes de ces différents milieux dans ce modèle. Le bandeau supérieur montre les instruments utiles avec fortes participations des équipes du CEA.

[1] $M=10 M_{\odot}$, $R=30$ km.

[2] Notamment avec les satellites XMM-Newton et INTEGRAL (ESA), Fermi (NASA), et le réseau de télescopes de très haute énergie H.E.S.S, à fort investissement du CEA.

[3] L'effet Compton diffuse un rayonnement polarisé dans une direction perpendiculaire à son angle de polarisation. Ici le 1^{er} plan détecteur est utilisé comme diffuseur, le second permet d'établir l'histogramme angulaire du rayonnement.

Même si les travaux théoriques et numériques développées par les collaborateurs du laboratoire Astroparticule et cosmologie (Paris), de l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble et de l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie (Toulouse) semblent indiquer le rôle fondamental d'instabilités magnétiques dans l'évolution dynamique disque-jet, il n'est aujourd'hui pas possible de discriminer les différents modèles en concurrence sur la base des seules analyses spectrales.

Une manière innovante de lever une partie du voile a été d'utiliser le double plan détecteur du télescope IBIS à bord d'Integral comme polarimètre [3]. Le fort taux de polarisation ainsi détecté dans le microquasar Cygnus X-1 témoigne de l'émission d'électrons du jet compact par effet synchrotron jusqu'au MeV. Ceci est confirmé par la détection de rayonnement au GeV

avec l'observatoire Fermi dans Cygnus X-1, X-3 et V404 Cygni, signe de l'interaction de ces électrons avec le champ de rayonnement environnant.

Les futurs observatoires tels que SVOM, CTA (gamma) et SKA (radio) participeront bientôt activement à la recherche de ces signatures dans un plus grand nombre de sources. Acteurs majeurs de l'ère de l'astronomie « temps réel » de la prochaine décennie, la surveillance du ciel multi-longueur d'onde apportera de nouvelles informations par l'observation de phases d'activité peu connues des trous noirs. Une détection au TeV avec CTA sera, par exemple, la signature de matière hadronique dans les jets et forte de conséquence pour leur énergétique totale. Dans cette optique, le projet SGSO co-porté par les chercheurs du CEA aura pour but de sonder le ciel transitoire de très haute énergie à l'horizon 2025+.

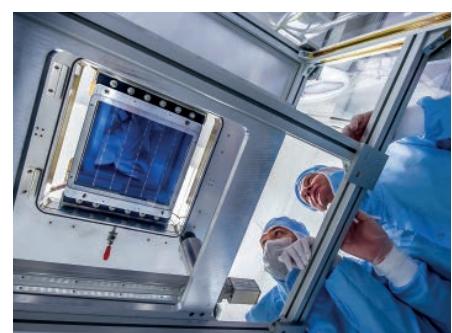
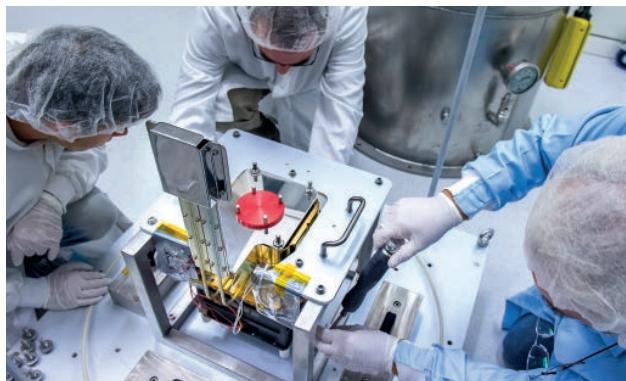
Vers de nouvelles découvertes !

Couplant observations, traitement du signal et modélisation, les résultats scientifiques obtenus au CEA reflètent l'évolution des connaissances dans de nombreux thèmes astrophysiques du cycle solaire, à la formation des étoiles et des galaxies, des premiers amas de galaxies aux contraintes cosmologiques. Ils illustrent l'incontestable progression en dix ans de notre compréhension de l'Univers et pointent sur les questions ouvertes et les défis à relever.

Un des enjeux majeurs dans l'ensemble des domaines abordés est la nécessaire prise en compte de l'imbrication des multiples processus physiques - couplage, rétroaction - sur une large gamme d'échelles spatiales. Quel est le lien entre la dynamique interne du Soleil et les éruptions solaires ? Quel est l'impact des propriétés de l'étoile hôte et de son activité, sur les (exo)planètes et leur l'habitabilité ? Quels sont les processus responsables de la structuration du milieu interstellaire et de la formation des étoiles ? Quid des stades ultimes de l'évolution stellaire (supernovae, objets compacts) et de leur impact sur le milieu interstellaire et les galaxies ? Quelle est la nature de l'énergie noire ?

L'avènement du numérique, de l'intelligence artificielle et le prochain passage à l'exascale du calcul haute performance offrent de nouvelles opportunités pour l'astrophysique. Une nouvelle ère d'observatoires au sol et dans l'espace, à laquelle le CEA contribue activement, permettra bientôt de scruter l'Univers avec des instruments ouvrant de nouveaux horizons par leurs technologies innovantes – surface collectrice, imagerie et spectroscopie haute résolution, variabilité temporelle, polarisation.

Coopération scientifique entre les agences spatiales chinoise (CNSA) et française (CNES), la mission SVOM (Space based multi-band astronomical Variable Objects Monitor) est dédiée à la détection et l'étude des sursauts gamma.



Inspection des capteurs CCD du plan focal de l'instrument VIS de la mission spatiale Euclid par des ingénieurs du Département d'astrophysique du CEA.

PAR
ANNE DECOURCHELLE

(Direction de la recherche fondamentale)



Anne Decourchelle est directrice de l'UMR AIM et chef du Département d'astrophysique du CEA (Institut de recherches sur les lois fondamentales de l'Univers).

« L'avènement du numérique, de l'intelligence artificielle et le prochain passage à l'exascale du calcul haute performance offrent de nouvelles opportunités pour l'astrophysique. »

LA CONNAISSANCE AU BOUT DES DOIGTS !

Découvrez

clefs 
L'ÉDITION **NUMÉRIQUE**

Dans l'édition numérique de juin, tout sur les techniques et technologies innovantes développées par le CEA, qui contribuent à faire progresser notre connaissance des civilisations anciennes et à mieux connaître et préserver les œuvres du passé.

LISEZ, AIMEZ & PARTAGEZ !

Rendez-vous sur

bit.ly/clefs-cea-science-histoire



#69

À DÉCOUVRIR EN NOVEMBRE 2019

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE



Vous souhaitez approfondir votre connaissance de la matière et l'énergie noires : suivez en ligne la masterclass de David Elbaz !

Cette masterclass a été enregistrée à l'École Polytechnique le 11 avril 2019

bit.ly/masterclass-matiere-energie-noire

À l'exclusion des illustrations, la reproduction totale ou partielle des informations contenues dans ce numéro est libre de tous droits, sous réserve de l'accord de la rédaction et de la mention d'origine.

Abonnement gratuit ou commande au numéro : clefs-cea@cea.fr
Cet exemplaire ne peut être vendu.



© 2019 CEA

RCS Paris B 775 685 019
Siège social : Bâtiment Le Ponant D,
25 rue Leblanc, 75015 Paris

#68
AVRIL 2019

clefs

LES VOIX
DE LA RECHERCHE

Clefs CEA N° 68 - Avril 2019

Revue éditée par le CEA

Direction de la communication
Bâtiment Siège
91191 Gif-sur-Yvette Cedex - FR
Tél. : (+33) 1 64 50 10 00

Directeur de la publication

Marie-Ange Folacci

Rédacteur en chef

Laetitia Baudin
laetitia.baudin@cea.fr

Comité éditorial

Cécile Castille, Étienne Klein,
Sophie Martin, Éric Proust, Yves Samson
Gérard Sanchez

Iconographie

Thinkstock, Getty Images, Wikipedia

Abonnement

L'abonnement à la revue Clefs CEA (version papier) est gratuit.
Les demandes d'abonnement doivent être adressées, de préférence par Internet, à l'aide du formulaire disponible à l'adresse : www.cea.fr ou en adressant un mail à clefs-cea@cea.fr

ISSN 0298-6248

Dépôt légal à parution

Réalisation

Agence Heidi
www.agence-heidi.fr

Impression

Imprimerie de la Centrale - Lens
Imprimé sur papier recyclé.

Pour en savoir plus ou
retrouver tous
les dossiers thématiques



www.cea.fr

cea

Abonnez-vous !
<http://newsletters.cea.fr/contact>